

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК 551.583; 551.513.3

В.В. Попова¹, В.В. Мацковский², А.Ю. Михайлов³

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА СУШИ ВНЕТРОПИЧЕСКОЙ ЗОНЫ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

Рассматривается связь изменений приземной температуры на суше внетропической зоны Северного полушария с вариациями крупномасштабной атмосферной циркуляции, выраженными индексами из архива Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. Приводятся результаты анализа множественной регрессии, которые показывают, что наблюдаемые с середины XX в. изменения температуры зимнего сезона, включая ее резкий рост с начала 1970-х до середины 1990-х гг. и сменившую его паузу в потеплении, почти полностью объясняются вариациями крупномасштабной циркуляции, описываемыми индексами Северо-Атлантического (NAO), Тихоокеанско-Североамериканского (PNA), Скандинавского (SCAND) колебаний. В смене фаз современного потепления проявляются различия в режиме влияния центров действия атмосферы на изменчивость температуры, что позволяет говорить о смене режимов крупномасштабной циркуляции. Меридиональная циркуляция с преобладающим влиянием тихоокеанских ЦДА, описываемых индексом PNA, в начале 1970-х гг. сменилась зональной циркуляцией, связанной с возросшей ролью североатлантических ЦДА (NAO). С середины 1990-х годов вновь возрастает интенсивность меридиональной циркуляции, но в этот период, в отличие от 1950–1970 гг., она связана с ЦДА SCAND, то есть полярными широтами восточной Атлантики и прилегающим сектором Северного Ледовитого океана и арктического побережья.

Ключевые слова: центры действия атмосферы, циркуляционные индексы, температура приземного воздуха, изменчивость, тренды, множественная регрессионная зависимость.

Введение. Крупномасштабные положительные аномалии зимней температуры на территории Северной Евразии внесли основной вклад в рост глобальной температуры с начала 1970-х до середины 1990-х гг. С середины 1990-х в течение почти 20 лет, согласно данным инструментальных наблюдений [Второй оценочный доклад Росгидромета, 2014], на севере Евразии увеличилась повторяемость аномально холодных зим, что отразилось в замедлении темпов роста приземной температуры в масштабе полушария [IPCC, 2013] и позволило говорить о паузе в глобальном потеплении, причины которого связывают как с сокращением площади арктических морских льдов и повышением температуры поверхности океана на севере Атлантики [Семенов, 2015; Semenov, Latif, 2015; Petoukhov, Semenov, 2010], так и с аномалиями в распределении теплосодержания верхних слоев Тихого океана [England et al., 2014; Trenberth and Fasullo, 2013].

Основным фактором изменчивости и регионального распределения температуры и осадков внетропических широт является крупномасштабная атмосферная циркуляция. Смена направлений переноса воздушных масс и атмосферных вихрей (циклонов и антициклонов, их интенсивности и продолжительности действия) вызывает погодные аномалии, которые при осреднении проявляются как климатичес-

кие аномалии различного временного и пространственного масштаба и демонстрируются в виде изменений средней по полушарию приповерхностной температуры. Наиболее характерным процессом в режиме атмосферной циркуляции, определяющем частоту, интенсивность и другие параметры таких атмосферных образований, как циклоны и антициклоны, является усиление и ослабление зонального переноса. Влияние этих процессов проявляется в региональной структуре климатических аномалий, в первую очередь, зимней температуры на севере континентов Северного полушария [Попова, Шмакин, 2010; Thompson, Wallace, 1998]. Для внетропической зоны СП в целом показателем интенсивности зонального переноса, как известно, является индекс Арктического колебания, для севера Атлантики она выражается индексом Северо-Атлантического колебания (North Atlantic Oscillation – NAO). Особенности этого центра действия атмосферы (ЦДА) и его связь с современными изменениями климата изучается давно [Zvoryaev and Gulev, 2009; Popova, 2007; Marshall et al., 2001; Pozo-Vazquez et al., 2001; Hurrell, 1995]. В конце 1980-х количественный показатель NAO был получен при разложении вариаций поля высоты геопотенциала 700 гПа по эмпирическим ортогональным функциям с применением процедуры вращения [Barnston, Livezey, 1987]. Такой

¹ Институт географии Российской академии наук, лаборатория климатологии, вед. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: valeria_porova@mail.ru

² Институт географии Российской академии наук, отдел гляциологии, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: matskovsky@igras.ru

³ Институт географии Российской академии наук, лаборатория климатологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: miha_ku@mail.ru

способ описания атмосферной циркуляции дает наиболее полное представление об изменчивости поля давления внетропической зоны Северного полушария, включая его региональные структуры, или ЦДА. Он позволил выявить ряд мод и соответствующих ЦДА, получивших общее название Northern Hemisphere Teleconnection Patterns (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc>). Изучение их статистической структуры и повторяемости указывает, что механизмы телеконнекции полушарного масштаба проявляются как на низких частотах – от 20–30 суток и более [Athanasiadis et al., 2009; Benedict and Feldstein, 2004; Rennert and Wallace, 2009], так и на возмущениях синоптического масштаба [Benedict and Feldstein, 2004].

Отмеченные циркуляционные моды описывают изменчивость поля давления, которая является непосредственным фактором формирования региональных погодно-климатических аномалий и их многолетних тенденций внетропических широт. В свою очередь, эта изменчивость может быть обусловлена как внутренним взаимодействием в системе атмосфера–океан–суша, так и внешними факторами, способными оказывать влияние на климатическую систему. Первое связано, главным образом, с аномалиями в распределении температуры поверхности океана, описываемыми климатическими модами АМО (Atlantic Multidecadal Oscillation), PDO (Pacific Decadal Oscillation), IPO (Interdecadal Pacific Oscillation), SOI (Southern Oscillation Index) и др. Возможные механизмы таких связей обсуждаются достаточно давно [Arpe et al., 2000; Mokhov and Smirnov, 2006; Trenberth and Fasullo, 2013]. Влиянию внешних факторов, включая естественные (орбитальные и солярные) и антропогенные (рост содержания парниковых газов) на интенсивность атмосферной циркуляции, выражаемую индексами АО, NAO, также уделялось немало внимания, но этот вопрос все еще остается дискуссионным и выходит за рамки данной статьи.

Выяснение роли и сравнительного вклада ЦДА в изменения средней температуры материков внетропических широт Северного полушария и их региональные особенности на всех этапах современного потепления позволит судить о механизмах формирования аномалий как регионального, так и глобального масштаба. Весьма важными представляются вопросы о том, в какой мере изменения крупномасштабной циркуляции объясняют особенности современного потепления на суше Северного полушария, в частности фазу резкого роста температуры в 1970–1990-х гг. и его замедления с конца 1990-х, и можно ли трактовать эти изменения как смену циркуляционных режимов.

