Связь изменчивости площади морского льда Арктики и метеорологических характеристик зимнего периода на севере Евразии

Л.М. Китаев, Т.Б. Титкова

Институт географии РАН, Москва, Россия E-mail: lkitaev@mail.ru

Оценены тенденции многолетних изменений приземной температуры воздуха, осадков и снегонакопления на севере Евразии, площади морских льдов соответствующего сектора Арктики и индексов Арктической осцилляции за период 1979–2009 гг. Для крупных физико-географических регионов выявлена значимая регрессионная связь межгодовой изменчивости метеорологического режима с изменениями площади морских льдов (связь отрицательна) и индексов Арктической осцилляции (связь положительна). В Западной и Центральной Сибири межгодовая динамика метеорологических характеристик в большей степени синхронна с изменчивостью индекса Арктической осцилляции; в секторах Восточно-Европейской раввины и Северо-Восточной Сибири преобладает связь изменений метеорологических характеристик и площади морского льда. Связи изменений снегозапасов, приземной температуры воздуха и осадков повсеместно не значимы, так же как не значима связь многолетней изменчивости индексов Арктической осцилляции и площади морских льдов.

Ключевые слова: атмосферная циркуляция, множественная регрессия, осадки, площадь морских льдов, приземная температура воздуха, снегозапасы.

Введение

Существенное потепление, наблюдаемое в последние десятилетия, является и причиной, и следствием изменений различных природных процессов. Так, изменения атмосферной циркуляции приводят к изменчивости метеорологических характеристик, индикатором и следствием чего являются изменения в состоянии снежного покрова и водного баланса. Следствием климатических изменений в высоких широтах является также динамика площади морских льдов. В частности, заметным на сегодня явлением признана тенденция уменьшения площади морского льда в Арктическом регионе, начавшаяся, по данным (Lemke et al., 2007), в конце 70-х годов прошлого века. Соответствующие результаты исследований отражены в частности в публикациях (Алексеев и др., 1979; Бобылев и др., 2008; Шалина и др., 2008; Сотіsо et al., 2006, 2012; Spreen et al., 2008; Stroeve et al., 2007, 2008, 2011).

Изменчивость площади морского льда в целом, и в Арктике в частности, в значительной мере связана с изменениями атмосферной циркуляции; причем выявлены как прямые, так и обратные связи. Изменения площади морских льдов определяют региональный ход альбедо, что не может не влиять на ход атмосферных процессов и изменчивость метеорологических характеристик. По данным (Serreze et al., 2007; Maslanik et al., 2007; Deser et al., 2000, 2007) потепление в Евразийском секторе Арктики и, как следствие, сокращение площади морского льда связаны с положительной фазой Арктической осцилляции. С другой стороны, по мнению (Petoukhov et al., 2010; Cohen et al., 2012) интенсивное уменьшение площади морских льдов приводит к активизации антициклонов над морской поверхностью Баренцева и Карского морей, что обеспечивает дополнительный перенос холодных масс воздуха в Европу

и, соответственно, усиление здесь суровости зим. К противоположным выводам пришли (Wu et al., 1999; Deser et al., 2000): чувствительность атмосферной циркуляции к изменениям морских льдов проявляется, в частности, в увеличении частоты появления мощных циклональных вихрей в западной части Евразийского сектора Арктики. В работах (Royer et al., 1990; Raymo et al., 1990; Alexander et al., 2004; Wang et al., 1997) показано наличие значимых связей между динамикой площади морских льдов Евразийского сектора и непосредственно метеорологическими характеристиками средних и высоких широт. Выявлены также случаи синхронной межгодовой и многолетней изменчивости площади морского льда, температуры воздуха и осадков как следствие изменений атмосферной циркуляции.

Приведенные выше оценки значимости динамики морских льдов в климатической системе получены на основе анализа крупномасштабных климатических явлений и путем модельных расчетов. Основной задачей наших исследований является детализация и уточнение характера региональных связей межгодовой и многолетней изменчивости метеорологических характеристик севера Евразии и динамики площади морских льдов Арктики в характерных условиях атмосферной циркуляции региона — на основе статистического анализа данных спутниковых и приземных наблюдений. При этом рассматривается зимний период, поскольку анализ изменчивости, в том числе снежного покрова, может служить вкладом в изучение характера водного баланса северных территорий Евразии.

