

Сезонные и долговременные вариации индексов атмосферной циркуляции и перенос воздуха в Российскую Арктику

А.А. Виноградова*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 16.01.2014 г.

Анализируются сезонные и долговременные (за период с 1986 по 2010 г.) изменения индексов циркуляции атмосферы, а также переноса воздушных масс в Российскую Арктику (к архипелагам Земля Франца-Иосифа, Северная Земля и к о. Врангеля). Приведены корреляции межгодовых вариаций, тренды долговременных изменений и другие характеристики рассматриваемых величин. Обнаружены принципиальные различия между системами связей индексов атмосферной циркуляции зимой и летом, а также этапы формирования этих систем в переходные сезоны. Выявлены статистически значимые закономерности в сезонных изменениях и связях индексов циркуляции между собой, а также с пространственным распределением воздушных масс, поступающих в Российскую Арктику, их различия в годы максимума и минимума солнечной активности.

Ключевые слова: атмосфера, Арктика, дальний перенос, индексы атмосферной циркуляции, солнечная активность; *atmosphere, Arctic, long-range transport, atmospheric circulation indices, solar activity.*

Введение

Процессы циркуляции в атмосфере весьма многообразны и не поддаются простой классификации. Хорошо известна интерпретация процессов переноса воздушных масс с помощью системы элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) Б.Л. Дзердзевского [1], которая для Северного полушария насчитывает 41 ЭЦМ, сменяющий друг друга в последовательности, не поддающейся точному описанию. Также в последние десятилетия широко применяются различные индексы атмосферной циркуляции (ИАЦ) [2], представляющие собой отклонения от климатических средних значений разности атмосферного давления между характерными географическими областями, и их сочетания. Корреляционные связи между величинами различных ИАЦ и рядом климатических показателей (например, с температурой, с количеством осадков и т.д.) обнаружены на многолетних рядах экспериментальных данных [3–6]. В связи с серьезными климатическими изменениями на планете, в ряде работ [7–9] рассматривались различные гелио- и более удаленные процессы и явления, которые могут воздействовать и в той или иной степени реально влияют на земную атмосферу и другие геосферы.

Процессы дальнего атмосферного переноса воздушных масс в Арктику изучаются уже давно в связи с поступлением в арктические районы антропогенных и природных составляющих, оказывающих

воздействие как на климатическую систему Арктики [10], так и на ее наземные и морские экосистемы [11]. В этом ряду исследования автора данной статьи с коллегами по изучению дальнего атмосферного переноса антропогенных тяжелых металлов в Российскую Арктику [12–14] были пионерскими и продолжают по настоящее время [15].

В настоящей статье сделана попытка сопоставить сезонные и межгодовые изменения индексов атмосферной циркуляции, величины солнечной активности и частот переноса воздушных масс с различных территорий к трем пунктам, расположенным в Российской Арктике. Целью такого анализа являлось выявление сезонных закономерностей и долговременных трендов этих характеристик, а также корреляционных связей между ними и, в конечном счете, поиск природных процессов и механизмов, организующих дальний перенос воздушных масс и применяемых в арктические районы России.

Исходные данные и подходы к их анализу

Использованы те же *данные о переносе воздушных масс* в Российскую Арктику, что легли в основу работы [15]. Кратко опишем формирование анализируемых рядов. Рассматривается перенос воздушных масс (ВМ) к трем пунктам, расположенным на архипелаге Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), 81,1° с.ш., 56,3° в.д., на арх. Северная Земля (СЗ), 79,5° с.ш., 95,4° в.д., на о. Врангеля (ВР), 71,0° с.ш., 178,5° з.д.

* Анна Александровна Виноградова (anvinograd@yandex.ru).

Для каждой из этих точек рассчитываются ежедневные 5-суточные обратные (воздух приходит к пункту) траектории движения ВМ для центральных месяцев четырех сезонов (январь, апрель, июль и октябрь) на протяжении 25 лет (1986–2010 гг.). Расчеты проводились по данным Гидрометцентра России для 00 ч UTC (с интервалом 6 ч) на изобарических поверхностях 925 и 850 гПа, являющихся представительными при изучении дальнего переноса воздушных масс.

Наша методика исследования переноса ВМ к каждому пункту включает анализ частоты поступления воздуха (траекторий) с шести территорий: из Европы (Е), Азии (А), Америки (Ам), Арктики (СЛО), а также из Тихого (То) и Атлантического (Атл) океанов. Для каждого сезона и года эти частоты рассчитываются по 60 траекториям (на двух изобарических уровнях). Термин «Арктика» (СЛО) в нашей классификации обозначает территорию Северного Ледовитого океана и его побережья (внутри круга 70° с.ш.) плюс остальная более южная часть Гренландии. В предположении, что выбранные месяцы являются представительными для соответствующих сезонов, анализируется сезонная изменчивость изучаемых процессов переноса ВМ к рассматриваемым пунктам. В свою очередь, межгодовая изменчивость рассматривается для каждого сезона (характеризуемого соответствующим месяцем).

Система индексов атмосферной циркуляции в настоящей статье представлена шестью индексами: NAO (североатлантический), PNA (тихоокеанский/североамериканский), WP (западно-тихоокеанский), EA/WR (восточно-атлантический/западно-российский), SCA (скандинавский), POL (полярно-евразийский, называемый также PE). Их описания можно найти, например, на сайте [2], с которого нами взяты среднемесячные данные за те же 4 мес с 1986 по 2010 г., для которых рассчитывался перенос ВМ в Арктику. Все шесть ИАЦ могут в той или иной мере определять процессы циркуляции воздушных масс над севером Евразии. Исходя из расположения формирующих их центров, меридиональный перенос воздуха должен больше зависеть от величин индексов NAO, WP и POL, определяемых меридиональными градиентами атмосферного давления, тогда как индексы PNA и EA/WR ассоциируются с зональными градиентами давления и, соответственно, с зональными перемещениями воздушных масс. Напомним, что величина ИАЦ – это отклонение разницы атмосферного давления между соответствующими географическими точками (центрами) от климатического среднего значения (за 1981–2010 гг.). Центры – наиболее вероятное положение относительно устойчивых локальных максимума и минимума атмосферного давления. Таким образом, положительный индекс означает усиление соответствующего диполя давления, а отрицательный – наоборот, его ослабление. При этом физическими причинами увеличения/ослабления индекса могут быть как реальное изменение разницы атмосферного давления между соответствующими точками, так и смещение центров максимума и минимума в пространстве.

