

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.578.46(215017)

ТЕНДЕНЦИИ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ
НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Л.М. Китаев, Т.Б. Титкова, Е.А. Черенкова

Институт географии РАН, 109017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия, lkitaev@online.ru

Выявлены многолетние тенденции изменений месячных снегозапасов и снегонакопления, особенности их пространственного распределения в условиях современных вариаций климата Северной Евразии. Определен вклад снегонакопления отдельных зимних месяцев, а также крупных регионов в общие тенденции изменений снегозапасов. Оценен характер изменений снегонакопления для территорий с разными значениями нормализованного относительного вегетационного индекса как одного из показателей состояния поверхности.

Снежный покров, температура воздуха, тенденции многолетних изменений, месячный прирост, нормализованный вегетационный индекс

SNOW ACCUMULATION TENDENCIES IN NORTHERN EURASIA

L.M. Kitaev, T.B. Titkova, E.A. Cherenkova

Institute of Geography RAS, 109017, Moscow, Staromonetny per., 29, Russia, lkitaev@online.ru

Long-term tendencies of monthly variations of snow accumulation and their spatial features are revealed in the conditions of modern climate changes over Northern Eurasia. The contribution of snow accumulation of winter months and key regions are determined for the general tendencies of snow cover changes. The character of changes of snow accumulation is estimated for the territories with various ranges of normalized difference vegetation index as one of the indicators of surface condition.

Snow cover, air temperature, tendencies of long-term variations, monthly increase, normalized vegetation index

ВВЕДЕНИЕ

Изменения снежного покрова, как важного звена во взаимодействии климатических, гидрологических и гляциологических процессов, долгое время являются предметом исследований в рамках изучения текущих изменений природной среды. За последнее десятилетие нами в Институте географии РАН получены результаты, характеризующие особенности крупномасштабных и региональных вариаций снежного покрова Северной Евразии в условиях современных вариаций климата. Показано, в частности, что в течение второй половины XX в. имело место многолетнее увеличение снегозапасов на фоне повышения зимних осадков и температуры воздуха – как следствие усиления активности североатлантической и арктической осцилляций [Kitaev et al., 2003, 2005; Титкова, Кононова, 2006]. Были получены первые результаты исследований взаимодействия локальных изменений снежного покрова и метеорологических усло-

вий для горных регионов юга Евразии и типичных ландшафтов юга Западно-Сибирской низменности и севера Восточно-Европейской равнины [Kitaev, 2003; Китаев и др., 2004].

В продолжение исследований причин изменчивости снегозапасов нами проведены работы по уточнению характера снегонакопления, в данном случае для месячных значений и в условиях региональной изменчивости климата.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДОЛОГИЯ

В качестве исходных материалов использованы данные режимных наблюдений за снежным покровом и температурой воздуха 1000 метеорологических станций за период 1966–2000 гг. Данные интерполированы в узлы регулярной сетки с шагом $1 \times 1^\circ$. Изменчивость параметров исследована для начала зимы – времени установления снежного покрова и нарастания снегозапасов. Изменения

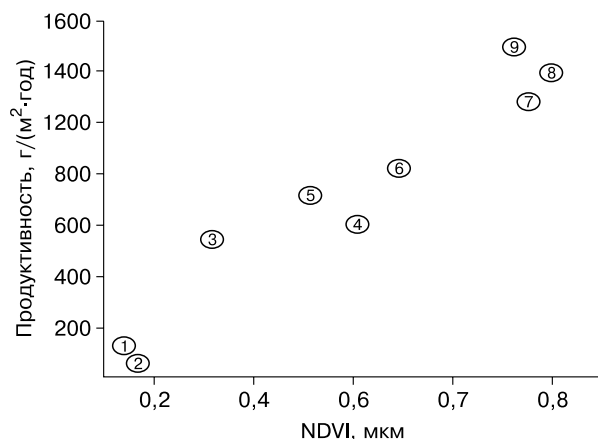


Рис. 1. Значения индексов NDVI и продуктивность различных типов экосистем [Huete, 2004]:

1 – тундра, 2 – пустыня, 3 – лесотундра, 4 – степи и луга, 5 – саванны, 6 – бореальные хвойные леса, 7 – хвойно-лиственные леса, 8 – широколиственные леса, 9 – дождевые прибрежные леса.