Исходные материалы и методика исследований

Особенности изменений метеорологических характеристик — снегозапасов (маршрутные снегомерные съемки), приземной температуры воздуха и осадков (суточные значения) — исследованы на основе данных наблюдений 37 метеорологических станций, расположенных на севере Евразии севернее 60° с. ш. (рис. 1). Выбор данной территории в качестве исследуемого региона обусловлен значительными здесь снегозапасами и речным стоком в Северный Ледовитый океан, что позволяет в перспективе уточнять оценки вклада особенностей климата и снеготаяния в региональный гидрологический режим. Анализ проводился для крупных физико-географических регионов севера Евразии: Восточно-Европейской равнины, Западной Сибири, Средней Сибири и Северо-Восточной Сибири.

Для исследования изменений площади арктических морских льдов использованы спутниковые данные о сплоченности морского льда Nimbus-7 SMMR и DMSP SSM/I-SSMIS для регулярной сетки 25 × 25 км (http://www.nsidc.org/data/nsidc-0051.html). Эти данные соответствуют определению «сплоченность морского льда» (Международная символика...., 1984), которая для каждой ячейки выражается отношением в долях единицы поверхности, покрытой льдом, к ее площади. В ходе анализа для проведения статистических оценок сплоченность морских льдов в долях единицы пересчитывалась в площадь морского льда в квадратных километрах для секторов, соответствующих исследуемым физико-географическим регионам: сектор Восточно-Европейской равнины 20° в. д. – 60° в. д., сектор Западной Сибири 61° в. д. – 90° в. д., сектор Средней Сибири 91° в. д. – 120° в. д., сектор Северо-Восточной Сибири 121° в. д. – 170° з. д.

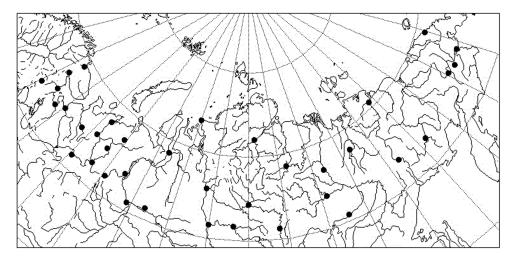


Рис. 1. Расположение метеорологических станций, данные которых использованы в анализе

Особенности переноса воздушных масс, сформировавшихся над Арктикой, не может не сказываться на региональных климатических условиях севера Евразии (Deser et al., 2007; Wan et al., 1997), в связи с чем анализировались многолетние данные NOAA по индексу Арктической осцилляции (Arctic Oscillation) – далее AO (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml).

Поскольку дистанционные измерения сплоченности морского льда были начаты в 1979 г., нами рассмотрен период в тридцать лет, с 1979 по 2009 гг. Все исследуемые характеристики обрабатывались для периода снегонакопления — с месячным шагом, с ноября по март включительно. Суточные величины приземной температура воздуха для каждой станции пересчитывались в средние значения с начала ноября по конец каждого из означенных месяцев, а затем соответствующие данные всех станций усреднялись по каждому месяцу для конкретной территории в целом. Осадки пересчитывались аналогично — в виде суммы. Для снегозапасов по каждой станции взяты данные маршрутных снегосъемок на конец каждого месяца как интегральные значения с начала снежного периода на соответствующую дату — с последующим помесячным усреднением данных станций для исследуемых регионов. Индексы АО и площадь морского льда в соответствии с исходными данными представлены в виде среднемесячных величин.

Изменчивость метеорологических характеристик, атмосферной циркуляции и площади морского льда

В *табл.* 1 для каждого из месяцев периода снегонакопления (ноябрь – март) представлены средние многолетние значения приземной температуры, осадков (среднее и сумма с ноября по конец каждого месяца), снегозапасов (на конец каждого месяца) и площади морского льда (среднемесячные значения). Тенденции многолетних изменений исследуемых характеристик иллюстрируются в таблице коэффициентами линейных трендов; незначимые на уровне 5% величины коэффициента выделены курсивом; кроме того, многолетний ход характеристик отображен на *рис.* 2–4 – для февраля.