Кроме того, исходя из близости географического положения атмосферных центров некоторых ИАЦ, можно предположить, что изменения величин индексов могут быть связаны друг с другом – в разной степени в разные годы и сезоны (см. далее). При этом центры индексов NAO и SCA располагаются над Атлантическим океаном, видимо, эти индексы должны больше отражать ситуацию в Атлантической зоне Северного полушария, тогда как для индексов PNA, WP и POL все наоборот (Тихий океан), и они должны характеризовать Тихоокеанскую зону. Индекс EA/WR отражает синоптическую ситуацию на огромном пространстве средних широт – от Атлантики до Китая и вычисляется по четырем центрам (чередующихся знаков) [2].

Показателем *солнечной активности* (СА), включенным в анализ, является ряд среднемесячных значений приходящей на Землю солнечной радиации на длине волны 10,7 см в январе, апреле, июле и октябре с 1986 по 2010 г. [16].

Долговременные изменения, межгодовые вариации и другие статистические характеристики рассматриваемых показателей анализировались по ежегодным среднемесячным данным и/или по их сглаженным (по трем, пяти или десяти годам) величинам для каждого месяца отдельно, с использованием стандартных математических формул.

Долговременные и сезонные изменения системы ИАЦ

Исходные ряды ежегодных среднемесячных значений рассматриваемых ИАЦ для каждого из четырех месяцев довольно изменчивы: при средних значениях, по абсолютной величине не превышающих 0,15 усл. ед., размах колебаний (максимум – минимум) составляет от 3 до 5 единиц, а стандартные отклонения для всех ИАЦ и всех четырех месяцев лежат в пределах $1,00 \pm 0,07$. При этом распределение значений достаточно симметрично относительно средних величин: расстояния от среднего до медианы меньше 0,23 и в большинстве случаев не превосходят 0,15 (т.е. меньше 10% от амплитуды колебаний и меньше 5% от полного размаха).

На рис. 1 в виде графиков отдельно для января, апреля, июля и октября показаны межгодовые вариации сглаженных (по пяти годам) среднемесячных значений рассматриваемых ИАЦ. В целом на временном отрезке в 25 лет можно выделить три периода, принципиально отличающихся друг от друга сочетанием значений ИАЦ: 1986–1995, 1996–2000 и 2001–2010 гг. Для этих временных отрезков вариации знаков ИАЦ схематически представлены на рис. 2 в виде своеобразных штрих-кодов, где столбики вверх/вниз каждой диаграммы обозначают положительные/отрицательные средние (за период) значения ИАЦ, превышающие по модулю 0,15 усл. ед. ИАЦ, средние значения которых меньше 0,15 (т.е. величины которых близки к норме, рассчитанной за 1981–2010 гг.), отсутствуют в соответствующем штрих-коде. Таким образом, чем меньше индексов

