

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.578.46(470.6)

ДИНАМИКА СНЕГОЗАПАСОВ В ГОРАХ И ПРЕДГОРЬЯХ
НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КОРДИЛЬЕР

Л.М. Китаев, Н.А. Володичева*

Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия, lkitaev@online.ru

** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,
119992, Москва, Ленинские горы, Россия*

Оценен характер пространственно-временных изменений снегозапасов и их месячных приростов в горных и предгорных территориях северной части Кордильер (в границах Канады) в связи с высотой местности и характером атмосферной циркуляции. Выявлены тенденции изменений экстремальных значений снегозапасов. Для иллюстрации региональных различий в снегонакоплении с учетом особенностей атмосферной циркуляции проведена сравнительная оценка изменчивости снегозапасов Кордильер, Большого Кавказа и Тянь-Шаня.

Снегозапасы и их месячные приросты, атмосферная циркуляция, пространственная изменчивость, тенденции многолетних изменений, экстремальные снегозапасы

CHANGES OF SNOW RESERVES IN MOUNTAINS AND FOOTHILLS
BY THE EXAMPLE OF NORTHERN PART OF CORDILLERAS

L.M. Kitaev, N.A. Volodicheva*

Institute of Geography RAS, 119017, Moscow, Staromonetny per., 29, Russia, lkitaev@online.ru

**Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, 119992, Moscow, Leninskye Gory, Russia*

Particularities of temporal and spatial changes of a snow reserves and their monthly increments over mountain and foothill areas of northern part of Cordilleras (in the Canadian frontiers) are estimated depending on the regional altitudes and the peculiarities of the atmospheric patterns. Tendencies of changes of extreme values of snow reserves are revealed. In order to illustrate the distinctions in snow accumulation due to the features of atmospheric patterns, the results are added with the comparative examination of variability of snow over Cordilleras, the Big Caucasus and Tien-Shan.

Snow reserves and its monthly increments, atmospheric patterns, spatial variability, tendencies of long-term changes, extreme snow reserves

ВВЕДЕНИЕ

Снежный покров, как важнейший элемент водного баланса и индикатор изменений климата, имеет в холодный период широкое распространение по поверхности суши, особенно в средних и высоких широтах северного полушария. Характер снегонакопления здесь ввиду неоднородности региональных условий существенно меняется – от арктических пустынь до равнин средних широт, от предгорий до вершин горных систем. В области снеговедения известны основополагающие работы А.И. Воейкова, Г.Д. Рихтера, Г.К. Тушинского, В.М. Котлякова, И.Д. Копанева, М.Ч. Залиханова и других. И до настоящего времени остается актуальной оценка особенностей снегонакопления горных территорий, прежде всего, в связи с особен-

ностями ороклиматических условий и, в частности, с высотно-широтной неоднородностью ландшафтов, что определяет здесь крайнюю неравномерность формирования снежного покрова и вместе с тем обуславливает трудоемкость и сложность как наземных, так и дистанционных исследований. Материалы, представленные в Атласе снежно-ледовых ресурсов мира [1997], иллюстрируют различия в состоянии снежного покрова разных регионов. Важной задачей является также сравнительная оценка изменчивости снежного покрова гор и предгорий для разных регионов, которая приводит к нахождению взаимосвязи климатических условий и снегонакопления и далее к уточнению региональных особенностей формирова-

ния речного стока, зависящего от распределения снегозапасов в горах и на прилегающих к ним равнинах.

Исследование является продолжением предыдущих работ авторов, в которых были уточнены особенности снегонакопления гор и предгорий – для Кавказа, Западного Тянь-Шаня, Хибинского горного массива [Китаев, 2003; Китаев и др., 2005, 2007]. В настоящей статье приведены результаты исследований изменчивости снежного покрова горной и предгорной территорий северной части Кордильер (в границах Канады) в условиях современного климата. Для этого оценивается влияние атмосферной циркуляции на снегонакопление северной части Северной Америки в сравнении с аналогичными процессами для крупных горных систем и равнин Северной Евразии.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исследуются горные области и прилегающие к ним равнины северо-запада Северной Америки – северная часть Кордильер в границах Канады. Территория ограничена 48 и 70° с.ш., побережьем Тихого океана на западе и 110–120° в.д. на востоке. В качестве исходной информации использованы данные наблюдений за снежным покровом Канадской метеорологической службы за 1956–2000 гг. и, в частности, данные по запасам воды в снежном покрове на конец месяца для ноября, декабря, января и февраля, а также по месячным приростам снегозапасов (как разность значений за последующий и предыдущий месяцы). Общее количество точек наблюдения для рассматриваемой территории составляет 790, из них 320 расположены на равнинных участках предгорий с высотой 500–1000 м, остальные 470 – в горах до высоты 2300 м.