Материал и методы исследований. В работе использовались данные измерений температуры воздуха в регулярной сетке Центра климатических исследований Университета Делавэр (<http://climate.geog.udel.edu/~climate/index.shtml>) за период с 1950 по 2012 гг. по ячейкам, расположенным на суше Северного полушария от 40 до 75° с. ш. Исходные

данные с разрешением 0,5×0,5 градуса были переинтерполированы в сетку с меняющимся шагом по долготе, обеспечивающим равные площади ячеек (соответствующие разрешению 5×5 градусов на средней широте выбранного пояса 57,5° с. ш.). Поскольку март в средних и высоких широтах является по существу зимним месяцем, а региональная структура зимней температуры сохраняет устойчивый характер вплоть до начала весны [Попова и Шмакин, 2010], сезонное осреднение охватывало четыре месяца – с декабря по март.

При описании изменений крупномасштабной циркуляции атмосферы использовался индекс Арктического колебания (Arctic Oscillation – АО) за 1950–2015 гг. (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/20thC_Rean/timeseries/monthly/AO), который вычисляется как первая мода разложения по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ) поля высоты геопотенциала 1000 гПа [Thompson and Wallace, 1998]. Также анализировались индексы Northern Hemisphere Teleconnection Patterns (1950–2012 гг.), мониторинг которых проводится Центром прогнозов климата NOAA на основе данных реанализа NCEP/NCAR о колебаниях поля геопотенциала на уровне 500 гПа (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc>). Помимо NAO, в качестве основных составляющих изменчивости поля давления над Евразией в зимние месяцы выделяется ряд циркуляционных механизмов, в числе которых Тихоокеанско-Североамериканский (Pacific-North American – PNA), Скандинавский (Scandinavian – SCAND) и др. Если индекс NAO, как отмечалось выше, для внетропической зоны Евразии служит показателем интенсивности зональной циркуляции, Скандинавский (Scandinavian – SCAND), напротив, отражает колебания блокировки зонального переноса над Северной Евразией. Его положительная фаза характеризуется мощным антициклональным очагом с центром на севере Скандинавии также депрессией над Сибирью, по восточной и западной периферии которых происходит вторжение арктического воздуха через Западную Сибирь и восток ЕТР вплоть до субтропических широт. Для Северной Америки и северотихоокеанского сектора Евразии режимы усиления и ослабления зонального переноса отражаются индексом PNA. Все циркуляционные индексы Northern Hemisphere Teleconnection Patterns с месячным разрешением тестировались на их вклад в изменчивость температуры приземного воздуха на суше внетропической зоны за декабрь–март.

Рассматривалась средняя температура суши внетропической зоны Северного полушария ($T_{СП}$), а также региональное распределение изменчивости температуры, то есть температура в регулярной сетке. Применение пошаговой множественной регрессии позволило получить количественные оценки *независимого вклада* каждого из циркуляционных индексов в межгодовую изменчивость температуры, а также ее низкочастотную составляющую тренд. Оценки выполнены как за исследуемый период в целом, так и за 3 более коротких периода

(с некоторым наложением): до начала 1970-х гг. (примерный рубеж, от которого отсчитывается начало современного глобального потепления); период наиболее быстрого роста глобальной температуры с 1968 по 1997 гг.; период 1996–2012 гг., характеризующийся замедлением потепления. Для периода наиболее быстрого роста глобальной температуры (1968–1997 гг.), ранее рассмотренного в работах [Hurrell, 1996; Thompson and Wallace, 1998]) анализировались оценки линейных трендов и их связь с циркуляционными индексами. Поскольку характерный масштаб возмущений в циркуляционных механизмах достигает 20–30 дней [Athanasiadis and Ambaum, 2009; Benedict, Rennert and Wallace, 2009], для анализа изначально использовались месячные значения циркуляционных индексов. Это позволило избежать скоррелированности, которая возникает между некоторыми индексами в среднесезонном обобщении, а также выявить наиболее значимые из зимних (декабрь–март) месяцев с точки зрения связи между циркуляцией и температурой. Наиболее информативными в этом отношении оказались индексы NAO и SCAND в среднем за январь–февраль (NAO_{I-II} , $SCAND_{I-II}$), а также индексы PNA в среднем за январь–февраль и январь–март (PNA_{I-II} и PNA_{I-III}).

Результаты исследований и их обсуждение. В многолетнем ходе индекса АО (I_{AO}) отчетливо прослеживаются тенденции его изменения (рис. 1, А). В период, предшествующий современному потеплению (1950–1970 гг.), значения индекса АО почти не поднимаются выше нуля, и в среднем составляют $-0,8$. Последующий рост I_{AO} , наблюдающийся с начала 1970-х, происходит на фоне высокой междекадной изменчивости и достигает максимума в конце 1980-х – начале 1990-х. С увеличением повторяемости холодных зим на севере Евразии (что стало поводом для пристального изучения этого периода и его определения как «пауза в потеплении») с середины 1990-х гг. АО вновь входит в отрицательную фазу. Хотя в среднем в этот период (1996–2013 гг.) она менее глубокая, чем 1950–1970 гг. (среднее значение I_{AO} составляет $-0,3$) именно в этот период; в 2010 г. отмечается абсолютный минимум индекса. Низкочастотные изменения I_{AO} , таким образом, показывают, что периоды роста (снижения) средней температуры на севере Евразии и в Северном полушарии в целом совпадают с его положительными (отрицательными) фазами, из чего следует, что глобальные климатические изменения с середины прошлого столетия тесно связаны с интенсивностью зонального переноса.

В целом за 65-летний период тренд I_{AO} положительный, но незначительный как по величине изменения ($0,1$ за 10 лет) так и по вкладу в общую изменчивость (7%). Несмотря на то, что в многолетнем ходе I_{AO} отражаются все стадии современного потепления, его изменчивостью можно объяснить только чуть более 20% $T_{сн}$ зимнего сезона. Для севера Евразии величина общей изменчивости средней зимней температуры ($T_{сн}$) и I_{AO} достигает 48%,