Таблица 1. Изменчивость приземной температуры воздуха, осадков, снегозапасов севера Евразии и площади арктических морских льдов

Месяц	Температура воздуха		Осадки		Снегозапасы		Площадь морского льда	
	среднее, °С	тренд, °С/год	среднее, мм	тренд, мм/год	среднее, мм	тренд, мм/год	среднее, млн. км²	тренд, млн. км²/год
			Восточн	о-Европейс	ская равнина			
Ноябрь	-8,9	0,03	33	-0,07	40	-0,06	0,618	-0,006
Декабрь	-23,1	0,18	64	-0,04	75	0,01	0,771	-0,011
Январь	-12,9	0,11	93	-0,01	93	-0,03	0,899	-0,012
Февраль	-13,6	0,11	116	0,10	125	0,83	0,967	-0,011
Март	-11,5	0,03	139	-0,03	134	0,35	1,280	-0,001
			3	ападная Си	бирь			
Ноябрь	-17,0	-0,04	30	0,03	44	-0,50	0,845	-0,003
Декабрь	-39,6	-0,06	61	0,08	78	-0,40	0,924	-0,003
Январь	-21,3	0,00	88	0,03	88	-0,16	0,958	-0,002
Февраль	-22,1	0,03	108	0,31	159	-1,34	0,965	-0,002
Март	-18,7	-0,00	131	0,39	149	-1,33	0,842	-0,003
			C	Средняя Си	бирь			-
Ноябрь	-24,6	-0,02	20	0,07	42	-0,80	0,575	0,000
Декабрь	-55,5	0,05	58	0,07	75	-0,74	0,582	0,000
Январь	-29,4	0,06	111	0,14	93	-0,08	0,586	0,000
Февраль	-29,8	0,07	176	0,34	116	-0,01	0,586	0,000
Март	-24,7	-0,00	257	0,36	121	-1,44	0,561	-0,001
		•	Север	о-Восточна	я Сибирь			1
Ноябрь	-23,9	0,08	20	0,03	33	0,22	2,454	-0,016
Декабрь	-54,5	0,09	55	-0,12	69	1,33	2,601	0,012
Январь	-29,3	0,02	103	-0,47	48	0,35	2,620	0,043
Февраль	-29,6	0,02	162	-0,76	78	0,83	2,620	0,045
Март	-24,9	0,04	232	-0,99	82	0,54	2,459	-0,032

Среднемноголетняя приземная температура воздуха во всех регионах минимальна в феврале (-24–30°С), снегозапасы к марту растут до 82–143 мм в соответствии с увеличением к марту суммы осадков до 71–139 мм. Для исследуемых широт характерно отсутствие значимых многолетних тенденций в изменениях приземной температуры воздуха и осадков. Соответственно, незначима и многолетняя изменчивость снегозапасов, за исключением небольшого значимого снижения их в феврале и марте в Средней Сибири и увеличении в марте в Северо-Восточной Сибири. Площадь морского льда повсеместно увеличивается от ноября к марту. В секторах Восточно-Европейской равнины и Западной Сибири происходит интенсивное убывание морских льдов, в секторах Средней Сибири и Северо-Восточной Сибири значимых изменений нет (*табл. 1, рис. 2–4*).

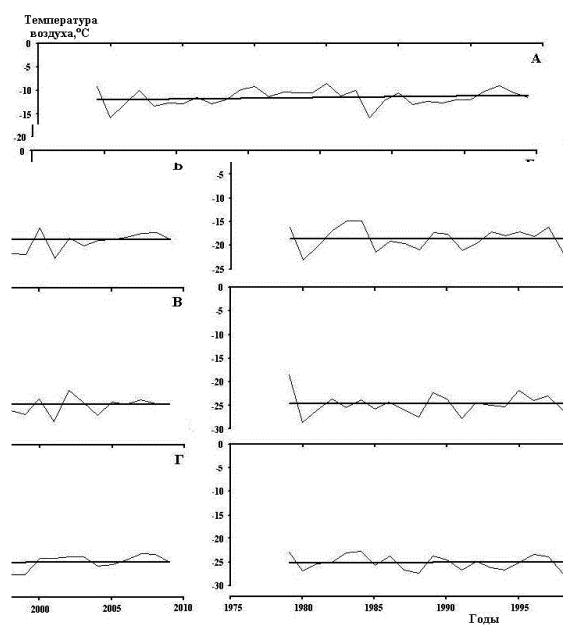


Рис. 2. Многолетний ход и тренд изменчивости приземной температуры воздуха (°С) — среднее с ноября по март включительно для Восточно-Европейской равнины (А), Западной Сибири (Б), Средней Сибири (В) и Северо-Восточной Сибири (Г) севернее 65° в. д.