Для анализа связи снегонакопления с атмосферной циркуляцией использованы среднемесячный индекс тихоокеанской–североамериканской циркуляции – PNA (Pacific–Northern American) и индекс западно-тихоокеанской циркуляции – WP (West Pacific) [Wallace, Gutzler, 1981; Mo, Livezey, 1986; Barnston, Livezey, 1987; Chen, Van den Dool, 2003]. Индекс PNA рассчитывается с учетом колебаний давления Алеутского минимума и Северо-Тихоокеанского (Гавайского) максимума. Расчет индекса WP производится с учетом аномалии давления с центром над Камчаткой и широкой аномалии давления между юго-восточной частью Азии и западом тропической части Тихого океана. Указанные проявления атмосферной циркуляции имеют место в исследуемом регионе в течение всего года и в положительной фазе индексов (прежде всего WP) характеризуются юго-западным и южным переносом воздушных осадкообразующих масс при понижении температуры.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СНЕГОЗАПАСОВ

Снегозапасы гор и предгорий. В исследуемом регионе снегозапасы увеличиваются с высотой – в январе от 60 см в предгорьях до 164 см в горной части (рис. 1), что характерно для горных систем в целом и по значениям соответствует, в частности, условиям Большого Кавказа в его центральной части. По данным А.В. Погорелова [2002], по долинам рек Закка и Хадисхеви максимальные толщины снежного покрова возрастают с 20–40 см в низовьях до 120–140 см на высотах более 2200 м, что соответствует изменчивости снегозапасов Кордильер.

Изменчивость снегозапасов Кордильер в их северной части имеет широтный характер. Небольшие снегозапасы в начале зимы незначительно увеличиваются как на высокогорьях, так и на равнинах с юга на север от 50 до 65° с.ш. (рис. 2): снегозапасы меняются с 31 до 36 мм в горах и с 22 до 27 мм в предгорьях. В январе и феврале скорость снегонакопления в южных частях региона возрастает и снегозапасы в направлении с юга на север уже уменьшаются, меняясь в феврале с 525 до 111 мм в горах и с 171 до 88 мм на равнине. Аналогично запасам воды в снеге изменяется и его высота, при этом плотность снежного покрова вполне закономерно имеет высокие значения в областях с большими снегозапасами и уменьшается в основном с юга на север (см. рис. 2). Кроме того, плотность снега, в соответствии с ростом его высоты, увеличивается также с высотой местности, что характерно для Большого Кавказа и Тянь-Шаня [Погорелов, 2002; Schröder, Severskiy, 2004; Severskiy, 2004].

Необычное увеличение снегозапасов с юга на север в действительности закономерно, так как связано с движением осадкообразующих масс воздуха с юга и юго-запада. Горы служат естественным препятствием на их пути, перехватывая основную часть осадков, в первую очередь на юге. Для сравнения отметим, что Большой Кавказ и Западный

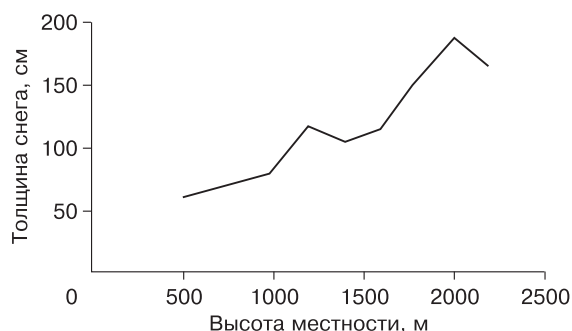


Рис. 1. Изменение толщины снега с высотой местности северной части Кордильер (средне-многолетнее за январь).