рассматриваются с месячным шагом: для средней за месяц температуры воздуха и снегов запасов на последнее число месяца – для ноября, декабря, января и февраля соответственно. Кроме абсолютных значений сезонных и ежемесячных параметров, исследован их прирост от месяца к месяцу. Многолетние тенденции изменений параметров анализируются с помощью стандартных статистических приемов. Приводимые в тексте значения рассчитанных коэффициентов и уравнений линейных трендов значимы на уровне более 95 %, случаи же незначимых трендов оговариваются особо.

Для уточнения характера пространственной изменчивости снегов запасов в условиях региональных изменений климата использован нормализованный относительный вегетационный индекс – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Величина NDVI характеризует количество фотосинтетически активной биомассы и используется в настоящее время для решения задач, связанных с количественной оценкой растительного покрова. Наиболее информативны величины NDVI летнего периода, как времени активного прироста биомассы, а наиболее заметная изменчивость индекса характерна для вегетационного периода. В связи с этим для характеристики состояния поверхности Северной Евразии использовалось среднее значение NDVI для июня за период 1982–2001 гг. Анализировались данные высокочастотного радиометра AVHRR спутников NOAA для каналов в диапазонах 0,58–0,68 и 0,72–1,00 мкм [Huete, 2004; Leeuwen et al., 1999; Yoshioka et al., 2000; Zhang et al., 2003]. Современные технологические особенности спутниковых измерений в настоящее время не

обеспечивают высокой точности в определении зависимости между величинами NDVI и продуктивностью конкретных типов растительных сообществ. При достаточной пространственной вариативности показателя пока плохо различимы типы лесной растительности, поверхность лесотундры и степей (рис. 1) [Huete, 2004]. В результате для проведения расчетов нами определены следующие диапазоны NDVI, позволяющие пока достаточно грубо сгруппировать растительные сообщества: 0–0,2 мкм (полупустыни и степи); 0,2–0,4 мкм (тундра и лесостепи); 0,4–0,6 мкм (редколесья лиственных хвойных лесов); 0,6–0,8 мкм (лиственные, смешанные и хвойные леса). К анализу не привлекались отрицательные значения индекса, присущие ледникам, заснеженным поверхностям и открытому грунту арктических пустынь.

Значения NDVI использованы для анализа в данном случае как простой способ количественной оценки характера подстилающей поверхности и определения приуроченности характерных изменений снегов запасов к конкретным типам ландшафта. Кроме того, в настоящее время исследования взаимосвязи распределения снежного покрова и характера растительности редки для крупных регионов и представляется весьма полезным развивать методические подходы такого рода исследований.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СНЕГОВА ЗАПАСОВ В НАЧАЛЕ ЗИМНЕГО ПЕРИОДА

Прирост снегов запасов в начале зимы наиболее заметен в ноябре (36 мм), в период установления снежного покрова, и в январе (24 мм) (рис. 2). В декабре и феврале его значения невелики – 9,3 и 17,1 мм соответственно. При этом тренд прироста снегов запасов в ноябре отрицателен –0,116 мм/год ($R^2 = 0,14$) и незначим в декабре. В то же время в январе максимальный за зиму прирост снежного покрова имеет наиболее заметную многолетнюю тенденцию увеличения (+0,396 мм/год) при положительном, но меньшем тренде в феврале (+0,188 мм/год, $R^2 = 0,12$). Величина перепада температуры в сторону понижения максимальна в ноябре (–8,6 °C), что вполне закономерно для переходного от осени к зиме периода (рис. 3). В ноябре и январе перепад температуры меньше (–5,5 и –3,6 °C), а в феврале уже наблюдается перепад температуры в сторону повышения в связи с весенним потеплением, прежде всего на юге Восточно-Европейской равнины (1,27 °C). Коэффициенты линейного тренда перепада температуры в сторону понижения для всех месяцев положительны (см. рис. 3), что особенно заметно в январе (+0,097 °C/год, $R^2 = 0,22$), и это согласуется с тенденцией повышения зимних температур для Северной Евразии в среднем.