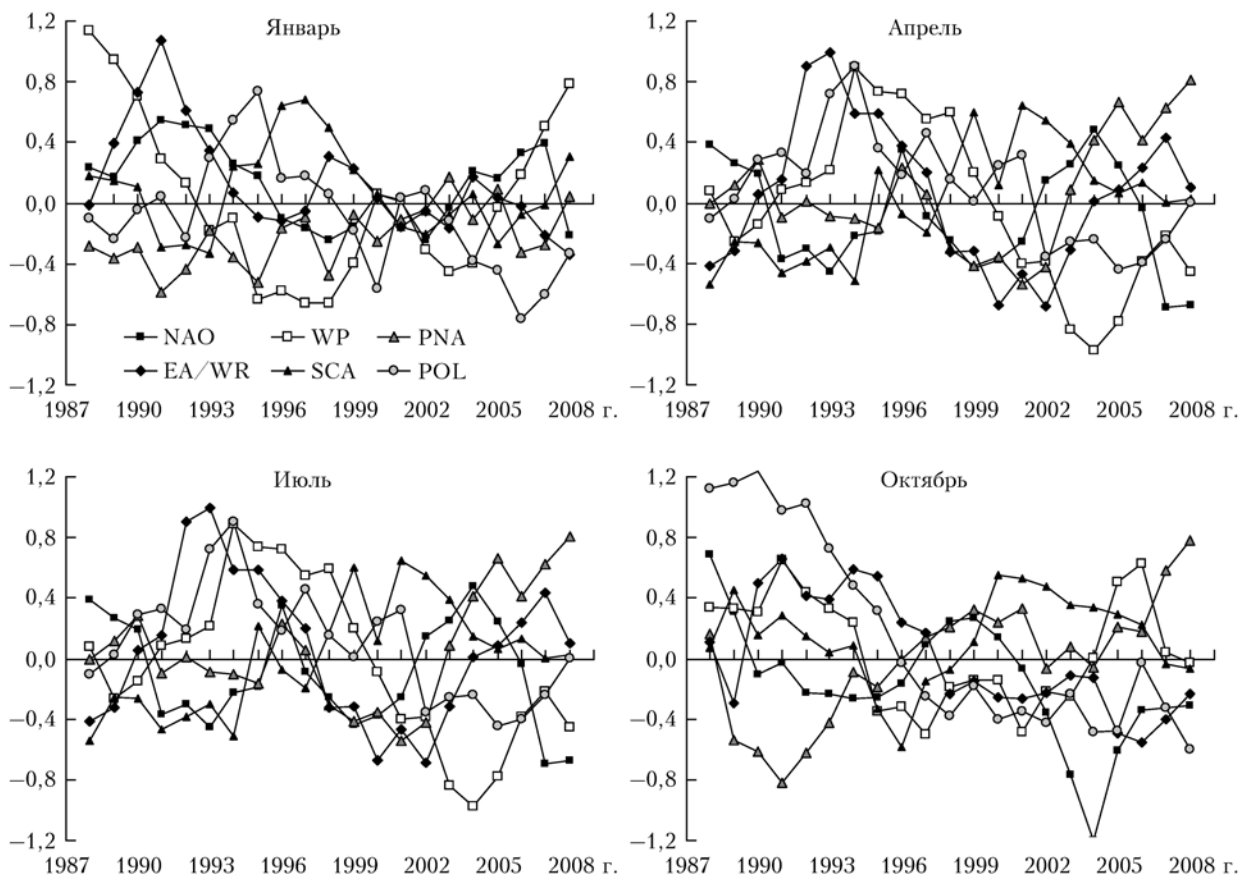


Рис. 1. Пятилетние скользящие средние значения среднемесячных ИАЦ для января, апреля, июля и октября, усл. ед.

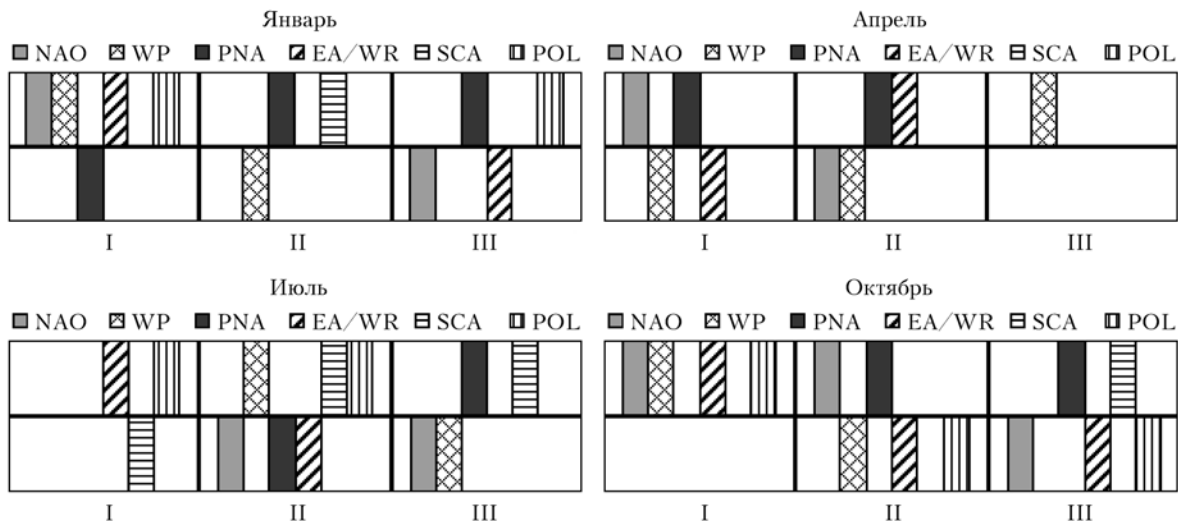


Рис. 2. Схематическое представление изменения знаков ИАЦ за рассматриваемые 25 лет по периодам: I – 1986–1995, II – 1996–2000, III – 2001–2010 гг. (см. текст). Абсолютные значения ИАЦ не отражены

представлено на диаграмме, тем в этот период ситуация была ближе к нормальной, например в 2000-е гг. в январе (аномален только один индекс WP). Наоборот, в октябре ситуация значительно отличалась от нормы во все выбранные три периода. Таким образом, за рассматриваемые 25 лет почти все ИАЦ поменяли свои знаки, причем в разные сезоны изме-

нения различны, что должно проявляться в изменении крупномасштабной атмосферной циркуляции.

Рассмотрим вопрос о зависимости или независимости ИАЦ друг от друга в их межгодовых вариациях. Анализ парных коэффициентов корреляции рассматриваемых индексов между собой показал, что при 3-летнем (с весами 1-2-1) и простом 5-летнем

сглаживании ежегодных значений получаются близкие результаты. При этом исключаются вариации с более короткими периодами (например, квазидвухлетняя цикличность) и сглаживается теоретически возможное влияние эффектов Южного колебания (явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья), но яснее просматриваются более долгопериодные эффекты, например с периодом около 11 лет, близким к периодичности изменения солнечной активности. Колебания с еще большими периодами вряд ли можно изучать по 25-летнему ряду исходных данных.

В табл. 1 приведены коэффициенты корреляции межгодовых вариаций среднемесячных значений ИАЦ (при 5-летнем скользящем сглаживании) для рассматриваемых месяцев. С учетом порога статистической значимости коэффициента корреляции (на 5%-м уровне вероятности), который при оценке по формуле $R_n = 2(n - 2)^{-0.5}$ [17] (при $n = 21$) составляет $R_{21} = 0,46$, в табл. 1 выделены коэффициенты больше этого значения. Отметим, что для одной и той

же пары ИАЦ в разные месяцы возможны корреляции разных знаков (например, в январе и в апреле для пар NAO + SCA или NAO + EA/WR), что может быть как раз проявлением разных механизмов изменения величины индекса – смещение центров или реальное изменение атмосферного давления.