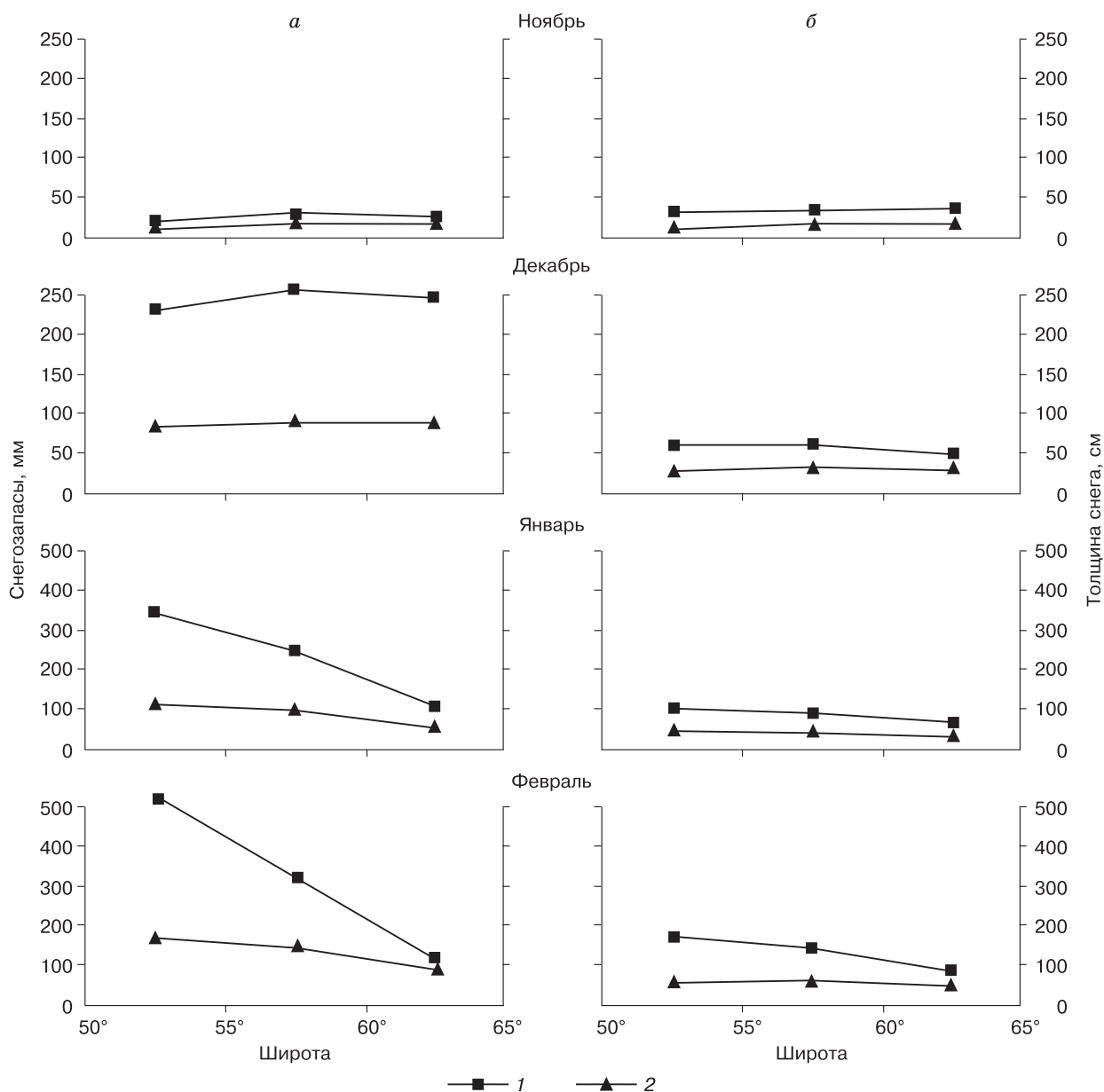


Рис. 2. Изменчивость с юга на север месячных значений запасов воды в снеге (1) и его высоты (2) в северной части Кордильер:

а – высокогорья, б – предгорья.

Тянь-Шань имеют наибольшие снегозапасы в своих западных частях и на южных склонах, а наибольшая снежность среди гор юга Сибири характерна для Алтая – в соответствии с траекторией атлантических циклонов [Нарожный, Никитин, 2001; Погорелов, 2002; Китаев, 2003; Китаев и др., 2005; Schröder, Severskiy, 2004].

Снегозапасы и атмосферная циркуляция.

Выявлена синхронность изменений индексов PNA и WP от месяца к месяцу с месячными значениями приростов снегозапасов (рис. 3, 4), поскольку

положительная фаза в изменениях осцилляций PNA и WP связана с увеличением осадков [Wallace, Gutzler, 1981; Mo, Livezey, 1986; Barnston, Livezey, 1987; Chen, Van den Dool, 2003]. Коэффициенты корреляции в целом значимы, но малы и не превышают 0,3, увеличиваясь в отдельных случаях до 0,4 и характеризуя, соответственно, синхронность изменений для 10–15 % выборки (рис. 5). Преобладание положительных и максимальных для региона значений коэффициентов корреляции характерно для декабря. В это время