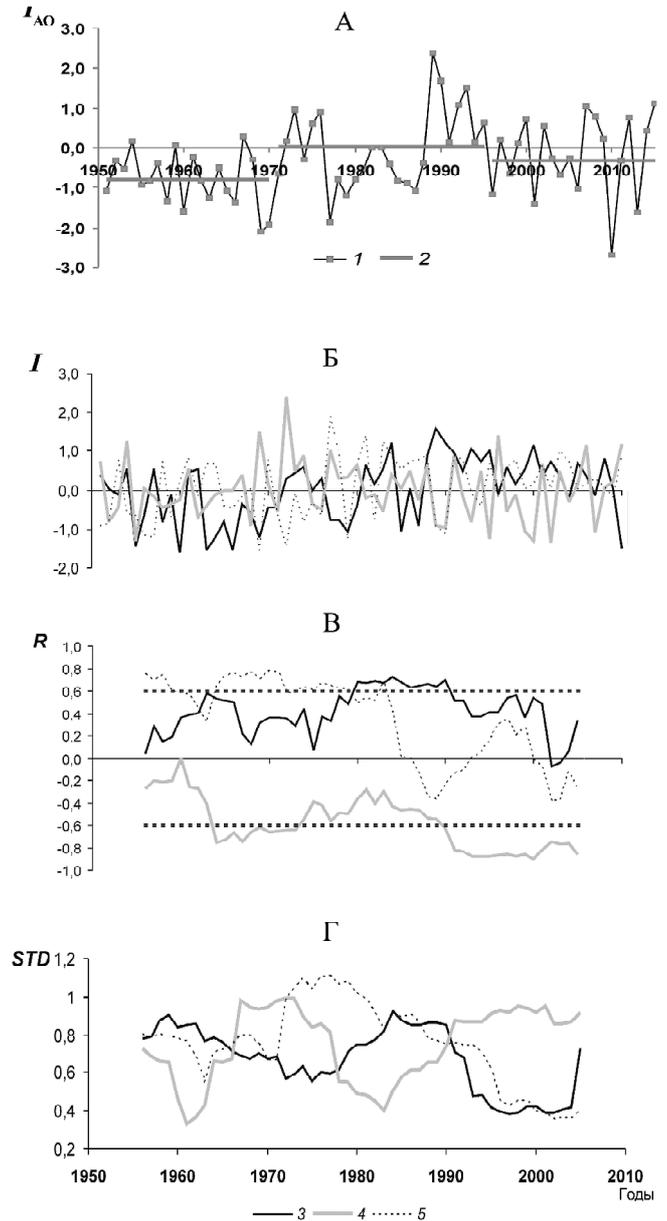


Рис. 1. Многолетние изменения: А – индекса Арктической осцилляции I_{AO} (1, 2); Б – циркуляционных индексов по версии Northern Hemisphere Teleconnection Patterns: NAO (3), Scand (4) и PNA (5), в среднем за декабрь–март, а также 11-летние скользящие; В – их корреляции со средней зимней температурой суши внетропической зоны Северного полушария (декабрь–март); Г – стандартные отклонения. Сплошными прямыми линиями (А, 2) показаны средние значения I_{AO} за 1951–1970 гг., 1971–1995 гг. и 1996–2015 гг. Прямыми пунктирными линиями (В) обозначены границы 95-процентного доверительного интервала

Fig. 1. Long-term variation of: А – Arctic Oscillation index I_{AO} (1, 2); Б – circulation indices in terms of the Northern Hemisphere Teleconnection Patterns: NAO (3), Scand (4) and PNA (5), December–March averaged, as well as the 11-year running of: В – their correlation coefficients with mean winter temperature of terrestrial part of extra-tropical Northern Hemisphere zone (December–March); Г – standard deviations. Solid straight lines (А, 2) show mean values of I_{AO} in 1951–1970, 1971–1995 and 1996–2015. Dashed straight lines (В) indicate the limits of 95% confidence interval

что говорит о преимущественном влиянии АО на вытянутом по широте пространстве этого субконтинента. Региональная неоднородность вклада усиления/ослабления зонального переноса в изменчивость температуры в масштабе внетропической зоны СП указывает на необходимость рассмотрения показателей циркуляции в области центров действия атмосферы (ЦДА), «контролирующих» разные регионы внетропической зоны Северного полушария. Отметим, что оценки пошаговой множественной регрессионной зависимости показывают, что более 70% изменчивости I_{AO} за 1950–2015 гг. описывается циркуляционными индексами NAO, SCAND и PNA по версии Northern Hemisphere Teleconnection Patterns (рис. 1, Б), основная доля, около 60%, связана с индексом NAO.

Анализ зависимости между колебаниями средней температуры суши внетропической зоны СП в среднем за декабрь–март $T_{СП}$ и вариациями крупномасштабной циркуляции указывает на ее тесную связь именно с этими циркуляционными индексами. В целом за 1951–2010 гг., как следует из приведенных в таблице данных, более 70% изменчивости $T_{СП}$ связаны с вариациями средних за январь–февраль циркуляционных индексов NAO, SCAND и PNA. Наибольшая доля дисперсии $T_{СП}$ за рассматриваемый период в целом связана с NAO (27%) и PNA (24%) примерно в равных долях и несколько меньшая (19%) – с индексом SCAND. Это позволяет говорить о примерно равном значении этих трех циркуляционных механизмов в общей изменчивости $T_{СП}$ в целом за 1951–2010 гг.

Оценки связи между $T_{СП}$ и циркуляционными индексами NAO, PNA и SCAND, проведенные по 11-летним скользящим периодам (рис. 1, В) показы-

вают, что вклад этих индексов в изменчивость температуры существенно меняется во времени. До начала 1970-х гг. за пределы доверительного интервала выходит только корреляция с индексом PNA и SCAND (хотя в отдельные 11-летия его величина становится статистически незначимой); с начала 1970-х происходит существенный рост вклада NAO, который с конца 1970-х до середины 1990 практически не опускается ниже порога значимости; затем, с середины 1990-х резко увеличивается связь с SCAND. Параметры регрессионной зависимости между $T_{СП}$ и этими индексами показывают, что до начала 1970-х годов в изменчивости средней температуры суши Северного полушария заметно выделяется PNA, его вклад, равный 47%, почти вдвое превышает вклад NAO (19%) и SCAND (21%). С начала 1970-х до середины 1990-х годов происходит существенный рост роли NAO – до 41%, и ослабление влияния PNA (до 23%) и SCAND (до 17%). С середины 1990-х годов картина меняется – резко, до 66%, увеличивается вклад SCAND и сокращается до незначимых величин роль NAO и PNA. В ходе средней температуры зимы на севере Евразии выделенные периоды, как отмечалось выше, отличаются резким ростом с начала с 1970-х годов и его замедлением со второй половины 1990-х годов.

Изменение роли NAO, PNA и SCAND в колебаниях температуры демонстрируют поля их общей дисперсии, рассчитанные на основе точечных данных о температуре (рис. 2). Пространственное распределение суммарной дисперсии для 1951–1970, 1968–1997 и 1996–2010 гг. заметно отличается по локализации очагов и их площади. Ярко выраженная зональная структура характерна для 1968–1997 гг. с

Параметры множественной регрессионной зависимости между средней температурой на суше Северного полушария $T_{СП}$ и индексами атмосферной циркуляции в разные временные периоды за 1951–2010 гг.

Индекс	Коэффициент	Погрешность	R (накопленный)	R^2 (накопленная и индивидуальная)		$t(N)$	p
1951–2010 гг. ($N=56$)							
NAO _{I-II}	0,61	0,09	0,53	28	28	4,16	0,00
PNA _{I-II}	0,61	0,09	0,72	52	25	-3,52	0,00
SCAND _{I-II}	-0,57	0,09	0,85	72	19	-3,38	0,00
1951–1970 гг. ($N=16$)							
PNA _{I-II}	0,64	0,10	0,68	47	47	6,31	0,00
SCAND _{I-II}	-0,64	0,11	0,82	67	21	-5,66	0,00
NAO _{I-II}	0,47	0,10	0,93	86	19	4,69	0,00
1968–1997 гг. ($N=23$)							
NAO _{I-II}	0,64	0,11	0,64	41	41	5,76	0,00
SCAND _I	-0,51	0,10	0,80	64	23	-4,87	0,00
PNA _{I-III}	0,43	0,09	0,90	81	17	4,77	0,00
1996–2010 гг. ($N=14$)							
SCAND _{I-II}	-0,61	0,12	0,81	66	66	-5,02	0,00

Примечание. R – коэффициент корреляции, R^2 , % – доля объясненной изменчивости, N – количество степеней свободы, t – критерий Стьюдента.