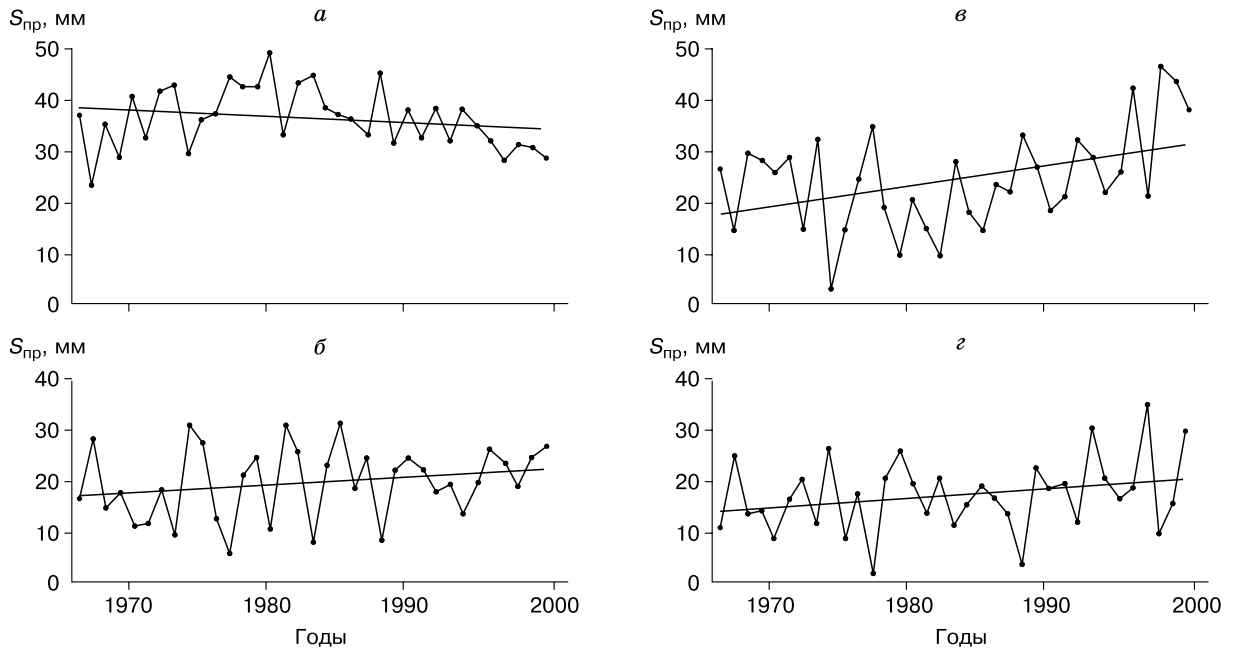


Рис. 2. Изменчивость месячных приростов снеготпасов $S_{пр}$ и их линейные тренды:

a – ноябрь, $y = -0,116x + 38,33$, $R^2 = 0,141$; *б* – декабрь, $y = 0,156x + 16,54$, $R^2 = 0,151$; *в* – январь, $y = 0,396x + 17,48$, $R^2 = 0,266$; *г* – февраль, $y = 0,188x + 13,86$, $R^2 = 0,172$.