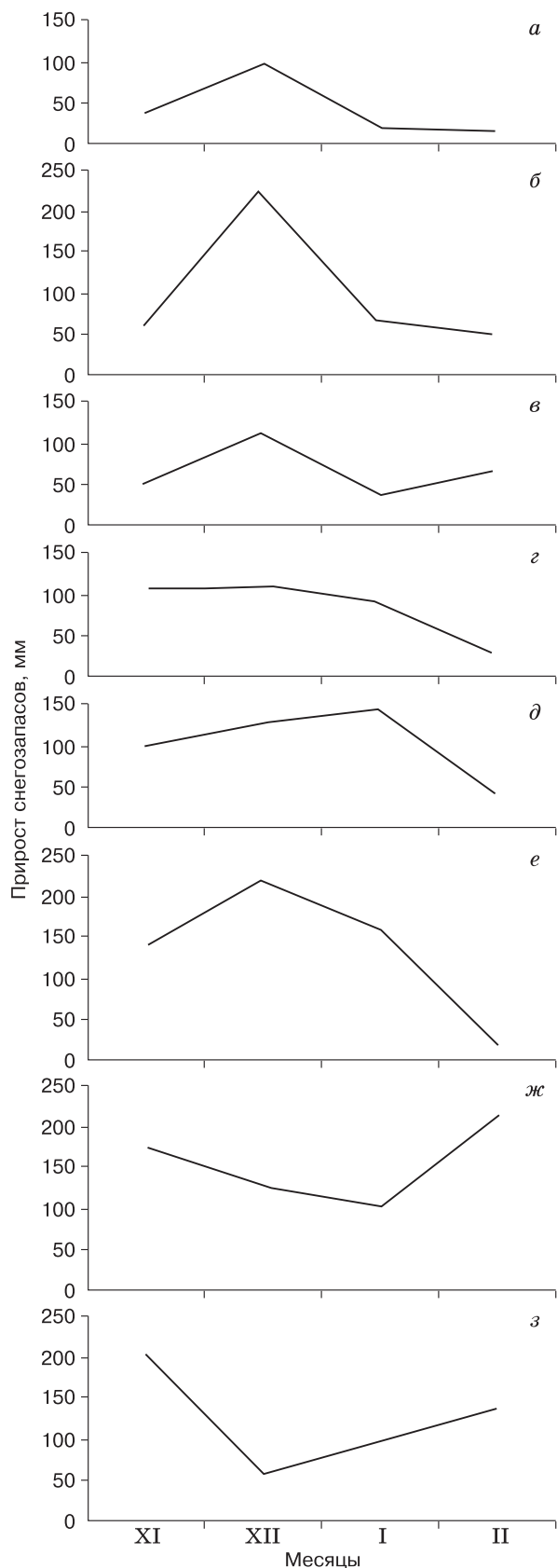


Рис. 3. Изменчивость среднемноголетних снегозапасов северной части Кордильер от ноября к февралю на разных высотах:

а – 500–1000 м, *б* – 1000–1200 м, *в* – 1200–1400 м, *г* – 1400–1600 м, *д* – 1600–1800 м, *е* – 1800–2000 м, *ж* – 2000–2200 м, *з* – 2200–2300 м.

приросты толщины снежного покрова максимальны в соответствии с наибольшим ростом индексов PNA, WP и с интенсивным привносом в регион осадкообразующих воздушных масс. В январе и особенно в феврале индексы PNA и WP снижаются, меняются условия атмосферной циркуляции, уменьшаются осадки. Активное снегонакопление к февралю прекращается, корреляция между изменениями снежного покрова и индексов атмосферной циркуляции становится мало значимой.

Выявленные закономерности хорошо согласуются с изменениями температуры воздуха и осадков. В качестве примера можно привести ход месячных значений температуры воздуха, осадков и толщины снега на метеостанциях Кенель (Quesnel, 53,01° с.ш., 122,5° з.д., 545 м над ур. моря) и Уильямс Лейк (Williams Lake, 52,1° с.ш., 122,0° з.д., 990 м над ур. моря) (<http://www.ncdc.noaa.gov>). Изменения месячных значений температуры

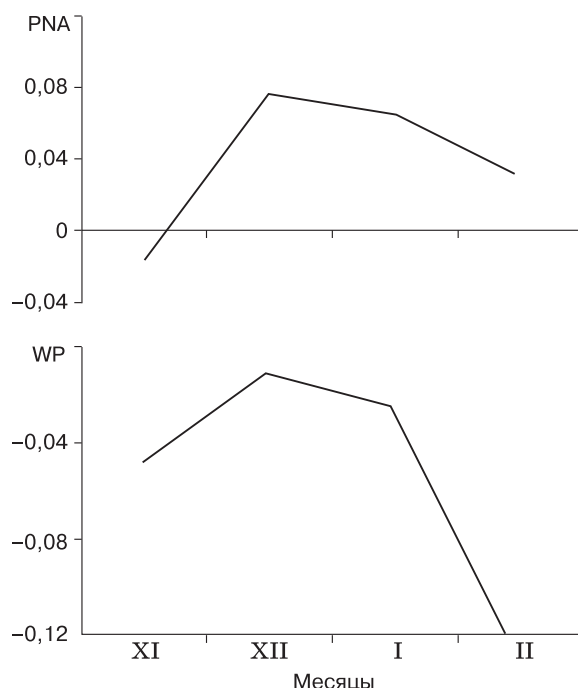


Рис. 4. Изменчивость среднемноголетних параметров атмосферной циркуляции от ноября к февралю:

PNA – индекс тихоокеанской–североамериканской циркуляции, WP – индекс западно-тихоокеанской циркуляции.