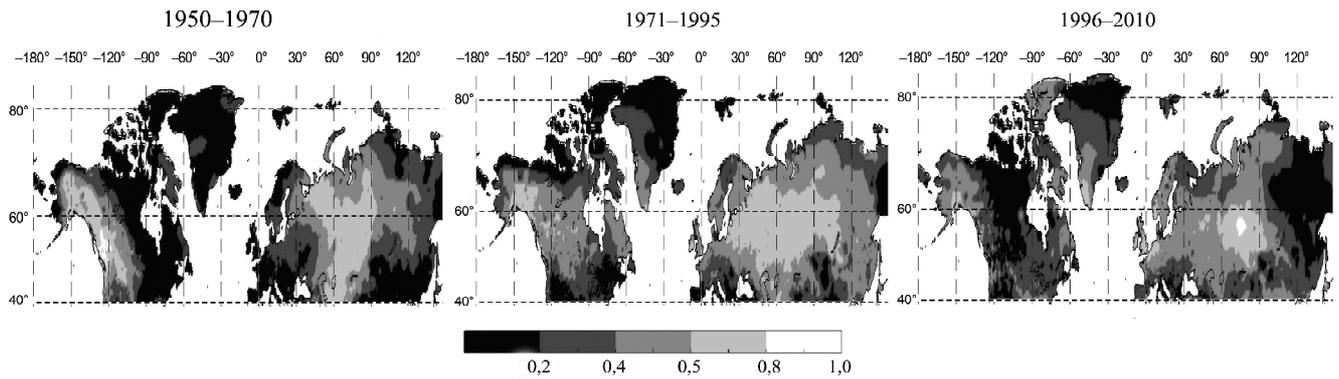


Рис. 2. Доля изменчивости средней температуры суши внетропической зоны Северного полушария в среднем за декабрь–март, объясненной индексами NAO, Scand и PNA (в сумме) в разные периоды за 1950–2010 гг.

Fig. 2. Share of mean temperature variability in the terrestrial part of extra-tropical Northern Hemisphere zone (December–March) explained by NAO, Scand и PNA indices (in total), for different periods during 1950–2010

преобладающим вкладом NAO в изменчивость средней температуры. Это отчетливо проявляется как в Евразии, так и в Северной Америке, причем величина объясняемой циркуляционными индексами дисперсии более 50% распространяется на всю умеренную зону, затрагивая арктическое побережье. Предшествующий период с доминирующим вкладом PNA в изменчивость средней температуры отличается меньшей площадью объясненной дисперсии и близким к меридиональному распределением очагов, особенно характерным для Северо-Американского континента. Последние 15 лет, когда основной вклад связан со SCAND, структура поля объясненной дисперсии также ближе к меридиональной, хотя и весьма отличается от 1951–1970 гг.

По временным периодам для каждого из трех индексов различия еще более заметны (рис. 3, А, Б, В). Отчетливо видно, что возросшая величина суммарной объясненной дисперсии в 1968–1997 гг. связана с NAO, при сохраняющемся вкладе PNA и SCAND. В 1996–2010 гг. вклад PNA и NAO становится статистически незначимым (рис. 3, А, Б), а вклад SCAND существенно возрастает как за счет расширения площади, объясненной этим индексом дисперсии температуры, так и за счет ее величины. Область влияния SCAND (рис. 3, В) в этот период распространяется от умеренных широт западной Европы до центра Сибири и от центра европейской территории России далеко на юг Арало-Каспийского региона.

Как видно из оценок, выполненных для $T_{СП}$ в целом, а также для температуры в узлах сетки, роль рассматриваемых ЦДА в ее изменчивости существенно меняется на протяжении 1951–2010 гг. Наибольшее внимание обращает на себя увеличение вклада NAO в 1968–1997 гг. в период существенного роста $T_{СП}$, а также резкое увеличение вклада SCAND в 1996–2006 гг. с одновременным уменьшением до незначимых величин вкладов NAO и PNA. Полученные оценки позволяют судить о доле объясненной этими циркуляционными индексами общей дисперсии, которая в зависимости от конк-

ретных периодов может превышать 80% и включает колебания разного временного масштаба.

Особый интерес вызывает вопрос о вкладе циркуляционных индексов в низкочастотную составляющую колебаний, то есть тренды. Рассмотрим с этой точки зрения тридцатилетие 1968–1997 гг., которое выделяется по скорости изменения температуры $T_{СП} - 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$ (рис. 4, А) и по доле тренда в общей изменчивости (30%). Согласно полученным оценкам (табл.), изменчивость $T_{СП}$ в 1968–1997 гг. на 81% объясняется циркуляционными индексами, причем 41% связан с NAO. Сопоставление наблюдаемых изменений $T_{СП}$ в 1968–1997 гг. с рассчитанными по результатам регрессии, показывает очень близкое воспроизведение тренда и флуктуаций разного масштаба. Остаток изменчивости, полученный после вычитания колебаний (рис. 4, В), связанных только с индексом NAO_{1-11} (то есть рассчитанных на основе регрессионной зависимости с этим индексом), свидетельствует, что его вклад объясняются, в основном, квазидесятилетние колебания, а также половина тренда, около $0,3 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$. Удаление изменчивости, связанной с колебаниями SCAND и PNA (рис. 4, Д), приводит к удалению тренда и существенному сглаживанию высокочастотной изменчивости. Таким образом, тренд $T_{СП}$ в 1968–1997 гг. практически полностью описывается циркуляционными индексами: около половины скорости линейного роста $T_{СП}$ можно объяснить NAO, и примерно по одной четверти – SCAND и PNA.

Пространственное распределение тренда зимней температуры в 1968–1997 гг., (рис. 4, Б), а также его изменение после удаления тренда, объясняемого ростом индекса NAO (рис. 4, Г), в основном, совпадает с полученными ранее оценками [Hurrell, 1996; Thompson and Wallace, 1998]. Основные очаги тренда температуры (до $1-2 \text{ } ^\circ\text{C}$ за 10 лет) в центре Сибири и области противоположной тенденции (до $1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$) на западном побережье Гренландии и северо-востоке п-ва Лабрадор наполовину утрачивают интенсивность и сокращаются по протяженности.