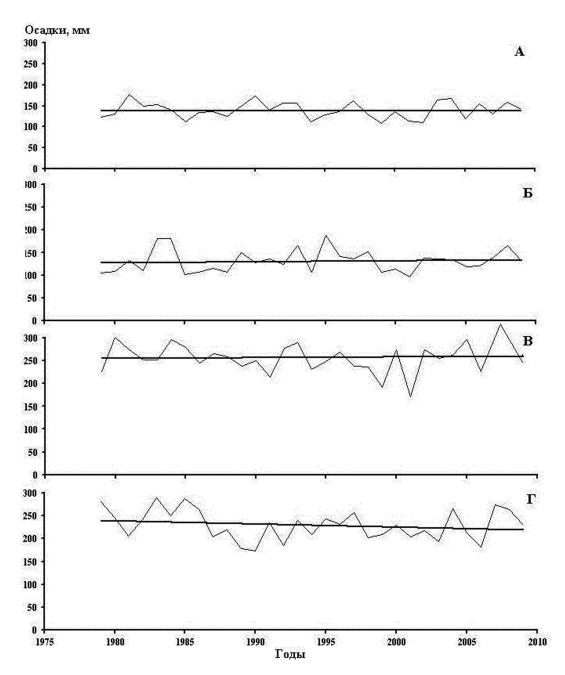


Рис. 3. Многолетний ход и тренд изменчивости осадков (мм) — сумма с ноября по март включительно для Восточно-Европейской равнины (А), Западной Сибири (Б), Средней Сибири (В) и Северо-Восточной Сибири (Г) севернее 65° в. д.

Для анализа индексов AO их величины осреднялись на конец каждого исследуемого месяца начиная с ноября. Среднемноголетние их величины снижаются с ноября по март от 0.038 до -0.003, коэффициенты линейных трендов незначимы.

Незначительная региональная изменчивость приземной температуры воздуха, осадков и снегозапасов в 1979–2009 гг. соответствует тенденциям изменчивости климата на севере Евразии (Китаев и др., 2004; Кренке и др., 2008; Попова, Шмакин, 2000; Булыгина и др., 2007; Assessment report..., 2008). Данные об уменьшении общей площади арктических льдов приводятся рядом авторов (Алексеев и др., 1979; Бобылев и др., 2008; Шалин и др. 2008; Comiso et al., 2008, 2012; Stroeve et al., 2007, 2008, 2011).

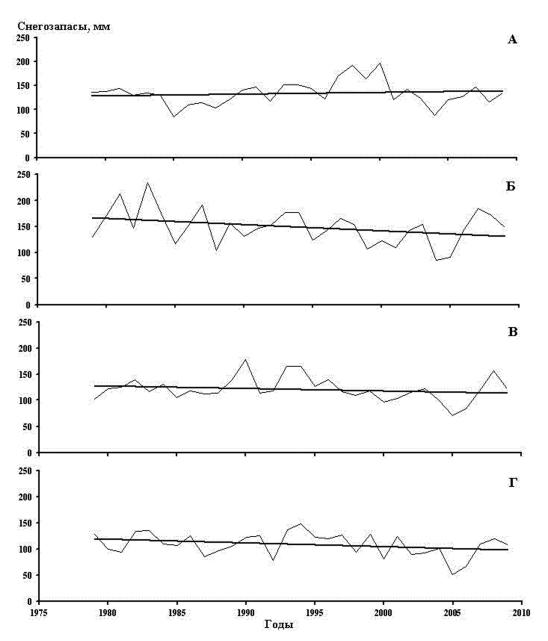


Рис. 4. Многолетний ход и тренд изменчивости снегозапасов (мм) — на конец марта для Восточно-Европейской равнины (А), Западной Сибири (Б), Средней Сибири (В) и Северо-Восточной Сибири (Г) севернее 65° в.д.

Регрессионные связи изменчивости метеорологических характеристик, атмосферной циркуляции и площади морского льда

В *табл. 2а, 26* и *2в* помещены данные о регрессионной зависимости межгодовой изменчивости исследуемых характеристик для периода с ноября по март. Приведены общие коэффициенты множественной линейной зависимости (регрессии), описываемой уравнением

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2,$$

где в качестве зависимых переменных y выступают средние многолетние величины приземной температура воздуха (maбл. 2a), осадков (maбл. 2b) и снегозапасов (maбл. 2b), независимыми переменными являются площадь морского льда (x_1) и значения индексов

AO (x_2) с частными коэффициентами регрессии (b_1) и (b_2) . Незначимые на уровне 5% значимости величины бета коэффициентов выделены курсивом.