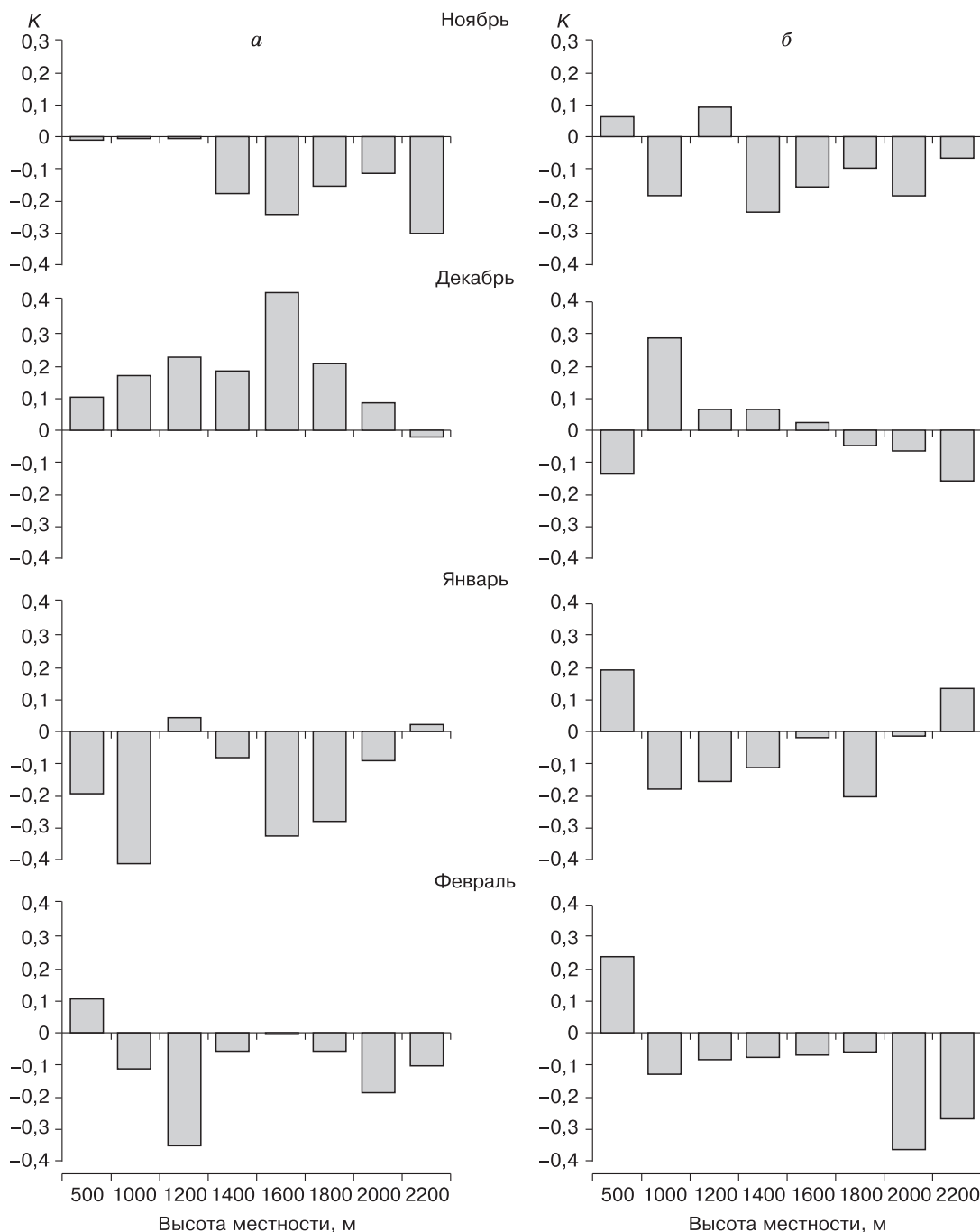


Рис. 5. Коэффициенты корреляции (K) изменчивости многолетних месячных снегозапасов (мм) северной части Кордильер с изменениями индексов PNA (a) и WP (b).