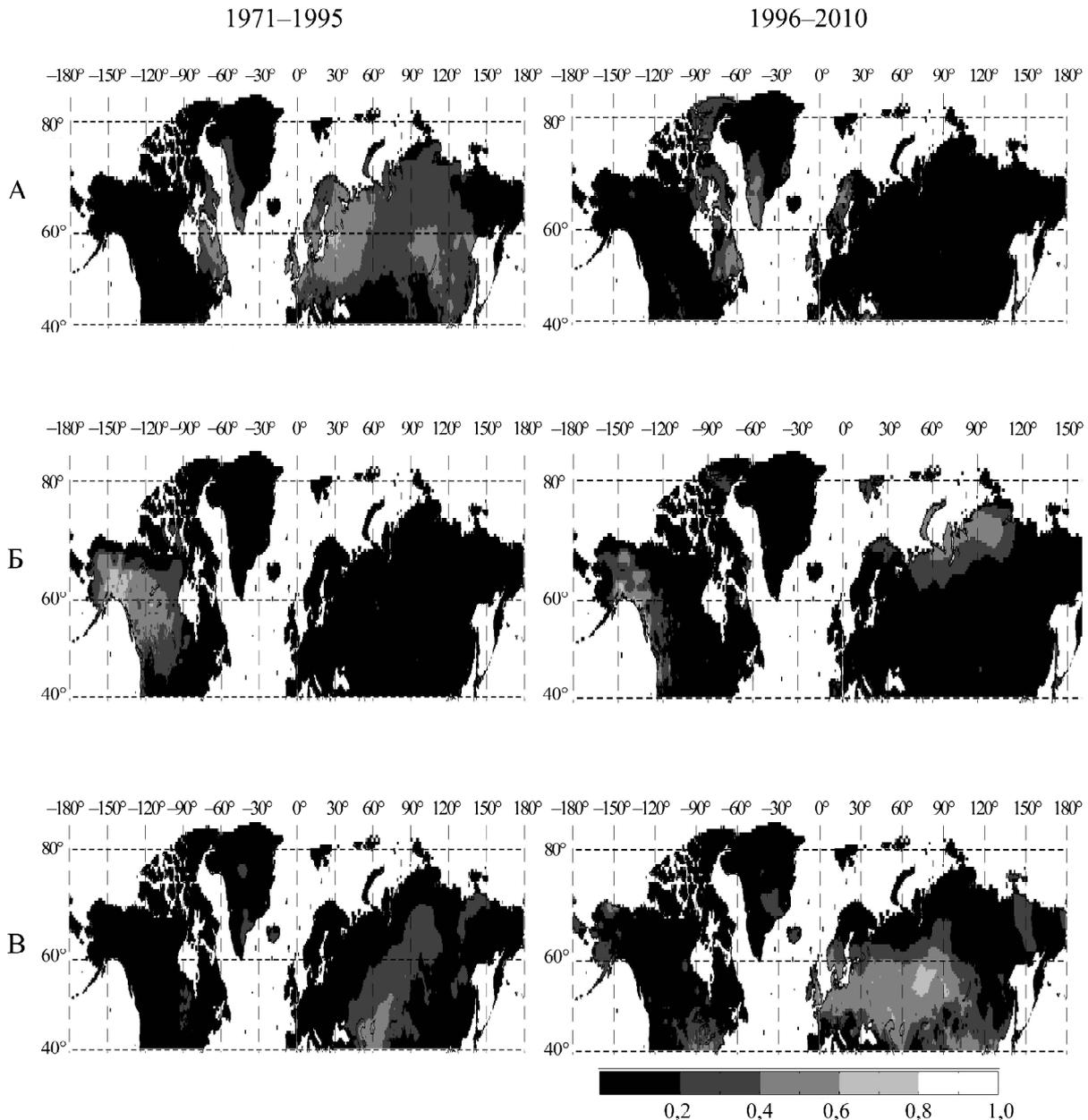


Рис. 3. Доля изменчивости средней температуры суши внетропической зоны Северного полушария в среднем за декабрь–март, объясненной индексами NAO (А), Scand (Б) и PNA (В) за 1971–1995, 1996–2010 гг.

Fig. 3. Share of mean temperature variability in the terrestrial part of extra-tropical Northern Hemisphere zone (December–March) explained by NAO (A), Scand (Б) и PNA (В) indices in 1971–1995 and 1996–2010

Удаление вклада линейного изменения температуры, описываемого индексом SCAND, приводит к тому, что на северо-западной половине Северной Евразии тренды температуры снижаются до $-0,5$ °C/10 лет, а на остальной территории в среднем до $0-0,5$ °C/10 лет. После удаления тренда, связанного с индексом PNA (рис. 4, E), основная часть Северной Америки оказывается в области трендов от $-0,5$ до $0,5$ °C/10 лет. Этот результат отличается от приведенных ранее оценок [IPCC, 2007; Hurrell, 1996; Thompson and Wallace, 1998], согласно которым циркуляционными индексами, в частности NAO, Южным колебанием и др. [Hurrell, 1996], либо Арктическим колебанием [Thompson and Wallace,

1998], можно объяснить лишь около 50% современного потепления в Северной Евразии. Это расхождение отчасти может быть обусловлено отличиями в границах территории, но в основном, в выборе циркуляционных индексов и недооценке роли некоторых механизмов макромасштабной циркуляции, в частности SCAND. Отметим, что основной вклад в изменчивость $T_{СП}$ вносят колебания индекса NAO в январе (NAO_1) и SCAND в феврале ($SCAND_{II}$), причем для индекса NAO_1 в 1968–1997 гг. выявляется положительный тренд, а для $SCAND_{II}$ такой же нисходящий тренд ($-0,4$ °C/10 лет), несколько уступающий по доле в общей изменчивости (он составляет 12% – для NAO_1 , 10% – для $SCAND_{II}$). По-види-