Величины общих коэффициентов множественной регрессии для приземной температуры воздуха наиболее значимы в сравнении с осадками и снегозапасами, будучи расположены в диапазоне 0,3–0,7; исключением является исследуемая территория Северо-Восточной Сибири, где общий коэффициент регрессии не превышает 0,2 (*табл. 2a*).

Частные коэффициенты регрессии значимы, будучи отрицательными для площади морского льда и положительными для индексов АО. Исходя из соотношения величин частных коэффициентов регрессии, в центральной части севера Евразии межгодовая изменчивость температуры воздуха в большей степени зависит от изменений атмосферной циркуляции в секторах Западной и Центральной Сибири и, с обратным знаком, от изменчивости площади морского льда в секторах Восточно-Европейской равнины и Северо-Восточной Сибири.

Таблица 2а. Коэффициенты уравнений множественной регрессионной зависимости приземной температуры воздуха от площади морского льда и индексов АО

	06 11	Регрессионные бета коэффициенты		
Месяц	Общий коэффициент линейной регрессии	площади морского льда, млн. км²	индекса АО	
	Восточно	-Европейская равнина		
Ноябрь	0,415	-0,409	0,122	
Декабрь	0,443	-0,441	0,141	
Январь	0,580	-0,481	0,213	
Февраль	0,702	-0,608	0,210	
Март	0,643	-0,301	0,486	
	Запад	цная Сибирь		
Ноябрь	0,651	-0,593	0,371	
Декабрь	0,295	-0,277	0,385	
Январь	0,485	-0,275	0,402	
Февраль	0,477	-0,220	0,325	
Март	0,515	-0,268	0,349	
	Сред	няя Сибирь		
Ноябрь	0,526	-0,402	0,387	
Декабрь	0,425	-0,396	0,415	
Январь	0,432	-0,291	0,431	
Февраль	0,437	-0,178	0,385	
Март	0,416	-0,137	0,362	
	Северо-Во	осточная Сибирь		
Ноябрь	0,138	-0,366	-0,079	
Декабрь	0,121	-0,653	-0,107	
Январь	0,114	-0,440	-0,023	
Февраль	0,110	-0,441	-0,047	
Март	0,160	-0,493	-0,031	

Примечание. В табл. 2а курсивом выделены незначимые коэффициенты – по F и t критериям.

Величины общих коэффициентов множественной регрессии для осадков располагаются в диапазоне 0,1–0,6, наименьшие регрессионные связи характерны для сектора Восточно-Европейской равнины (*табл. 26*). Частные коэффициенты регрессии в целом значимы, за исключением отдельных месяцев в секторах Восточно-Европейской равнины и Средней Сибири; они отрицательны для площади морского льда и положительны для индексов АО. Так же, как в случае с приземной температурой воздуха, многолетний ход осадков в большей мере зависит от хода атмосферной циркуляции в центральных секторах севера Евразии.

Таблица 2б. Коэффициенты уравнений множественной регрессионной зависимости осадков от площади морского льда и индексов АО

	06 11	Регрессионные бета коэффициенты		
Месяц	Общий коэффициент линейной регрессии	площади морского льда, млн. км²	индекса АО	
	Восточно-Ев	вропейская равнина		
Ноябрь	0,092	0,071	-0,065	
Декабрь	0,081	0,041	-0,069	
Январь	0,128	-0,111	0,041	
Февраль	0,197	-0,171	0,058	
Март	0,248	-0,028	0,238	
	Запад	цная Сибирь		
Ноябрь	0,362	-0,156	0,351	
Декабрь	0,409	-0,136	0,414	
Январь	0,543	-0,121	0,542	
Февраль	0,302	-0,196	0,211	
Март	0,415	-0,089	0,372	
	Сред	няя Сибирь		
Ноябрь	0,398	-0,265	0,295	
Декабрь	0,423	-0,135	0,326	
Январь	0,485	-0,188	0,461	
Февраль	0,241	-0,063	0,232	
Март	0,394	-0,097	0,162	
	Северо-Во	осточная Сибирь		
Ноябрь	0,178	-0,134	0,133	
Декабрь	0,508	-0,488	0,276	
Январь	0,588	-0,599	0,238	
Февраль	0,258	-0,184	-0,156	
Март	0,317	-0,274	-0,276	

Примечание. В табл. 26 курсивом выделены незначимые коэффициенты – по F и t критериям.