воздуха и осадков (рис. 6) согласуются с ходом индексов PNA и WP (см. рис. 4). Так, увеличение индексов от ноября к декабрю и их высокие значения в январе и феврале имеют следствием понижение температуры воздуха и интенсивное выпадение осадков и, соответственно, увеличение толщины снега. К февралю характер атмосферной

циркуляции меняется, индексы снижаются, что является причиной уменьшения осадков и повышения температуры воздуха и уменьшения снегозапасов. Следует отметить, что эти данные хорошо иллюстрируют разницу в количестве осадков и снегозапасов, связанную с различием высоты местности (см. рис. 6).

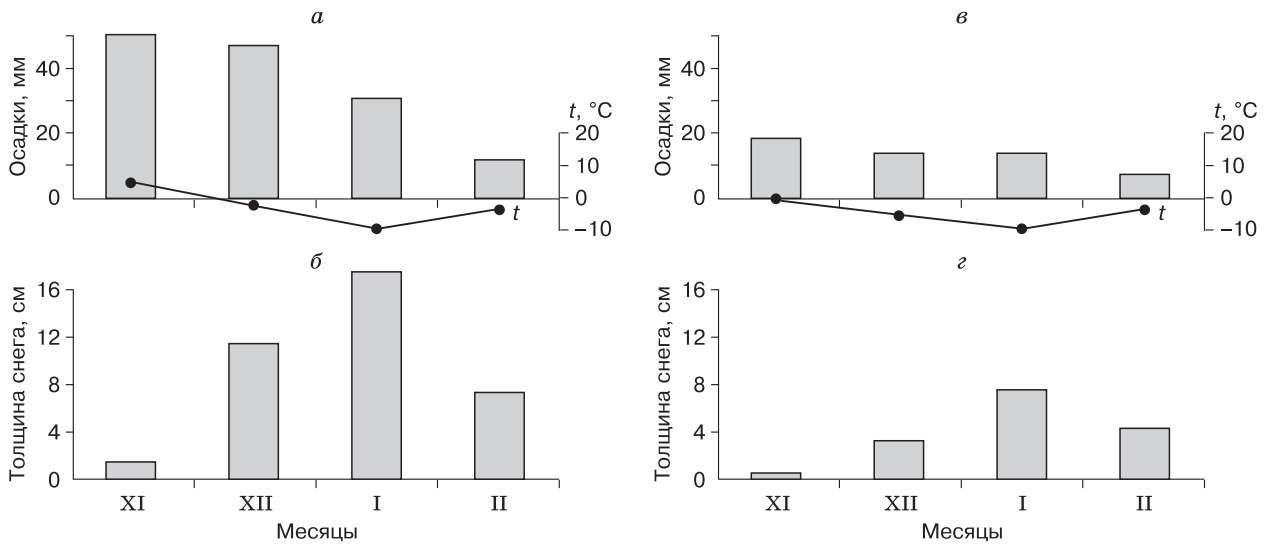


Рис. 6. Изменчивость температуры воздуха, осадков и толщины снега для метеостанций Уильямс Лейк (а, б) и Кенель (в, г).

Приведенные результаты отличаются от выводов, полученных ранее для севера Европы и северной части Восточно-Европейской равнины, где ход месячных приростов снеготолщин и ход изменений индексов североатлантической и арктической осцилляций (NAO и AO) находятся в противофазе [Kitaev et al., 2007]. Нет также совпадений в ходе снегонакопления и индекса NAO для Большого Кавказа и западных отрогов Тянь-Шаня. В целом для севера Евразии речь может идти, по-видимому, лишь о статистически значимой синхронности снегонакопления и изменений циркуляционных процессов, в отличие от их лучшего

совпадения на севере Кордильер вследствие более близкого расположения к центрам атмосферных возмущений. Хорошее согласие здесь изменений снеготолщин как с изменением атмосферной циркуляции, так и непосредственно с изменениями температуры воздуха и осадками (см. рис. 6) еще раз иллюстрирует общую схему взаимосвязи атмосферной циркуляции и снегонакопления.

Тенденции многолетней изменчивости. Особенность многолетних изменений снеготолщин региона заключается в устойчивом увеличении их месячных приростов на всех высотах в ноябре и декабре (прирост 0,345–9,751 мм/год). Приросты

Таблица 1. Линейные тренды месячных индексов атмосферной циркуляции и приростов снеготолщин