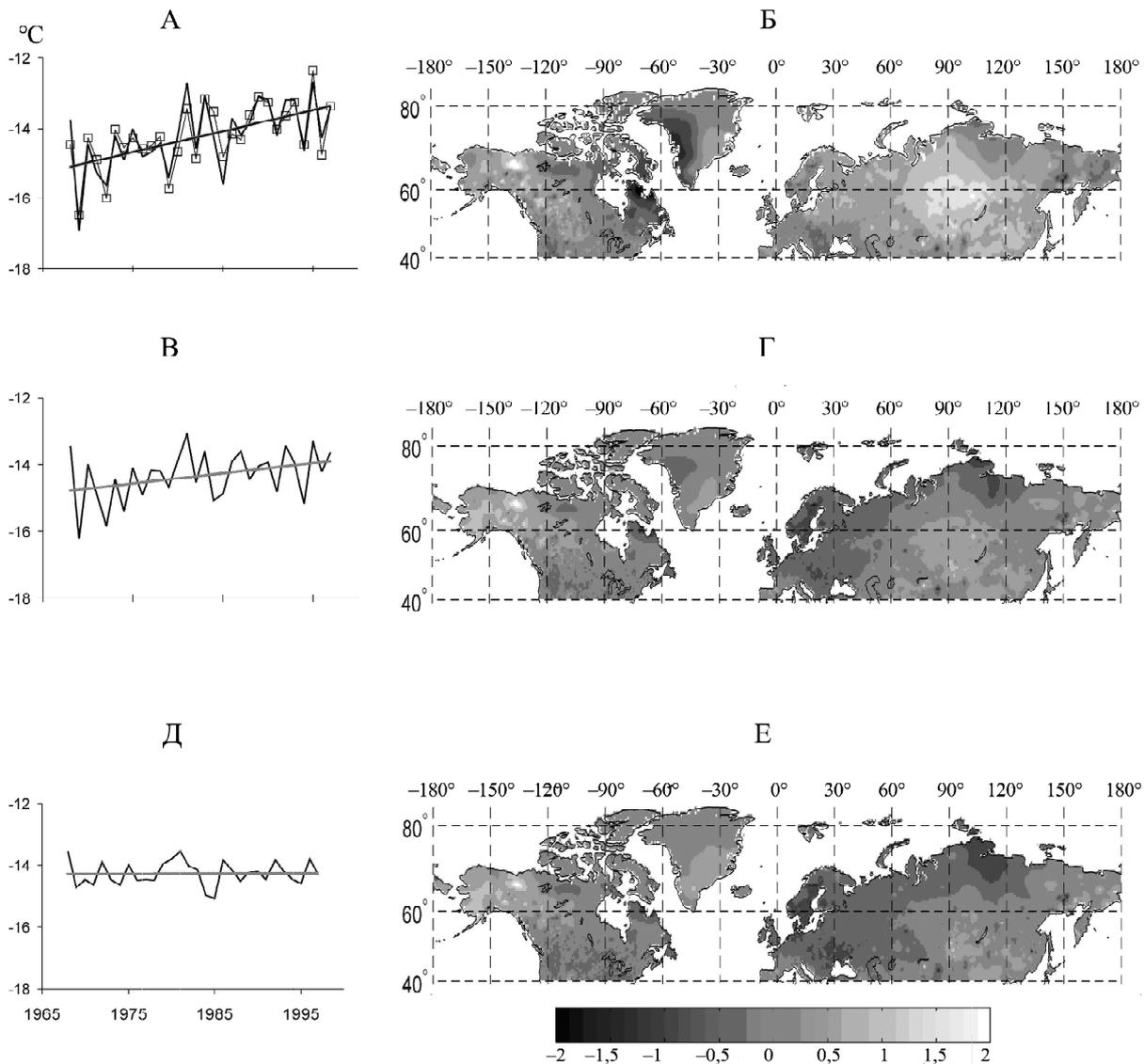


Рис. 4. Тренд температуры суши внетропической зоны Северного полушария в 1968–1997 гг. и его связь с индексами NAO, Scand и PNA; А – изменения средней температуры суши внетропической зоны СП в среднем за декабрь–март в 1968–1997 гг. по данным наблюдений (черная кривая) и рассчитанная на основе регрессионной зависимости (табл. 1, серая кривая) с маркерами; В – ряд наблюдаемой температуры после удаления изменчивости, связанной с индексом NAO; Д – то же после удаления тренда, связанного с NAO, Scand и PNA; Б – распределение коэффициента линейного тренда температуры в среднем за декабрь–март в 1968–1997 гг. по данным наблюдений; Г – то же после удаления изменчивости, связанной с NAO; Е – то же после удаления изменчивости, связанной с NAO, Scand и PNA

Fig. 4. 1968–1997 temperature trend for terrestrial part of the extra-tropical Northern Hemisphere zone and its relation to NAO, Scand и PNA indices: А – mean temperature variations for the terrestrial part of extra-tropical Northern Hemisphere zone (average for December–March) in 1968–1997 according to observations (black line), and derived on the base of regressions coefficients (table 1, gray line) with markers; В – time series of observed temperature after removing the variability related to NAO index; Д – the same, but after removing the variability related to NAO, Scand и PNA indices; Б – spatial distribution of temperature linear trend coefficient (average for December–March) in 1968–1997 according to observations; Г – the same after removing the variability related with NAO index; Е – the same, but after removing the variability related with NAO, Scand и PNA indices

тому, это обстоятельство заставляет принимать во внимание участие SCAND не только в высокой межгодовой изменчивости, но и в долгопериодных колебаниях температуры приземного воздуха во внетропической зоне Северного полушария.

Анализ связи зимней температуры на суше внетропической зоны Северного полушария с индексами крупномасштабной атмосферной циркуляции приводят к выводу, что общая изменчивость темпера-

туры в 1951–2012 гг. более чем на 70% может быть объяснена колебаниями индексов NAO, PNA и Scand примерно в равных долях. При этом регрессионные оценки, полученные как для средней $T_{СП}$, так и для температуры в узлах сетки показывают, что роль рассматриваемых ЦДА в изменчивости температуры существенно меняется на протяжении трех периодов, представляющих разные этапы современного потепления. Наибольшее внимание об-

ращает на себя увеличение вклада NAO в 1968–1997 гг., в период существенного роста $T_{СП}$, а также резкое увеличение вклада SCAND в 1996–2006 гг. с одновременным уменьшением до незначимых величин вкладов NAO и PNA. Полученные оценки позволяют судить о доле объясненной этими циркуляционными индексами общей дисперсии, которая в отдельные временные периоды середины прошлого столетия может превышать 80% и включает колебания разного временного масштаба. Ранее было показано, что аномалии аккумуляции снега на севере Евразии в этот период также определяются вариациями NAO, PNA и Scand, а ее рост от северо-востока ЕТР до Центральной Сибири связан с положительными аномалиями индекса NAO [Pорова, 2007].

Роль NAO существенно возрастает с конца 1960-х – начала 1970-х гг. С этим механизмом на 50% связан резкий рост средней температуры на суше Северного полушария в 1968–1997 гг. Важно отметить, что тренд $T_{СП}$ в этот период полностью описывается вариациями индексов NAO, SCAND и PNA. Таким образом, полагая, что причиной современного потепления является парниковый эффект, вызванный антропогенным изменением состава атмосферы, следует признать, что его действие (по крайней мере, на изучаемой территории) проявляется опосредованно, через макромасштабную циркуляцию. Доля непосредственного влияния на тепло-балансовые составляющие по территории суши внетропической зоны СП, по-видимому, несущественна.

Для понимания условий формирования климатических аномалий важно, что вклад перечисленных циркуляционных индексов в изменчивость температуры меняется во времени. По существу это свидетельствует о нелинейном характере связи между этими параметрами; предполагаемые причины этого явления обсуждались ранее [Попова, Шмакин, 2010; Christiansen, 2003; Pozo-Vazquez et al., 2001]. Несмотря на то, что по доле в изменчивости поля давления Северного полушария SCAND занимает лишь шестое место, в изменчивости температуры на севере Евразии и на суше его внетропической зоны в целом, этот циркуляционный механизм наряду с NAO и PNA, играет одну из ведущих ролей. Результаты данной работы заставляют принимать во внимание участие SCAND не только в высокой межгодовой изменчивости, но и в долгопериодных колебаниях температуры приземного воздуха. Изменениями SCAND и PNA можно объяснить около половины скорости роста $T_{СП}$ в 1968–1997 гг.

Существенно, что со второй половины 1990-х гг. как для Северной Евразии, так и для суши Северного полушария в целом, колебания температуры почти на 70% связаны с индексом SCAND. Приблизиться к пониманию причин усиления влияния SCAND на изменчивость зимней температуры с середины 1990-х годов позволяет анализ многолетних изменений индексов NAO, SCAND и PNA, в частности, вариаций стандартного отклонения в 1950–2012 гг. Из рис. 1, Б видно, что с середины

1990-х годов колебания NAO и PNA происходят, в основном, в положительной области и не выходят за пределы диапазона от 0 до 1. Этот период отличается самой низкой за рассматриваемый период величиной стандартного отклонения для этих индексов (рис. 1, Г). На таком фоне изменчивость SCAND, напротив, очень возросла, причем колебания этого индекса охватывают положительную и отрицательную области (рис. 1, Б, Г). Физически это означает ослабление межгодовой изменчивости полей давления в области центров действия, связанных с NAO и PNA, и их усиление в области очагов SCAND, то есть на севере Атлантики и прилегающем секторе Северного Ледовитого океана. Очевидно, причиной усиления такой неустойчивости может быть сокращение арктических льдов и повышение температуры поверхности океана, то есть эффект обратного влияния климатических изменений на циркуляцию, механизмы которого подтверждаются результатами исследований [Семенов, 2015; Мохов с соавт., 2012; Семенов, Мохов, Латиф, 2012; Petoukhov, Semenov, 2010].