Приведенные на рис. 3 схемы взаимосвязи индексов показывают, как эта система преобразовывается в течение года от сезона к сезону. Отметим сразу, что крупномасштабные индексы – атлантический NAO и тихоокеанский PNA – значимо коррелируют между собой (меняясь в противофазе) только в январе. Зимой основу схемы составляет индекс NAO, с которым коррелируют SCA, EA/WR и даже тихоокеанский PNA. Все коэффициенты корреляции примерно одной величины, вся система в целом должна быть довольно устойчива. Колебания атмосферного давления, описываемые индексами WP или POL, слабее связаны с этой системой и друг с другом (табл. 1). Весной (по сравнению с зимой) сохра-

Таблица 1

Корреляции межгодовых изменений значений ИАЦ между собой, а также с величиной СА (при 5-летнем скользящем сглаживании исходных ежегодных месячных значений) для 4 мес. Выделены коэффициенты корреляции > 0,46

Месяц	Индекс	Январь						
		NAO	WP	PNA	EA/WR	SCA	POL	CA
Апрель	NAO	1,00	0,41	-0,51	0,57	-0,57	-0,09	0,40
	WP	-0,35	1,00	-0,15	0,17	-0,24	-0,41	0,28
	PNA	-0,09	-0,59	1,00	-0,57	-0,03	-0,25	-0,22
	EA/WR	-0,75	0,15	0,39	1,00	-0,32	0,08	0,72
	SCA	0,53	0,28	-0,59	-0,38	1,00	0,27	-0,55
	POL	0,13	0,46	-0,53	-0,49	0,19	1,00	0,06
	CA	0,49	0,23	-0,62	-0,79	0,47	0,80	1,00
Октябрь								

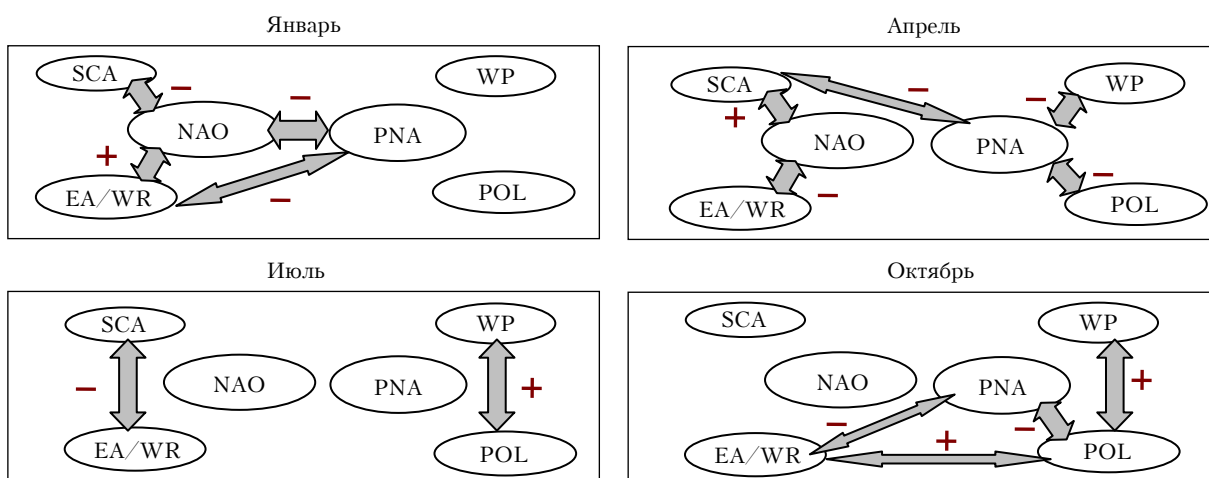


Рис. 3. Схемы корреляционных связей между ИАЦ (по 5-летним скользящим сглаженным величинам) для разных месяцев. Стрелками обозначены достоверные корреляции, рядом – знаки коэффициентов корреляции

няется североатлантическая связка трех индексов — SCA + NAO + EA/WR — при смене знака корреляции между NAO и EA/WR. Связь между Атлантикой и севером Тихого океана заметно ослабевает (корреляция индексов NAO и PNA незначима). Зато тихоокеанский индекс PNA теперь связывает индексы WP и POL, которые затем (летом) составляют одну из двух относительно независимых коррелирующих между собой пар. Вторая пара связанных летом индексов — SCA и EP/WR — по своему расположению тяготеет к атлантической зоне и (в отличие от зимы) не зависит от NAO. Индексы NAO и PNA летом практически независимы. Осенью происходит частичное восстановление зимних связей: PNA и EA/WR коррелируют между собой и с индексом POL, связь с которым зимой заметно ослабевает. В свою очередь, индексы NAO и SCA осенью еще остаются независимыми, а зимой они присоединяются к связке PNA+EA/WR.

Подчеркнем, что причинами выявленных корреляций ИАЦ между собой могут быть не только близкое расположение их центров, но и какие-то внешние воздействия, например со стороны Солнца, а также другие геофизические явления, влияющие на циркуляцию атмосферы. Анализ причин этих связей выходит за рамки данной работы.

Однако обратимся к корреляциям ИАЦ с величиной солнечной активности (см. табл. 1) и обсудим возможное влияние этого фактора на изменения индексов. Из всех шести ИАЦ только индекс EA/WR почти весь год коррелирует с величиной SA, причем эта связь наиболее сильна в холодные сезоны (январь, апрель), ослабевает летом и практически совсем пропадает в октябре. При этом знаки коэффициентов корреляции между EA/WR и SA, а также между NAO и EA/WR различны в январе и апреле. Связь NAO и SA характеризуется положительными коэффициентами корреляции в пределах 0,4–0,5, т.е. вблизи порога достоверности. Заметим, что индекс EA/WR формируется четырьмя центрами [2], т.е. состоит как бы из двух диполей — европейского, расположенного над Европой, и азиатского — над центром Азии. Возможно, соотношением сил этих диполей обусловлены отмеченные изменения знаков соответствующих корреляций в разные сезоны.

Косвенным подтверждением связей SA с величинами ИАЦ можно считать результаты анализа коэффициентов автокорреляции ежегодных среднемесячных значений каждого индекса отдельно для каждого месяца при сдвигах от 1 до 14 лет (при 25-летних рядах исходных данных). Такая процедура выявила колебания значений некоторых ИАЦ с периодами в 5–6 и 10–12 лет в разные месяцы. Однако исходные данные были заведомо аномальны из-за необычно затянувшейся низкой активности Солнца в 2006–2010 гг. [16], что при небольшой длительности ряда исходных данных не позволило получить математически достоверные результаты.