Величины общих коэффициентов множественной регрессии для снегозапасов значимы и лежат в диапазоне 0,2–0,6, их наибольшие значения характерны для секторов Западной и Центральной Сибири (*табл. 2в*) – наиболее холодные условия зимы здесь, по-видимому, создают наиболее благоприятные условия для накопления и сохранения снегозапасов. Частные коэффициенты регрессии повсеместно положительны для индекса АО, для площади морских льдов положительны в секторе Восточно-Европейской раввины и различны по знаку в остальных секторах севера Евразии – влияние их изменчивости на формирование снегозапасов является, по-видимому, нестабильным. Межгодовая изменчивость индексов АО, как и в случаях с приземной температурой воздуха и осадками, является, по-видимому, определяющей для снежного покрова во всех исследуемых секторах Арктики – возможно определяя в первую очередь особенности хода температуры воздуха и осадков.

Таблица 2в. Коэффициенты уравнений множественной регрессионной зависимости снегозапасов от площади морского льда и индексов АО

	06	Регрессионные бета коэффициенты		
Месяц	Общий коэффициент линейной регрессии	площади морского льда, млн. км²	индекса АО	
	Восточно-Е	вропейская равнина		
Ноябрь	0,367	0,089	0,347	
Декабрь	0,105	0,122	0,113	
Январь	0,355	0,201	0,245	
Февраль	0,349	0,209	0,351	
Март	0,509	0,439	0,419	
	Запад	дная Сибирь		
Ноябрь	0,423	-0,087	0,427	
Декабрь	0,485	-0,107	0,651	
Январь	0,543	-0,172	0,498	
Февраль	0,541	0,397	0,408	
Март	0,176	0,113	0,174	
	Сред	няя Сибирь		
Ноябрь	0,218	-0,002	0,208	
Декабрь	0,325	-0,118	0,257	
Январь	0,514	-0,188	0,488	
Февраль	0,563	0,512	0,244	
Март	0,513	0,209	0,529	
	Северо-В	осточная Сибирь		
Ноябрь	0,183	-0,183	0,005	
Декабрь	0,376	-0,345	0,174	
Январь	0,617	-0,627	0,258	
Февраль	0,244	0,439	-0,234	
Март	0,065	0,370	-0,146	

Примечание. В табл. 2в курсивом выделены незначимые коэффициенты – по F и t критериям.

Для выявления возможно более тесных связей межгодовой изменчивости снегозапасов с изменениями непосредственно приземной температуры воздуха и осадков были
рассчитаны соответствующие коэффициенты общей регрессии, не превысившие в данном
случае 0,3. Значения частных коэффициентов регрессии в большинстве случаев не значимы, но по соотношению величин указывают на более существенную связь снегонакопления с межгодовой изменчивостью приземной температуры воздуха — с обратным знаком,
что не противоречит закономерностям снегонакопления: чем холоднее зимний период,
тем больше вероятность сохранности накопленных снегозапасов.

В ходе анализа была предпринята попытка оценки пространственного распределения тесноты связей изменчивости исследуемых характеристик. Для этого временные ряды средних многолетних величин приземной температуры воздуха, осадков и снегозапасов коррелировались с временными рядами индекса AO и площади морского льда для последующей интерполяции полученных коэффициентов корреляции в узлы регулярной сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ и построения соответствующих карт. Значимость полученных коэффициентов не превышала уровня двух сигм, в связи с чем построение карт для пространственной оценки связей изменчивости исследуемых характеристик было признано нецелесообразным.

Выводы

Для крупных регионов Евразии (севернее 60° с. ш.) на период 1979–2009 гг. определены тенденции многолетних изменений метеорологических характеристик холодного периода: отсутствие заметных в многолетнем аспекте изменений приземной температуры воздуха, осадков, снегозапасов, индексов Арктической осцилляции при существенном многолетнем уменьшении площади морских льдов.

Попытка оценки пространственного распределения тесноты связей изменчивости исследуемых характеристик успехом не увенчалась: значимость коэффициентов корреляции не превысила уровня двух сигм. Значимой зависимости изменчивости снегозапасов от изменений непосредственно приземной температуры воздуха и осадков также не обнаружено: общие коэффициенты регрессии малы. При этом, в соответствии с величинами частных коэффициентов регрессии, ведущим фактором тенденций снегонакопления можно считать приземную температуру воздуха. Не выявлено значимой зависимости и между многолетними изменениями индексов АО и площади морских льдов.