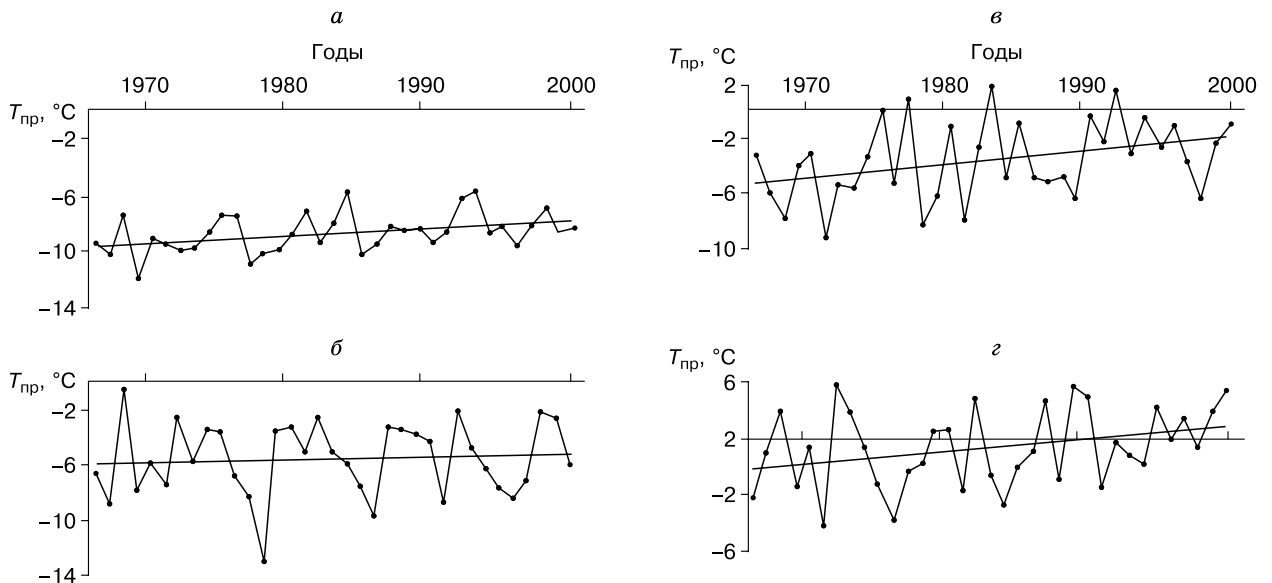


Рис. 3. Изменчивость месячных перепадов температуры воздуха $T_{пр}$ и их линейные тренды:

a – ноябрь, $y = 0,052x - 9,58$, $R^2 = 0,260$; *б* – декабрь, $y = 0,017x - 1,884$, $R^2 = 0,004$; *в* – январь, $y = 0,097x - 5,40$, $R^2 = 0,174$; *г* – февраль, $y = 0,081x - 0,367$, $R^2 = 0,208$.

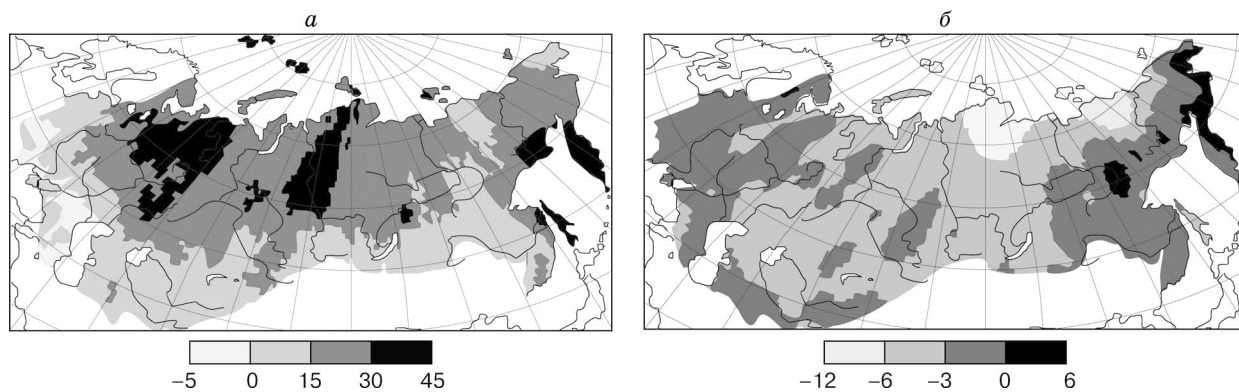


Рис. 4. Величина прироста снеготпасов (мм) (а) и перепада температуры воздуха (°С) (б) в январе.