Рассматривая и анализируя еще раз табл. 1 и постепенно двигаясь от зимы к осени, можно предположить, например, такой механизм изменения сис-

темы ИАЦ (см. рис. 3) в течение года. Весной, при увеличении после зимы инсоляции все более северных территорий, начинается разрушение зимней системы ИАЦ со стороны тихоокеанской зоны. В результате появляются корреляции SA и индексов POL и PNA и система связей ИАЦ, свойственная зиме, распадается. В результате летом система связей ИАЦ становится совсем простой — из двух пар (WP + POL) и (SCA + EA/WR), причем только последняя слабо связана с SA через индекс EA/WR. Появляющееся осенью воздействие Солнца на индекс SCA сохраняется и зимой и в какой-то мере может способствовать формированию зимних связей ИАЦ.

Остается вопрос, как формируется связь крупномасштабных индексов NAO и PNA, достоверно существующая только зимой. В рассмотренной схеме сезонных перестроек это может происходить, например, через атмосферные центры, которые определяют сложный индекс EA/WR. Возможно, что здесь сказывается значительно более южное расположение атмосферного полярного фронта над Евразией зимой, чем летом [17]. Полярные ВМ распространены зимой над огромной территорией. Это может быть причиной январской связи индекса EA/WR как с величиной SA, так и с индексами NAO и PNA (см. табл. 1 и рис. 3). Отметим, что именно в январе индексы NAO и PNA наименее изменчивы (из всех шести ИАЦ за все 4 мес) — соответствующие стандартные отклонения 0,87 и 0,85 при размахе колебаний чуть больше 3 усл. ед.

Таким образом, представленные результаты качественно выявляют принципиальные различия между системами связей ИАЦ зимой и летом, а также этапы формирования этих систем в переходные сезоны.

Перенос воздушных масс и индексы атмосферной циркуляции

В [15] были получены распределения частот поступления ВМ к трем пунктам в отдельности по территориям их происхождения (материковые — Европа, Азия, Америка, океанические — СЛО, Атлантика и Тихий океан), обнаружены значимые тренды межгодовых изменений этих процессов. Кроме того, были выделены пары территорий (для разных пунктов и месяцев — разные), частоты переноса ВМ с которых коррелируют друг с другом в межгодовых вариациях. Обратимся сразу к совместному анализу этих результатов и сопутствующих им преобразований системы ИАЦ. Для каждого пункта рассматриваются по 4 территории, для которых частоты переноса максимальны. Тренды изменений ИАЦ и повторяемости переноса ВМ с различных территорий на ЗФИ, СЗ, ВР представлены в табл. 2 для разных месяцев. Выделены ИАЦ и направления переноса ВМ, для которых линейные тренды наиболее достоверны.

При значимом коэффициенте корреляции межгодовых вариаций пары характеристик (частоты переноса ВМ с какой-то территории к определенному пункту и величины ИАЦ) мы будем условно говорить,

Тренды изменений индексов атмосферной циркуляции и повторяемости переноса воздушных масс с различных территорий на ЗФИ, СЗ, ВР в разные месяцы. R^2 – коэффициент достоверности линейной аппроксимации. Выделены наиболее достоверные тренды

Индекс	Январь		Апрель		Июль		Октябрь	
	<i>Индексы циркуляции</i>							
	Тренд. ед./ 10 лет	R^2	Тренд. ед./ 10 лет	R^2	Тренд. ед./ 10 лет	R^2	Тренд. ед./ 10 лет	R^2
NAO	-0,16	0,150	-0,37	0,16	-0,12	0,04	-0,38	0,34
WP	-0,20	0,050	0,36	0,25	-0,46	0,29	-0,15	0,07
PNA	0,19	0,330	-0,10	0,03	0,24	0,15	0,49	0,56
EA/WR	-0,36	0,410	0,31	0,40	-0,13	0,03	-0,44	0,51
SCA	-0,04	0,010	-0,10	0,03	0,37	0,40	0,06	0,01
POL	-0,31	0,260	-0,18	-0,01	-0,33	0,32	-0,92	0,79
<i>Перенос воздушных масс</i>								
Откуда	Тренд. повтор./ 10 лет	R^2	Тренд. повтор./ 10 лет	R^2	Тренд. повтор./ 10 лет	R^2	Тренд. повтор./ 10 лет	R^2
<i>На ЗФИ</i>								
Из Европы	-0,004	0,004	-0,11	0,72	-0,04	0,18	0,02	0,10
Из Азии	-0,04	0,400	-0,02	0,37	-0,02	0,13	0,01	0,01
Из СЛО	0,05	0,400	0,14	0,74	0,08	0,42	-0,04	0,13
Из Атлантики	-0,01	0,030	0,01	0,01	-0,04	0,36	0,01	0,02
<i>На СЗ</i>								
Из Европы	-0,0006	0,0001	-0,09	0,62	-0,08	0,65	-0,03	0,18
Из Азии	-0,03	0,100	-0,01	0,01	-0,05	0,34	-0,01	0,00
Из СЛО	0,01	0,010	0,05	0,28	0,13	0,52	0,003	0,001
Из Атлантики	0,01	0,290	0,02	0,49	-0,01	0,02	0,02	0,55
<i>На ВР</i>								
Из Азии	-0,08	0,380	-0,13	0,69	-0,13	0,73	-0,16	0,72
Из Америки	-0,07	0,590	-0,09	0,38	-0,04	0,61	-0,09	0,75
Из СЛО	0,14	0,450	0,16	0,87	0,14	0,52	0,20	0,63
Из Тихого океана	0,002	0,003	0,07	0,43	0,03	0,12	0,04	0,35

что индекс и это направление переноса ВМ связаны друг с другом, а также что этот индекс «управляет» данным переносом, «определяет» или «регулирует» его. ИАЦ – это показатель явно большего пространственного масштаба, чем частоты переноса ВМ к определенному пункту. Поэтому руководящая или определяющая роль в рассматриваемых парах рядов значений отводится нами именно индексам. В целом это не совсем корректно, поскольку управляющим процессом может быть какой-то третий, которого мы не касались в этой работе.