Высота местности, м	Характеристика	Параметры линейного тренда по месяцам							
		XI		XII		I		II	
		R^2	b	R^2	b	R^2	b	R^2	b
	PNA	0,293	-0,007	0,487	0,020	0,508	0,021	0,363	0,111
	WP	0,005	0,004	0,011	0,006	0,039	0,012	0,019	0,011
500	Прирост снеготолщин, мм/год	0,564	0,751	0,164	0,082	0,482	1,309	0,402	0,897
1000		0,528	0,727	0,574	5,859	0,597	-6,584	0,731	-3,365
1200		0,438	0,662	0,345	0,073	0,666	3,090	0,482	-2,821
1400		0,425	0,652	0,672	3,557	0,635	-4,000	0,485	-1,415
1600		0,456	0,675	0,788	5,082	0,285	-0,723	0,663	-3,473
1800		0,205	0,453	0,543	2,657	0,515	-3,774	0,649	3,807
2000		0,210	0,458	0,355	0,674	0,663	-4,743	0,539	2,627
2200	0,313	0,529	0,589	2,804	0,512	-3,080	0,619	0,987	

Примечание. PNA – индекс тихоокеанской–североамериканской циркуляции, WP – индекс западно-тихоокеанской циркуляции; R – коэффициент детерминации, b – коэффициент уравнения линейной регрессии $y = a + bx$. Курсивом выделены незначимые тренды.

снегозапасов в январе и феврале в целом имеют тенденцию к медленному снижению, в результате январские снегозапасы уменьшаются в предгорьях со скоростью $-0,635...-2,133$ мм/год. Но значительные осадки и, соответственно, снегонакопление в горах пока обеспечивают устойчивый многолетний рост снегозапасов со скоростью $0,514-4,358$ мм/год в горах (табл. 1). А поскольку приросты снегозапасов в начале зимы максимальные, можно предположить, что именно снегонакопление ноября и декабря обеспечивает общую положительную тенденцию снегозапасов.

Сходство линейных трендов приростов снегозапасов и проявлений атмосферной циркуляции (см. табл. 1) служит хорошей иллюстрацией их синхронности. Совпадение знаков и величин коэффициентов линейных трендов в основные месяцы снегонакопления (ноябрь–декабрь) говорит о зависимости многолетнего увеличения снегонакопления от многолетних тенденций в изменчивости атмосферной циркуляции. Разнонаправленные, но в основном отрицательные тренды индексов характерны для января и февраля – месяцев с минимальными приростами снегозапасов, многолетнее уменьшение которых связано с общим потеплением.

Описанная ситуация сходна с условиями Большого Кавказа и западных отрогов Тянь-Шаня, где линейные тренды снегонакопления и индексов североатлантической осцилляции значимы и положительны. Снегонакопление Северной Европы и северной части Западной Сибири имеет разнонаправленные с индексами североатлантической и арктической осцилляций тренды: здесь, по-видимому, сказываются более сложные процессы взаимодействия воздушных масс Атлантики и Арктики.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СНЕГОЗАПАСЫ

Экстремальным проявлением снежности считается количество случаев превышения величинами снегозапасов стандартного отклонения. В течение всего периода наблюдений количество таких случаев в северной части Кордильер достигает 23 % от общего (табл. 2). Рост количества экстремальных случаев с высотой и увеличение их числа от ноября к февралю, естественно, связано с ростом снегозапасов с высотой и от осенних месяцев к зимним.

Снегозапасы Большого Кавказа и Западного Тянь-Шаня, в отличие от снегозапасов исследуемого региона, превышают стандартное отклонение менее чем в 8 % случаев от общего количества при равных и даже больших снегозапасах здесь. Причиной этого также является разница в вариативности снегозапасов горных систем, зависящая,

Таблица 2. Превышение снегозапасами стандартного отклонения

Высота местности, м	Количество случаев за месяц, %			
	XI	XII	I	II
500	7	9	8	12
1000	7	10	10	18
1200	9	12	22	27
1400	3	12	15	15
1600	2	15	12	15
1800	2	14	22	22
2000	10	12	12	14
2200	10	17	15	24

по-видимому, от близости или удаленности региона от центров атмосферных возмущений.

Сколько-нибудь заметных тенденций в многолетних изменениях количества превышений снегозапасами величины стандартного отклонения не отмечено ни для Кордильер, ни для горных систем Евразии. Основные же изменения снегозапасов и в первую очередь их многолетний рост обусловлены частью выборки, значения которой не превышают стандартного отклонения. Данный региональный результат не соответствует выводам четвертого отчета IPCC (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm>) о нарастании экстремальности в ходе климатических процессов для конца XX–начала XXI в.

ВЫВОДЫ

Исследованы снегозапасы северной части Кордильер и их предгорий (в границах Канады). Снегозапасы в Кордильерах (см. рис. 1) имеют величины и характер изменений с высотой сходные со снегозапасами центральной части Большого Кавказа.