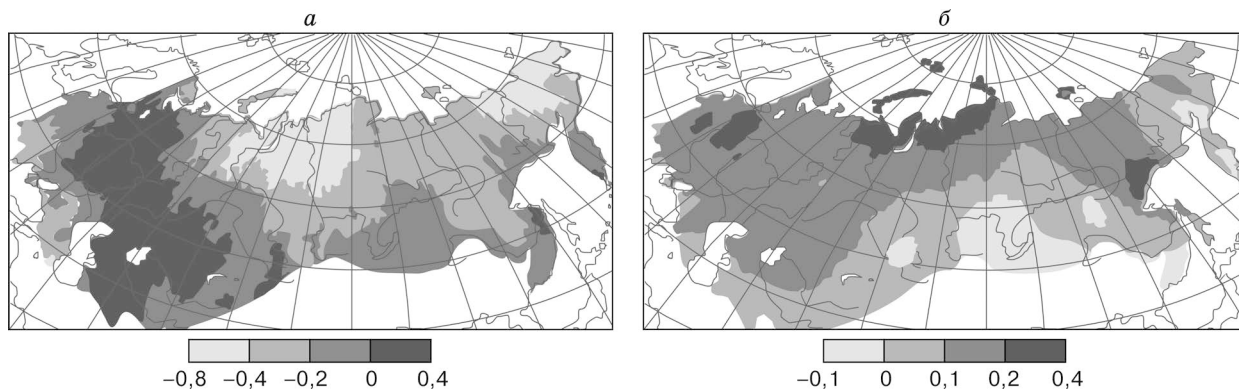


Рис. 5. Коэффициенты линейного тренда прироста снеготпасов (а) и перепада температуры воздуха (б) в январе.

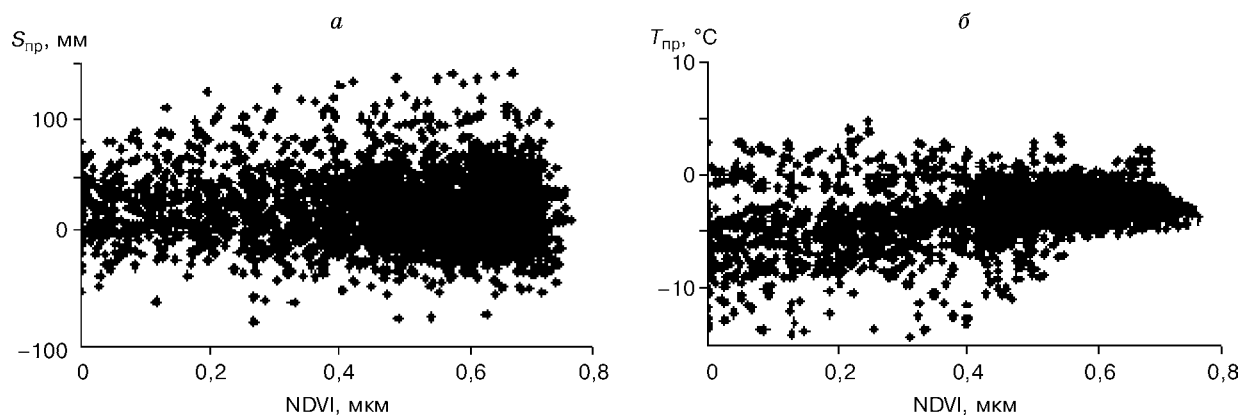


Рис. 6. Связь прироста снеготпасов $S_{пр}$ (а) и перепада температуры воздуха $T_{пр}$ (б) в январе с индексом NDVI для ячеек $1 \times 1^\circ$ всей территории.

Что касается пространственного распределения, то увеличение прироста снеготопливов января происходит с юга на север при соответствующих зональных изменениях прироста температуры воздуха. Максимальный прирост январских снеготопливов характерен для центральной и северо-восточной частей Восточно-Европейской равнины, среднего течения Енисея и п-ова Камчатка (рис. 4), как зон активизации циклонической деятельности и соответствующего увеличения осадков под влиянием североатлантической осцилляции NAO (North Atlantic Oscillation) и арктической осцилляции АО (Arctic Oscillation), а также алеутского минимума [Попова, Шмакин, 2003; Попова, 2004; Кононова, 2006; Китаев et al., 2005].

Положительные, они же максимальные, коэффициенты линейного тренда снеготопливов отмечены только в центральной и северо-восточной частях Восточно-Европейской равнины и на Туранской низменности. Это также связано с усилением циклоничности данных регионов в результате усиления воздействия NAO последнего десятилетия XX в. [Попова, Шмакин, 2003; Попова, 2004]. На севере Сибири отчетливо прослеживается тенденция уменьшения прироста снеготопливов января при уменьшении месячных перепадов температуры в сторону понижения (рис. 5). На юге Сибири величина отрицательных коэффициентов линейного тренда прироста снеготопливов невелика, а перепады температуры в сторону понижения здесь год от года увеличиваются. В данном случае тенденция потепления на севере Сибири обеспечивает, по-видимому, прекращение многолетнего увеличения снеготопливов в январе – прирост снеготопливов еще существует, но коэффициент линейного тренда уже отрицателен. На юге Сибири повышение температуры зимнего периода пока не так заметно на фоне ее низких абсолютных значений, и многолетнее уменьшение прироста снеготопливов в январе здесь происходит медленно.