В табл. 3 для каждого пункта и месяца представлены ИАЦ, для которых коэффициенты корреляции межгодовых вариаций с частотой переноса ВМ с соответствующей территории являются достоверными. При расчетах по 25 парам значений (без сглаживания и после вычитания линейных трендов) эти коэффициенты по модулю больше 0,42, т.е. достоверны на уровне 5%-й вероятности [17]. В нашей интерпретации результаты табл. 3 можно трактовать следующим образом.

В январе в европейском секторе Арктики – на ЗФИ и СЗ – перенос воздуха из Европы в значительной степени определяется индексом NAO (чем больше значение индекса, тем чаще ВМ поступают из Европы), а воздух из Атлантики регулируется

индексом SCA (также с положительной корреляцией). При этом на ЗФИ заметно влияние индекса POL на перенос ВМ из Европы (но корреляция отрицательная). Заметим, что сами индексы NAO и POL никогда значимо не связаны друг с другом (см. табл. 1). На СЗ в январе другой независимый индекс WP связан (отрицательно) с частотой переноса азиатского воздуха. В тихоокеанском секторе (на ВР) обнаружено значимое влияние индекса POL, который противопоставляет между собой процессы поступления океанического воздуха из СЛО и Тихого океана. При этом перенос ВМ из Америки на ВР положительно коррелирует с индексом PNA.

В апреле индекс NAO остается связанным с частотой переноса воздуха из Европы только на ЗФИ, противопоставляя ему арктические воздушные массы из СЛО. На Северной Земле индекс WP связан (положительно) с переносом воздушных масс из СЛО. Индекс PNA, сильно изменившийся в это время года (по сравнению с зимой) свои связи с другими индексами (см. табл. 1 и рис. 3), организует конкуренцию поступления воздуха на о. Врангеля из Америки и СЛО.

В июле в европейском секторе индексы NAO и SCA, не коррелирующие между собой, влияют на процессы переноса воздуха на ЗФИ и СЗ: NAO –

Таблица 3

Индексы атмосферной циркуляции, для которых коэффициенты корреляции с частотой переноса ВМ с разных направлений достоверны на уровне 5%-й вероятности (см. текст), и знаки соответствующих коэффициентов

Пункт	Месяц	Из Европы	Из Азии	Из СЛО	Из Атлантики
ЗФИ	Январь	NAO +, POL –			SCA +
	Апрель	NAO +	POL –	NAO –	PNA –, EA/WR –
	Июль		SCA –	NAO –, WP –	NAO +, SCA +
	Октябрь	PNA +, SCA –			PNA –, PNA +, EA/WR –
СЗ	Январь	NAO +	WP –		SCA +
	Апрель			WP +	
	Июль		SCA –	EA/WR –	NAO +
	Октябрь	SCA –			WP +
Пункт	Месяц	Из Азии	Из Америки	Из СЛО	Из Тихого океана
ВР	Январь		PNA +	POL –	POL +
	Апрель		PNA +		PNA –
	Июль			WP –, SCA +	SCA –
	Октябрь	POL +		POL –	POL –

из Атлантики (связь положительная), а SCA – из Азии (связь отрицательная). Также заметны корреляции с индексом WP и индексом EA/WR, который связан с SCA. На о. Врангеля проявляются связи с теми же индексами (кроме NAO), причем теперь конкурирующие направления переноса ВМ из СЛО и Тихого океана регулирует индекс SCA (в отличие от января, когда эти процессы регулировались индексом POL).

В октябре на ЗФИ проявляются связи с крупномасштабным индексом PNA, который регулирует практически все каналы поступления ВМ. При этом корреляция частоты переноса воздуха из Атлантики также и с индексом EA/WR может быть просто формальным проявлением взаимной зависимости индексов EA/WR и PNA. А индекс SCA (как на ЗФИ, так и на СЗ) теперь (в отличие от июля) коррелирует (отрицательно) с частотами переноса воздуха из Европы. Индекс WP так же, как в апреле, положительно связан с частотой переноса воздушных масс из Северного Ледовитого океана на Северную Землю. На о. Врангеля в октябре практически все определяется индексом POL.

Таким образом, частоты переноса ВМ к рассматриваемым пунктам оказываются статистически связанными (при анализе межгодовой изменчивости) с величинами того или другого ИАЦ (или их пар)

(табл. 4 и рис. 3). В январе здесь проявляются не самые высокие коэффициенты корреляции индекса WP с POL и с NAO (ср. с табл. 1). В апреле вся схема ИАЦ делится на атлантическую (NAO + WP + EA/WR) и тихоокеанскую (PNA + POL + SCA) группы, управляющие переносом воздушных масс соответственно на ЗФИ и ВР. При этом на Северной Земле картина смешанная. В июле и в октябре конкуренция ВМ организуется отдельными ИАЦ или их группами, в соответствии со схемами рис. 3. Отметим, что на о. Врангеля индекс POL оказывается в числе наиболее значимых ИАЦ в течение всего года.

На рис. 4 показаны изменения в течение рассматриваемых лет частот некоторых переносов воздушных масс и ИАЦ, для которых обнаружены высокие абсолютные значения коэффициентов корреляции. Показаны скользящие 10-летние средние величины, поскольку в задачах переноса ВМ и примесей в Арктику по нашей методике используется именно такое усреднение [15].