Полученные результаты позволяют говорить о разных режимах влияния ЦДА на изменчивость температуры, что имеет большое значение для формирования климатических аномалий и их региональной структуры. Вероятно, эти режимы соответствуют разным режимам крупномасштабной циркуляции. Меридиональная циркуляция с преобладающим влиянием тихоокеанских ЦДА в начале 1970-х годов сменилась зональной циркуляцией с доминирующим вкладом северо-атлантических ЦДА. С середины 1990-х годов вновь возрастает интенсивность меридиональной циркуляции, но в этот период, в отличие от 1950–1970 гг., она связана с северными широтами Восточного полушария.

Описанные особенности поведения индексов NAO, PNA и SCAND с середины 1990-х гг. до конца 2000-х гг., по-видимому, отражают изменения в структуре основных ЦДА, которые были зафиксированы Zhang et al. [2008] и связываются с сокращением концентрации морского льда в Баренцевом и Карском морях. Выявленный сдвиг центра приполярной депрессии на север Скандинавского полуострова во второй половине 1990-х гг. и на север Сибири в 2000-х [Zhang et al., 2008], где располагаются основные очаги -SCAND, объясняют возросшую неустойчивость этого ЦДА и ее последствия в виде участвовавших вторжений арктического воздуха на севере Евразии.

Выводы:

– наблюдаемые с середины XX в. изменения климата внетропических широт Северного полушария почти полностью объясняются вариациями крупномасштабной циркуляции, выраженной в индексах колебаний ЦДА. Если смена тенденций и фазы Арктической осцилляции на качественном уровне указывают на связь периодов потепления (похолодания) с усилением (ослаблением) интенсивности зональной циркуляции, то вариациями индексов NAO, PNA и SCAND объясняется более 70% изменчивости температуры в 1950–2010 гг. в целом (и более 80% –

в 1951–1970 и 1968–1997 гг.), включая квазидесятилетние флуктуации, экстремумы обоих знаков, а также многолетние тенденции. К последним относятся резкое потепление с начала 1970-х до середины 1990-х и сменившая его пауза в потеплении. В смене фаз современного потепления проявляются не только особенности колебаний указанных индексов, но и различия в режиме влияния соответствующих им ЦДА на изменчивость температуры, что имеет большое значение для формирования климатических аномалий и их региональной структуры. Это позволяет говорить о смене режимов крупномасштабной циркуляции. Меридиональная циркуляция с преобладающим влиянием тихоокеанских ЦДА (PNA) в начале 1970-х годов сменилась зональной циркуляцией, связанной с возросшей ролью североатлантических ЦДА (NAO). С середины 1990-х годов вновь возрастает интенсивность меридиональной циркуляции, но в этот период, в отличие от 1950–1970 гг., она связана с ЦДА SCAND, то есть с полярными широтами восточной Атлантики и прилегающим сектором Северного Ледовитого океана и арктического побережья. Уникальность этого периода связана с перемещением центра приполярной депрессии из района Гренландии и Исландии на восток [Zhang et al., 2008], наиболее вероятной причиной которого может быть сокращение площади распрост-

ранения морского льда в Баренцевом и Карском морях [Семенов, 2015; Мохов с соавт., 2012; Семенов, Мохов, Латиф, 2012; Petoukhov, Semenov, 2010]. Рост повторяемости арктических вторжений и холодных зим на севере Евразии в этот период, известный как пауза в потеплении, следует расценивать как следствие этого явления и, возможно, как его индикатор. Последнее требует проведения сравнительного анализа условий формирования арктических вторжений на севере Евразии до и после начала 1970-х гг.;

– влияние изменений в распределении температуры поверхности Тихого океана, отмеченного отрицательной фазой индекса PDO с конца 1990-х гг., которому также отводится роль фактора перерыва в потеплении [England et al., 2014; Trenberth and Fasullo, 2013], должно способствовать общему ослаблению зонального переноса внетропической зоны Северного полушария. Вместе с тем, формирование циркуляционных механизмов выноса арктического воздуха вплоть до тропических широт, очевидно, связано с региональными ЦДА, в частности SCAND, а также с факторами, влияющими на распределение потоков тепла в области его основных очагов, – такими как сокращение площади морского льда в Баренцевом и Карском морях [Семенов, 2015; Мохов с соавт., 2012; Семенов, Мохов, Латиф, 2012; Petoukhov, Semenov, 2010].

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Программы ФНИ государственных академий наук 0148-2014-0015, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 44П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 551–587.

Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А. Изменения распространения морских льдов в Арктике и связанные с ними климатические эффекты: диагностика и моделирование // Лед и Снег. 2012. № 2(122). С. 53–62.

Попова В.В., Шмакин А.Б. Региональная структура колебаний температуры приземного воздуха в северной Евразии во второй половине XX – начале XXI веков // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 2. С. 15–29.

Семенов В.А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера – полярные льды – океан // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 232–248.

Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М. Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 4. С. 403–421.

Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G.S. et al. Connection between Caspian Sea level variability and ENSO // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. № 17. P. 2693–2699.

Athanasiadis P.J., Ambaum M.H.P. Linear Contributions of Different Time Scales to Teleconnectivity // J. Climate. 2009. V. 22. P. 3720–3728.

Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality, and persistence of low frequency atmospheric circulation patterns // Monthly Weather Review. 1987. V. 115. P. 1083–1126.

Benedict J.J., Lee S., Feldstein S.B. Synoptic view of the North Atlantic Oscillation // J. the Atmospheric Sciences. 2004. V. 61. P. 121–144.

Christiansen B. Evidence for nonlinear climate change: two stratospheric regimes and a regime shift // J. Climate. 2003. V. 16. P. 3681–3690.

England M.H., McGregor S., Spence P. et al. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus // Nature climate change. 2014. V. 4. March. www.nature.com/natureclimatechange.

Hurrell J.W. Influence of variations in extratropical wintertime teleconnection on Northern Hemisphere temperature // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. P. 665–668.

Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic oscillation: regional temperatures and precipitation // Science. 1995. V. 269. P. 676–679.

IPCC, 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds.: S. Solomon, D., M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 996 p.

IPCC. Climate change 2013: The Physical Science basis / Eds.: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY: Cambridge University Press; 2013. 1535 p.

Marshall J., Kushnir Y., Battisti D., Chang P., Czaja A., Dickson R., Hurrell J., McCartney M., Saravanan R., Visbeck M. North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms // *Int. J. Climatol.* 2001. V. 21. P. 1863–1898.