Анализ пространственного распределения снежного покрова в условиях региональных изменений температур при различных значениях NDVI проводился для территории севернее 50° с.ш. В этом случае диапазон индекса 0,2–0,4 мкм характеризует только пространства лесотундры без учета близких по значению индекса степных пространств южнее 50-й параллели. Вариации площади с различными величинами прироста снеготопливов и значений NDVI рассматривались путем подсчета количества ячеек 1 × 1° регулярной сетки со значениями параметров января в соответствующих диапазонах (рис. 6, 7). Прирост снеготопливов ($S_{пр}$) наиболее значим на лесных территориях с индексом NDVI в диапазонах 0,4–0,6 и 0,6–0,8 мкм, и положительные значения коэффициента линейного тренда прироста снеготопливов ($\beta S_{пр}$) занимают наибольшую площадь именно здесь – соответственно 23,5 и 25,1 % всей исследуемой территории (см. рис. 6). Здесь же отмечено преобладание положительных коэффициентов линейного тренда прироста снеготопливов – 13,7 и 16,1 % всей исследуемой территории. Для тех же пространств с диапазонами NDVI 0,4–0,6 и 0,6–0,8 мкм имеет место многолетнее уменьшение перепада температуры воздуха ($T_{пр}$) в сторону понижения (коэффициент линейного тренда ($\beta T_{пр}$) положителен), здесь такие условия характерны для 26,4 и 28,0 % всей рассматриваемой территории (см. рис. 7).

На территориях со значениями NDVI менее 0,4 мкм (в данном случае для тундры и лесотундры Северной Евразии) преобладают положительные приросты снеготопливов с характерным их многолетним уменьшением. Такая картина наблюдается на фоне максимальных перепадов температуры в сторону понижения и максимальной скорости многолетнего уменьшения этой величины (см. рис. 6, 7).

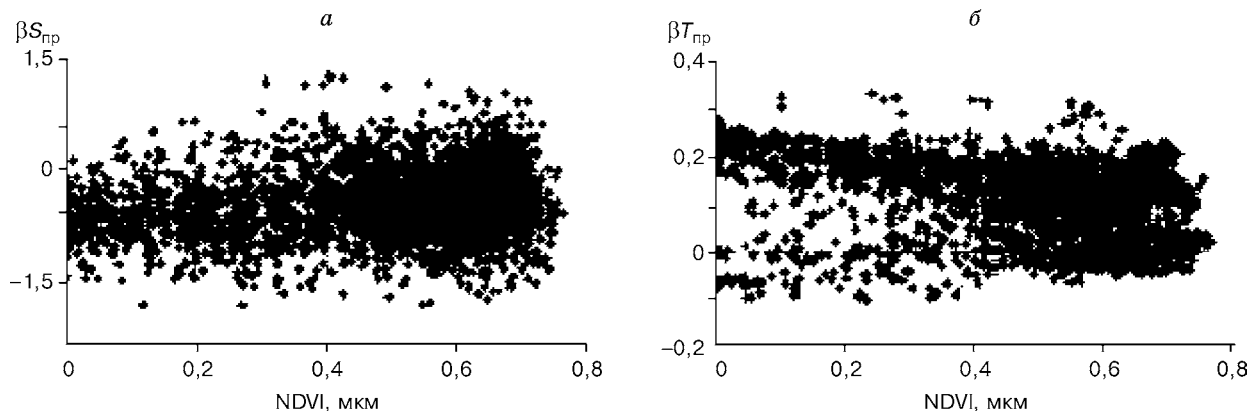


Рис. 7. Связь коэффициентов линейных трендов прироста снеготопливов $\beta S_{пр}$ (а) и перепада температуры воздуха $\beta T_{пр}$ (б) в январе с индексом NDVI для ячеек 1 × 1° всей территории.

ОБЩИЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ СНЕГОЗАПАСОВ

Значения средней зимней температуры воздуха, определяющие во многом изменчивость снежного покрова, имеют тенденцию к повышению для территории Северной Евразии в целом. Эти изменения обеспечиваются характерными месячными вариациями температуры – величина ежемесячных перепадов температуры в сторону понижения постепенно уменьшается, находясь пока в области отрицательных значений (см. рис. 3, 5). Отрицательный коэффициент линейного тренда прироста снегозапасов в ноябре и незначимый отрицательный (как возможный показатель начала снижения) коэффициент линейного тренда снегозапасов в декабре обеспечиваются, в первую очередь, постепенным уменьшением перепада температур в сторону понижения в осенние месяцы. При этом январский прирост снегозапасов имеет положительный коэффициент линейного тренда и увеличивается в 1966–2000 гг. на 19 мм. Положительный коэффициент линейного тренда температуры и многолетнее уменьшение ее перепада в сторону понижения в январе в данном случае не влияют на увеличение прироста январских снегозапасов, поскольку средние для территории январские температуры не превышают -10°C . Исходя из характера месячных изменений снегозапасов, именно январский их прирост вносит наиболее существенный вклад в многолетнее увеличение февральских снегозапасов, наибольших за зиму для Северной Евразии. Корреляционный анализ показывает, что январский прирост снегозапасов в наибольшей степени по сравнению с осенними месяцами обеспечивает изменения снегозапасов в феврале – 17 % общей дисперсии при коэффициенте 0,420, а в совокупности с приростом в декабре – 28 % при коэффициенте 0,526 (таблица). Эти значения коэффициентов существенно превышают значения коэффициентов октября, ноября и декабря.

Вполне логичной является пространственная локализация максимального прироста снегозапасов в январе (см. рис. 5, 6). Это Восточно-Европей-

ская равнина севернее 30° с.ш., среднее течение Енисея и п-ов Камчатка – территории с достаточным количеством зимних осадков и низкими температурами зимнего периода. Перепад температуры в сторону понижения в январе составляет здесь, как и на большей части территории, $0...-6^{\circ}\text{C}$. Январский перепад температуры имеет практически повсеместную, за исключением юга Восточной Сибири, многолетнюю тенденцию к увеличению – величина месячного понижения температуры со временем уменьшается, находясь все же в области отрицательных значений. Положительный коэффициент линейного тренда прироста месячных снегозапасов характерен для Восточно-Европейской равнины. Ситуация представляется вполне закономерным проявлением усиления циклоничности Восточно-Европейской равнины: повышение температуры (в частности, за счет уменьшения помесечного понижения в октябре, ноябре и декабре), увеличение осадков и снегозапасов. На юге Сибири разнонаправленные значения коэффициентов линейного тренда прироста температуры и снегозапасов совпадают по расположению, а сам прирост снегозапасов здесь медленно уменьшается (см. рис. 5, 6). Многолетняя тенденция снижения прироста январских снегозапасов на севере Сибири может быть связана с наступлением здесь предела снегонакопления ввиду многолетнего повышения температуры, прежде всего за счет уменьшения месячных перепадов в сторону понижения зимой.

Оценка соответствия пространственного распределения январского прироста снегозапасов и среднесезонных июньских значений NDVI показала, что наибольший прирост снегозапасов характерен для зоны лесов, положительные тренды их прироста отмечены также в основном на этих территориях (см. рис. 6, 7). Ситуация соответствует приведенному выше анализу пространственного распределения прироста снегозапасов января, а также характеру общеизвестной локальной неоднородности залегания снегозапасов при переходе от открытых к закрытым (залесенным) пространствам и обусловлена, по-видимому, различиями в шероховатости поверхности, влияющими на скорость прохождения воздушных масс, на скорость выпадения и объем осадков. На значительную снежность лесных территорий и ее многолетнее увеличение пока не оказывают влияния существенные (как следствие малого альбедо территории) положительные тренды температуры и наименьшие месячные перепады температуры в сторону понижения зимой (см. рис. 7). И, безусловно, на региональные особенности распределения снегозапасов существенное влияние оказывают также зональная специфика распределения осадков.