Закономерности табл. 3 и 4 качественно подтверждаются сопоставлением знаков долговременных трендов изменения соответствующих ИАЦ и частот переноса ВМ, представленных в табл. 2. Пары, связанные значимыми положительными корреляциями в межгодовых изменениях, в течение 25 лет также изменяются в одном направлении: как индекс, так

Таблица 4

Для центральных месяцев и каждого пункта в Российской Арктике: конкурирующие ВМ (верхняя строка) и ИАЦ, управляющие этими процессами (нижняя строка)

Пункт	Январь		Апрель		Июль		Октябрь	
ЗФИ	Е–СЛО	Е–А	Е–СЛО		Е–СЛО		Е–СЛО	
	WP + NAO	POL	WP + NAO + EA/WR		NAO		PNA + EA/WR	
СЗ	А–СЛО		Е–СЛО		А–СЛО		А–СЛО	
	WP + POL		WP + NAO + EA/WR		SCA + EA/WR		SCA	
ВР	СЛО–А, Ам, То		А–Ам	Ам–То	А–СЛО	СЛО–То	СЛО–А, Ам	
	POL		POL	WP + PNA + SCA	POL + WP	SCA + EA/WR	POL + PNA + EA/WR	
								POL

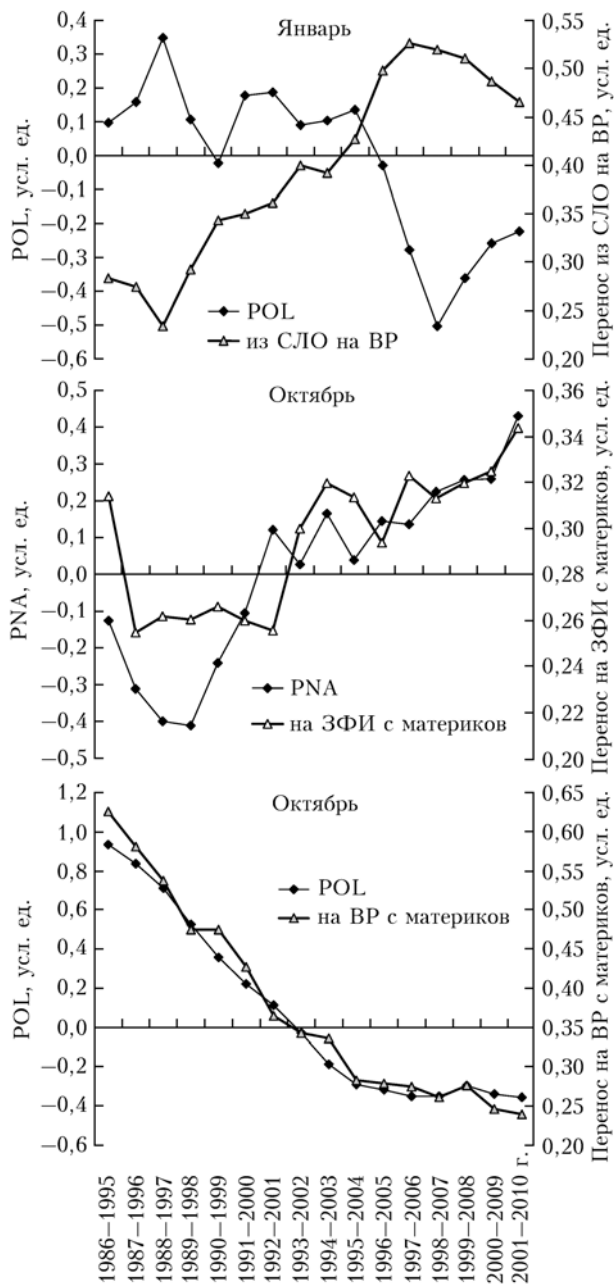


Рис. 4. Примеры коррелирующих долговременных изменений ИАЦ и частот переноса ВМ к разным пунктам в разные месяцы – при 10-летнем скользящем сглаживании ежегодных данных. Верхняя диаграмма – при отрицательном коэффициенте корреляции

и частота соответствующего переноса ВМ либо возрастают, либо убывают (при положительной корреляции межгодовых вариаций) или, наоборот, долговременные изменения соответствующих показателей противоположны (при отрицательных коэффициентах корреляции). Следовательно, можно предположить, что межгодовые вариации и долговременные тренды изменений в процессах переноса ВМ в Арктику определяются одними и теми же геофизическими процессами и сопутствующие пространственные распределения барических полей в той или иной степени описываются с помощью рассмотренных индексов.

Сравнение годов вблизи максимумов и минимумов солнечной активности

Достоверных корреляций между ежегодными значениями частот переноса воздушных масс с территорий разных материков и океанов к пунктам ЗФИ, СЗ и ВР и величиной солнечной активности не было обнаружено ни для одного из 4 мес. Поэтому рассматривались различия в процессах переноса ВМ в Арктику для лет вблизи максимумов (Max – 1989–1992 и 2000–2003 гг.) и минимумов (Min – 1985–1986, 1994–1997 и 2006–2010 гг.) солнечной активности. Были вычислены разницы частот переноса ВМ с каждого направления между годами Max и Min для каждого месяца и каждого пункта в Арктике. Критерием значимости этих различий послужило условие превышения модуля этой разницы над величиной стандартного отклонения соответствующей частоты переноса ВМ (для выборки годов Max и Min). В табл. 5 представлены наиболее значимые различия в направлениях переноса ВМ к разным пунктам – в терминах знака разницы средних значений (за годы Max минус за годы Min) солнечной активности. Знаки +/– означают, что повторяемость переноса в годы максимума СА больше/меньше по сравнению с годами минимума. Также в табл. 5 приведены аналогичные данные для достоверных различий величин ИАЦ для тех же лет.

Информацию табл. 5 можно рассматривать как своеобразный прогноз изменений соответствующих характеристик в ближайшие годы (от 2010 к 2015–2016 гг., когда можно будет ожидать максимума солнечной активности). Рассматривая табл. 5 с точки зрения антропогенного загрязнения арктических

Таблица 5

Качественные различия (см. текст) частот переноса ВМ с разных направлений к рассматриваемым пунктам в Арктике (ЗФИ, СЗ, ВР) и величин ИАЦ – для каждого месяца – в годы максимума и минимума солнечной активности (Max – Min)

Месяц	Пункт			ИАЦ
	ЗФИ	СЗ	ВР	
Январь	Из Европы +	Из Атлантики –	Из Азии +	EA/WR +
Апрель	Из Азии –	Из Азии –	Из Азии +	NAO +
	Из Атлантики +			PNA –
Июль	Из Азии –	Из Европы +		
	Из СЛО +	Из Атлантики +		
Октябрь		Из Европы –		PNA –
		Из СЛО +		

островов России (при неизменности источников эмиссий), можно заключить, что в ближайшие годы ситуация может ухудшиться только на ЗФИ, поскольку в январе может произойти увеличение частоты поступления воздуха из Европы. Предполагаемое увеличение повторяемости поступления ВМ из Азии на о. Врангеля (в январе и в апреле) не должно сильно сказаться на загрязнении воздуха в этом пункте, поскольку основные загрязнения поступают туда с американского материка [15]. Возможное повышение частоты поступления ВМ из Европы на Северную Землю в июле не должно сильно ухудшить ситуацию, поскольку летом время жизни антропогенных аэрозолей в атмосфере невелико, в результате примеси переносятся воздушными массами на сравнительно небольшие расстояния и практически не доходят из Европы до Арктики [12, 18].