Снегозапасы региона уменьшаются с юга на север в многоснежные месяцы (см. рис. 2), что соответствует региональным циркуляционным процессам: преобладающие в зимнее время положительные индексы тихоокеанской–североамериканской осцилляции (PNA) и западно-тихоокеанской осцилляции (WP) обуславливают движение осадкообразующих воздушных масс с юга на север. Для сравнения отметим, что снегозапасы Кавказа и западных отрогов Западного Тянь-Шаня уменьшаются с запада на восток в соответствии с движением воздушных масс со стороны Атлантики.

Приросты снегозапасов на всех высотах достигают максимума в ноябре–декабре и снижаются в январе–феврале (см. рис. 3). Можно предположить, что именно снегонакопление ноября и

декабря обеспечивает здесь общий многолетний рост снегозапасов.

Выявлено хорошее совпадение изменений приростов снегозапасов и параметров атмосферной циркуляции от месяца к месяцу (см. рис. 3–5). Связь изменений атмосферной циркуляции и снегонакопления подтверждается их синхронностью с изменениями температуры воздуха и осадков, что рассмотрено на примере данных конкретных метеостанций (см. рис. 6).

В Евразии при небольших коэффициентах корреляции разного знака не наблюдается совпадений месячных приростов снегозапасов и индексов североатлантической и арктической осцилляций. Расположение северной части Кордильер вблизи центров атмосферных возмущений определяет существенную зависимость снегозапасов этой территории от соответствующих влагонесущих потоков воздушных масс.

Зависимость снегонакопления от атмосферной циркуляции проявляется также в хорошем совпадении тенденций многолетних изменений параметров: выявлено синхронное увеличение циклоничности и месячных приростов снегозапасов в период активного снегонакопления в северной части Кордильер (см. табл. 1), аналогично изменениям соответствующих параметров для арктических регионов Северной Евразии. Имеется достаточно большое число случаев превышения снегозапасами величины стандартного отклонения. Количество таких случаев растет с высотой и увеличивается от месяца к месяцу (см. табл. 2), существенно превышая количество аналогичных проявлений на Большом Кавказе и Западном Тянь-Шане. По-видимому, сказывается близость расположения северной части Кордильер к центрам атмосферной циркуляции Тихого океана. При этом сколько-нибудь заметных многолетних тенденций в проявлениях экстремальных значений снегонакопления не наблюдается ни в Кордильерах, ни в Северной Евразии.

Литература

Атлас снежно-ледовых ресурсов мира – World atlas of snow and ice resources. М., Ин-т географии РАН, 1997, 392 с.

Китаев Л.М. Экстремальные особенности и гидрологическая роль снегонакопления в горных и предгорных областях (на примере Большого Кавказа) // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 2, с. 77–83.

Китаев Л.М., Володичева Н.А., Олейников А.Д. Экстремальные особенности снегонакопления в горных и предгорных областях (на примере Западного Тянь-Шаня) // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 4, с. 82–86.

Китаев Л.М., Володичева Н.А., Олейников А.Д. Многолетняя динамика снежности на северо-западе Восточно-Европейской равнины // Материалы гляциол. исслед., 2007, вып. 102, с. 65–72.

Нарожный Ю.К., Никитин С.А. Современное оледенение Алтая на рубеже XXI в.; состояние изученности, ресурсная оценка и тенденции изменений // Материалы гляциол. исслед., 2001, вып. 90, с. 117–125.

Погорелов А.В. Снежный покров Большого Кавказа. Опыт пространственно-временного анализа. М., ИКЦ “Академкнига”, 2002, 287 с.

Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Monthly Weather Rev., 1987, No. 115, p. 1083–1126.

Chen W.Y., Van den Dool H. Sensitivity of Teleconnection Patterns to the Sign of Their Primary Action Center // Monthly Weather Rev., 2003, No. 131, p. 2885–2899.

Kitaev L., Cherenkova E., Titkova T. Tendencies of seasonal variations of snow cover storage in conditions of regional climate changes // Proc. of the Intern. Conf. “Cryogenic resources of Polar Regions”. 2007, vol. 1, p. 212–214.

Mo K.C., Livezey R.E. Tropical-extratropical geopotential height teleconnections during the Northern Hemisphere winter // Monthly Weather Rev., 1986, No. 114, p. 2488–2515.

Schröder H., Severskiy I. Water resources in the basin of the Ili river (Republic of Kazakhstan). Berlin, Mensch and Bush Verlag, 2004, 310 p.

Severskiy I.V. Water-related problem of Central Asia: Some results of the GIWA Assessment Program AMBIO // J. Human Environ., 2004, vol. XXXIII, No. 1–2, p. 52–62.

Wallace J.M., Gutzler D.S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter // Monthly Weather Rev., 1981, No. 109, p. 784–812.

Поступила в редакцию
28 февраля 2008 г.