Регрессионная зависимость снегозапасов февраля от их прироста в предыдущие месяцы

Месяц	Коэффициент регрессии	Коэффициент детерминации (R^2)	Стандартное отклонение
Октябрь	-0,328	0,108	5,921
Ноябрь	0,083	0,007	7,061
Декабрь	0,154	0,024	10,794
Январь	0,420	0,276	7,206
Декабрь, январь	0,526	0,277	–

ВЫВОДЫ

В целом общий многолетний рост снеготазпасов Северной Евразии, происходящий на фоне повышения температур, определяется в настоящее время существенным приростом снега в январе при уменьшении, ввиду потепления, накопления снеготазпасов в осенние месяцы. Увеличение прироста снеготазпасов в январе происходит на фоне многолетнего уменьшения перепада температур воздуха в сторону понижения, что обеспечивает потепление зимнего периода. Снеготазпасы, тем не менее, продолжают увеличиваться из-за низких абсолютных температур зимнего периода.

Многолетняя тенденция увеличения снеготазпасов для Северной Евразии в целом определяется, прежде всего, увеличением прироста месячных снеготазпасов января на Восточно-Европейской равнине – за счет усиления циклоничности. На юге Сибири прирост снеготазпасов в январе меняется незначительно ввиду ослабления в этом регионе влияния Атлантики. Для севера Сибири характерно многолетнее уменьшение январского прироста снеготазпасов из-за уменьшения здесь перепада температур в сторону понижения. Эту ситуацию можно считать признаком непосредственного приближения предела снеготазпопления в этом регионе в январе.

Наибольшее увеличение снеготазпасов характерно для лесных пространств с индексом NDVI в диапазоне 0,4–0,8 мкм, именно эти территории обеспечивают общую для Северной Евразии многолетнюю тенденцию увеличения прироста снеготазпасов в январе. На территориях с значениями NDVI менее 0,4 мкм (в тундре и лесотундре) прирост снеготазпасов имеет тенденцию к снижению.

Литература

- Китаев Л.М.** Особенности экстремального снеготазпопления в горных и предгорных областях (на примере Большого Кавказа) // *Метеорология и гидрология*, 2003, № 7, с. 60–68.
- Китаев Л.М., Шерстюков Б.Г., Крюгер О., Хобе Х.** Особенности влияния изменчивости снежного покрова на динамику приземной температуры воздуха // *Материалы гляциол. исслед.*, 2004, вып. 97, с. 132–136.
- Кононова Н.К.** Изменение характера циркуляции атмосферы в последние десятилетия как фактор изменения климатических и ледовых условий Арктики // *Материалы гляциол. исслед.*, 2006, вып. 100, с. 191–199.
- Попова В.В.** Многолетняя изменчивость толщины снежного покрова и колебания речного стока в Северной Евразии // *Материалы гляциол. исслед.*, 2004, вып. 97, с. 109–116.
- Попова В.В., Шмакин А.Б.** Влияние Северо-Атлантического колебания на многолетний гидротермический режим Северной Евразии. Статистический анализ данных наблюдений // *Метеорология и гидрология*, 2003, № 5, с. 62–74.
- Титкова Т.Б., Кононова Н.К.** Связь аномалий накопления снега и общей циркуляции атмосферы // *Изв. РАН. Сер. геогр.*, 2006, № 1, с. 35–46.
- Huete A.R.** Environmental monitoring with remote sensing // *Environmental Monitoring and Characterization* / J. Artiola, I. Pepper, M. Brusseau (eds). N.Y., Acad. Press, 2004, chap. 11, p. 183–206.
- Kitaev L., Forland E., Razuvaev V. et al.** Distribution of snow cover over Northern Eurasia // *Nordic Hydrology*, 2005, vol. 36, No. 4–5, p. 311–319.
- Kitaev L., Kislov A., Krenke A. et al.** The snow cover characteristics of northern Eurasia and their relationship to climatic parameters // *Boreal Environ. Res.*, 2003, vol. 7, No. 4, p. 437–446.
- Leeuwen van W.J.D., Huete A.R., Laing T.W.** MODIS vegetation index compositing approach: A prototype with AVHRR data // *Remote Sens. Environ.*, 1999, No. 69, p. 264–280.
- Yoshioka H., Miura T., Huete A.R., Ganapol B.D.** Analysis of vegetation isolines in red-NIR reflectance space // *Remote Sens. Environ.*, 2000, No. 74, p. 313–326.
- Zhang X., Friedl M.A., Schaaf C.B. et al.** Monitoring vegetation phenology using MODIS // *Remote Sens. Environ.*, 2003, No. 84, p. 471–475.

*Поступила в редакцию
30 ноября 2006 г.*