Оценен вклад межгодовой изменчивости индекса АО и площади морских льдов в межгодовые изменения приземной температуры воздуха, осадков и снегозапасов. Коэффициенты общей регрессии зимних месяцев находятся в диапазоне 0,3–0,7 для приземной температуры воздуха, 0,1–0,6 для осадков, 0,2–0,6 для снегозапасов. Регрессионный анализ для приземной температуры воздуха и осадков показал, что частные регрессионные коэффициенты в основном значимы, положительны для индексов Арктической осцилляции и отрицательны для площади морских льдов. Можно предположить, что уменьшение площади льда (через уменьшение альбедо) и увеличение индексов (преобладание западного переноса

воздушных масс) может обеспечивать региональный рост температуры воздуха и увеличению осадков – и наоборот. Данный вывод соответствует результатам исследований, показавшим преобладающий вклад атмосферной циркуляции в ход метеорологических процессов Евразийского сектора Арктики (Wu et al., 1999; Deser et al., 2000; Royer et al., 1990; Raymo et al., 1990; Alexander et al., 2004; Wang et al., 1997 и др.) и вместе с тем находится в противоречии с выводами (Petoukhov et al., 2010; Cohen et al., 2012) о связи уменьшения площади морских арктических льдов и похолоданием в Европе. Возможно в последнем случаях речь может идти об участившихся в последние годы случаях ярких проявлений меридиональной циркуляции.

Относительно межгодовой изменчивости снегозапасов, частные коэффициенты регрессии повсеместно положительны для индекса АО; для площади морских льдов положительны в секторе Восточно-Европейской раввины и различны по знаку в остальных секторах севера Евразии, т.е., по-видимому, влияние изменений площади морского льда на изменчивость снегонакопления не является систематическим. Положительный вклад колебаний индекса NAO в межгодовые изменения снегонакопления в данном случае можно считать опосредованным — через вклад в изменчивость осадков.

В соответствии с соотношением величин частных коэффициентов регрессии изменения индексов АО более значимы для изменения метеорологических параметров в секторах Западной и Восточной Сибири, площадь морского льда — в секторах Восточно-Европейской равнины и Северо-Восточной Сибири. Можно предположить, что в более теплых условиях крайних западных и крайних восточных областей севера Евразии температура прилегающей морской поверхности и испарение с нее больше, чем в центральных секторах севера континента, и тогда динамика морских льдов может в большей степени оказывать влияние на метеорологический режим Восточно-Европейской равнины и Северо-Восточной Сибири.

Литература

- 1. *Алексеев Г.В., Данилов А.И., Катцов В.М., Кузьмина С.И., Иванов Н.Е.* Изменение площади морских льдов Северного полушария в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // Известия АН, ФАО. 2009. Т. 45. № 6. С. 723–735.
- 2. Бобылев Л.П., Шалина Е.В., Йоханнессен О.М., Заболоцких Е.В., Сандвен С., Бабина О.И. Изменение арктического ледяного покрова по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1(78). С. 38–47.
- 3. *Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н.* Изменения характеристик снежного покрова на территории России в последние десятилетия // Анализ изменений климата и их последствия. Труды Российского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации мировой центр данных. 2007. Вып. 173. С. 54–62.
- 4. *Китаев Л.М., Радионов В.Ф., Форланд Э., Разуваев В.Н., Мартуганов Р.А.* Продолжительность залегания устойчивого снежного покрова на севере Евразии в условиях современных изменений климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 11. С. 65–73.