Заключение

Проведен совместный статистический анализ сезонных и долговременных (за период с 1986 по 2010 г.) изменений шести индексов циркуляции атмосферы, величины солнечной активности, а также переноса воздушных масс в Российскую Арктику (к архипелагам Земля Франца-Иосифа, Северная Земля и к острову Врангеля). Рассчитанные корреляции межгодовых вариаций, тренды долговременных изменений и другие статистические показатели рассматриваемых геофизических рядов выявляют ряд связей и закономерностей в сезонных и долговременных изменениях этих характеристик.

Обнаружены принципиальные различия между системами связей ИАЦ зимой и летом, а также этапы формирования этих систем в переходные сезоны. Обсуждаются некоторые возможные причины этих различий — влияние инсоляции и положения атмосферного арктического фронта.

Анализ корреляционных связей индексов циркуляции между собой, а также с пространственным распределением воздушных масс, поступающих в Российскую Арктику, выявил индексы и их группы (различные для разных районов Арктики и разных месяцев), которые могут описывать определяющие атмосферные процессы. В частности, для тихоокеанского сектора Арктики (на о. Врангеля) важно поведение индекса POL.

Анализ различий процессов переноса воздушных масс в Арктику и значений индексов атмосферной циркуляции в годы максимума и минимума солнечной активности позволил сделать качественные прогностические оценки ближайших изменений этих характеристик к 2015–2016 гг., когда ожидается максимальная активность Солнца. Результаты показывают, что с точки зрения антропогенного загрязнения окружающей среды Российской Арктики в ближайшие годы ухудшения ситуации (при неизменности источников загрязнения) можно ожидать только в районе Земли Франца-Иосифа.

К сожалению, корреляционный анализ, выявляя возможные связи и тенденции, дает пищу для

размышлений и сопоставлений, но не позволяет обобщить глобальные природные механизмы, перестраивающие циркуляционные процессы в атмосфере.

Автор выражает искреннюю благодарность старшему научному сотруднику ИФА им. А.М. Обухова РАН С.А. Ситнову за плодотворные дискуссии и полезные советы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ — гранты № 11-05-00300 и 14-05-00059.

1. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзержевскому. М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.
2. Индексы атмосферной циркуляции. URL: http://ftp.csr.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele_index.nh
3. Иттолитов И.И., Кабанов М.В., Комаров А.И., Кусков А.И. Современные природно-климатические изменения в Сибири: ход среднегодовых приземных температур и давления // География и природные ресурсы. 2004. № 3. С. 90–96.
4. Безуглова Н.Н., Зинченко Г.С. Региональные климатические проявления глобальной циркуляции атмосферы на юге Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2009. № 3. С. 83–87.
5. Шамакин А.Б. Климатические характеристики снежного покрова Северной Евразии и их изменения в последние десятилетия // Лед и снег. 2010. Т. 1, № 1. С. 43–57.
6. Попова В.В., Шамакин А.Б. Региональная структура колебаний температуры приземного воздуха в северной Евразии во второй половине XX — начале XXI веков // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2010. Т. 46, № 2. С. 15–29.
7. Егоров А.Г. Солнечная активность, барическая волна в приземной атмосфере Арктики и многолетние изменения арктической осцилляции // Метеорол. и гидрол. 2004. № 2. С. 27–37.
8. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Диагностика причинно-следственной связи солнечной активности и глобальной приповерхностной температуры Земли // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2008. Т. 44, № 3. С. 283–293.
9. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А. Влияние солнечной активности на погодно-климатические характеристики тропосферы // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 21. С. 98–106.
10. Метеорологические и геофизические исследования. М.: Paulsen, 2011. 352 с. ISBN 978-5-98797-067-6.
11. Наземные и морские экосистемы. М.: Paulsen, 2011. 448 с. ISBN 978-5-98797-069-0.
12. Виноградова А.А. Микроэлементы в составе арктического аэрозоля (обзор) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1993. Т. 29, № 4. С. 437–456.
13. Виноградова А.А., Егоров В.А. Оценка вкладов промышленных регионов Северного полушария в загрязнение атмосферы Российской Арктики // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1997. Т. 33, № 6. С. 750–757.
14. Vinogradova A.A. Anthropogenic pollutants in the Russian Arctic atmosphere: sources and sinks in spring and summer // Atmos. Environ. 2000. V. 34, N 29–30. P. 5151–5160.
15. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010 гг.) // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 475–483.
16. Солнечная активность. URL: <http://ionosphere.meteo.be/sun/F10.7>
17. Пановский Г.А., Брайер Г.В. Статистические методы в метеорологии. Л.: Гидрометеониздат, 1972. 209 с.

A.A. Vinogradova. Seasonal and long-term variations in atmospheric circulation indices and air mass transport to the Russian Arctic.

Seasonal and long-term variations in six atmospheric circulation indices (ACI) and in air transport to three points in the Russian Arctic were concurrently analyzed for the period of 1986–2010. The monthly mean values of ACI and of air mass transport frequencies from some territories were studied for the central months of the seasons. The principal differences between winter and summer ACI systems were found, as well as its transitional structures. Correlations between atmospheric transport pathways and ACI (or their group) show some connections and seasonal features in processes under investigation. Some statistically significant differences between the years with maximal and minimal solar activity were revealed as for ACI and for air transport to the Russian Arctic.