- 5. *Крынке А.Н., Китаев Л.М.*. *Попова В.В., Сосновский А.В., Турков Д.В., Шмакин А.Б.* Изменения аномалий снежного покрова и их возможные последствия // Изменения окружающей среды и климата. Природные и связаннее с ними техногенные катастрофы. М.: Наука, 2008. С. 30–58.
- 6. *Попова В.В., Шмакин А.Б.* Влияние Северо-Атлантического колебания на многолетний гидротермический режим Северной Евразии. Статистический анализ данных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2006. № 5. С. 62–74.
- 7. *Шалина Е.В., Йоханнессен О.М., Бобылев Л.П.* Изменение арктического ледяного покрова по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования с 1978 по 2007 год // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ, 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 228–233.
- 8. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов. Л.: Гидрометеоиздат. 1984. 56 с.
- 9. Alexande M.A., Bhat U.S., Wals J.E., Timli M.S., Mille J.S., Scott J.D. The atmospheric response to realistic Arctic sea ice anomalies in an AGCM during winter // Journal of Climate. 2004. V. 17. P. 890–904.
- 10. *Comiso J.C.* Abrupt decline in the Arctic winter sea ice cover // Geophysical Research Letters. 2006. V.33. doi:10.1029/2006GL027341.
- 11. *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.. IOP publishing. 2012. 7 014007 (8 p.).
- 12. Comiso J.C., Parkinson C.L., Gersten R., Stock L. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // GRL. 2008. V. 35. L01703. doi:10.1029/2007GL031972.
- 13. *Comiso J.C., Josefino C.* Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover // J. Climate. 2012. V. 25. P. 1176–1193. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00113.1.
- 14. *Deser C., Walsh J.E., Timlin M.S.* Arctic sea ice variability in the context of recent atmospheric circulation trends // Journal of Climate. 2000. V. 13. P. 617–633.
- 15. *Deser C., Tomas R.A., Peng S.* The transient atmospheric circulation response to north Atlantic SST and sea ice anomalies // Journal of Climate. 2007. V. 20. P. 4751–4767.
- 16. Lemke P., Ren J., Alley R.B., Allison I., Carrasco J., Flato G., Fujii Y., Kaser G., Mote P., Thomas R.H., Zhang T. Observations: changes in snow, ice and frozen ground // In: Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. 2007.
- 17. *Maslanik J., Drobot S., Fowler C., Emer W., Barry R.* On the Arctic climate paradox and the continuing role of atmospheric circulation in affecting sea ice conditions // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. L03711. doi: 10.1029/2006GL028269.
- 18. Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Murray R.J. Responses of climate and cyclones to reductions in Arctic winter sea ice // Journal of Geophysical Research. 1995.100. P. 4791–4806.

- 19. *Raymo M.E.*, *Rind D.*, *Ruddiman W.F.* Climatic effects of reduced Arctic sea ice limits in the GISS II general circulation model // Paleoceanography. 1990. V. P. 367–382.
- 20. *Serreze M.C., Holland M.M., Stroeve J.* // Perspectives on Arctic's shrinking sea-ice cover // Science. 2007. V. 315. P. 1533–1536.
- 21. *Stroeve J., Holland M.M., Meier W., Scambos T., Serreze M.* Arctic sea ice decline: Faster than forecast // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. Issue 9. 109501. doi: 10.1029/2007gl029703.
- 22. Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Malanik J., Barrett A.P. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis // Climatic Change. 2011. doi: 10.1007/s10584-011-0101-1.
- 23. *Petoukhov V., Semenov V. A.* A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // Journal of Geophysical Research. 2010. 115. D21111. DOI: 10.1029/2009JD013568.
- 24. Wan C., Jia Q.R., Yu Z.H. Effects of the low-frequency variability of Region-III sea ice cover of the Arctic upon the Northern Hemisphere atmosphere general circulation anomaly in winter // Chinese Journal of Atmospheric Science. 1997. V. 21. P. 123–129.
- 25. Wu B., Ronghui H., Dengyi G. Effects of variation of winter sea-ice area in Kara and Barents seas on East Asia winter monsoon. Acta Meteorological Sinica. 1999. V. 13. P. 141–153.
- 26. Assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation. Moscow, RSC «Planeta», 2008. 69 p.

The connection of Arctic Sea ice changes and winter meteorological conditions of northern Eurasia

L.M. Kitaev, T.B. Titkova

Institute of Geography RAS, Moscow, Russia E-mail: lkitaev@mail.ru

Trends of long-term changes are estimated for air temperature, precipitation and snow accumulation in northern Eurasia, for the area of Arctic sea ice area and for the Arctic Oscillation index – for 1979–2009. For large Eurasian regions the significant regression dependence was found for the meteorological conditions from the sea ice area changes (negative relationship) and from index AO (positive relationship). Influence of Arctic Oscillation on the meteorological conditions prevails in the Western and Central Siberia, the effect of changes in sea ice area prevails in Eastern European Plain and the North-East Siberia. Regression dependence of snow accumulation from air temperature and precipitation throughout insignificant, correlation between long-term variability of Arctic Jscillation index and sea ice area is not significant too.

Keywords: atmospheric circulation, multiple regression, precipitation, sea ice, surface air temperature, snow storage.