Mokhov I.I., Smirnov D.A. El Niño–Southern Oscillation drives North Atlantic Oscillation as revealed with nonlinear techniques from climatic indices // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L03708. Doi:10.1029/2005GL024557.

Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *J. Geophys. Research – Atmospheres.* 2010. V. 115. D21111. Doi:10.1029/2009JD013568.

Popova V. Winter snow depth variability over northern Eurasia in relation to recent atmospheric circulation changes // *Int. J. Climatol.* 2007. V. 27. P. 1721–1733.

Pozo-Vazquez D., Esteban-Parra M.J., Rodrigo F.S., Castro-Diez Y. A study of NAO variability and its possible non-linear influences on European surface temperature // *Climate Dynamics.* 2001. V. 17. P. 701–715.

Rennert K.J., Wallace J.M. Cross-Frequency Coupling, Skewness, and Blocking in the Northern Hemisphere Winter

Circulation // *J. Climate.* 2009. V. 22. P. 5650–5666. Doi: 10.1175/2009JCLI2669.1.

Semenov V., Latif M. Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012 // *Environ. Research Letters.* 2015. V. 10. 054020. Doi:10.1088/1748-9326/10/5/054020.

Thompson D.W.J., Wallace J.M. The arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 1297–1300.

Trenberth K.E., Fasullo J.T. An apparent hiatus in global warming? // *Earth's Future.* 2013. V. 1. P. 19–32. Doi:10.1002/2013EF000165.

Zhang X., Sorteberg A., Zhang J., Gerdes R., Comiso J.C. Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L22701. Doi:10.1029/2008GL035607.

Zvereva I.I., Gulev S.K. Seasonality in secular changes and interannual variability of European air temperature during the twentieth century // *J. Geophysical Research.* 2009. V. 114. D02110. Doi:10.1029/2008JD010624.

Поступила в редакцию 23.11.2016
Принята к публикации 13.09.2017

V.V. Popova¹, V.V. Matskovsky²,
A.Yu. Mikhailov³

RECENT CLIMATE CHANGE OVER THE TERRESTRIAL PART OF EXTRATROPICAL NORTHERN HEMISPHERE ZONE

Relations of surface air temperature variations over the terrestrial part of extratropical Northern Hemisphere zone with the macro-scale atmospheric circulation in terms of the Northern Hemisphere Teleconnection Patterns indices are studied. Evaluations obtained as a result of stepwise multiple regression show that winter temperature changes observed since the mid of the 21st century, including the abrupt increase in 1970–1990-s and subsequent warming hiatus, could be almost entirely explained by circulation variations related to three centers of action, i. e. North-Atlantic Oscillation (NAO), Pacific-North-American (PNA) and Scandinavian (Scand). Change of the recent global warming phases demonstrates the differences in the regime of atmospheric centers influence on temperature variability. The latter allows indicating the different regimes of macro-scale circulation. In the beginning of the 1970-s the meridional circulation with the prevalent impact of PNA centers of action changed for zonal circulation, due to the increasing role of NAO. Since the mid of the 1990-s, the role of meridional circulation increases again, but unlike in the 1950–1970-s it is caused by the Scand centers of action, i.e. north-east Atlantic and West-Eurasian sector of the Arctic.

Key words: centers of atmosphere action, circulation indices, surface air temperature, variability, trends, multiple regression.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Program of Federal Science Research (№ 0148-2014-0015), the RAS Presidium Program of Basic Research (№ 44II).

¹ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Climatology, Leading Scientific Researcher, PhD in Geography; e-mail: valeria_popova@mail.ru

² Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Department of Glaciology, Scientific Researcher, PhD in Geography; e-mail: matskovsky@igras.ru

³ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Climatology, Senior Scientific Researcher, PhD in Geography; e-mail: miha_ku@mail.ru

REFERENCES

- Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G.S. et al.* Connection between Caspian Sea level variability and ENSO // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. № 17. P. 2693–2699.
- Athanasiadis P.J., Ambaum M.H.P.* Linear contributions of different time scales to teleconnectivity // *J. Climate.* 2009. V. 22. P. 3720–3728.
- Barnston A.G., Livezey R.E.* Classification, seasonality, and persistence of low frequency atmospheric circulation patterns // *Monthly Weather Review.* 1987. V. 115. P. 1083–1126.
- Benedict J.J., Lee S., Feldstein S.B.* Synoptic view of the North Atlantic Oscillation // *J. the Atmospheric Sciences.* 2004. V. 61. P. 121–144.
- Christiansen B.* Evidence for Nonlinear Climate Change: Two Stratospheric Regimes and a Regime Shift // *J. Climate.* 2003. V. 16. P. 3681–3690.
- England M.H., McGregor S., Spence P. et al.* Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus // *Nature climate change.* 2014. V. 4. March www.nature.com/natureclimatechange.
- Hurrell J.W.* Influence of variations in extratropical wintertime teleconnection on Northern Hemisphere temperature // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 665–668.
- Hurrell J.W.* Decadal trends in the North Atlantic oscillation: regional temperatures and precipitation // *Science.* 1995. V. 269. P. 676–679.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds.: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller.* Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 996 p.
- IPCC. *Climate change 2013: The Physical Science basis / Eds.: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley.* Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY: Cambridge University Press; 2013. 1535 p.
- Marshall J., Kushnir Y., Battisti D., Chang P., Czaja A., Dickson R., Hurrell J., McCartney M., Saravanan R., Visbeck M.* North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms // *Int. J. Climatol.* 2001. V. 21. P. 1863–1898.
- Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.Ch., Pogarsky F.A.* Izmeneniya rasprostraneniya morskikh l'dov v Arktike i svyazannye s nimi klimaticheskiye efekty: diagnostika i modelirovanie [Variation of sea ice propagation in the Arctic and related climatic effect: diagnosis and modeling]. *Lyod i Sneg. [Ice and Snow].* 2012. № 2(122). P. 53–62 (in Russian).
- Mokhov I.I., Smirnov D.A.* El Niño–Southern Oscillation drives North Atlantic Oscillation as revealed with nonlinear techniques from climatic indices // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L03708. Doi:10.1029/2005GL024557.
- Petoukhov V., Semenov V.A.* A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *J. Geophys. Research – Atmospheres.* 2010. V. 115. D21111. Doi:10.1029/2009JD013568.
- Popova V.* Winter snow depth variability over northern Eurasia in relation to recent atmospheric circulation changes // *Int. Journ. of Climatol.* 2007. V. 27. P. 1721–1733.
- Popova V.V., Shmakin A.B.* Regionalnaya struktura kolebanij temperatury prizemnogo vozduha v severnoj Evrazii vo vtoroj polovine XX – nachale XXI vekov [Regional structure of fluctuations of land surface air temperature in North Eurasia in the second half of the 20th – beginning of the 21st century] *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics].* 2010. V. 46. № 2. P. 15–29 (in Russian).
- Pozo-Vazquez D., Esteban-Parra M.J., Rodrigo F.S., Castro-Diez Y.* A study of NAO variability and its possible non-linear influences on European surface temperature // *Climate Dynamics.* 2001. V. 17. P. 701–715.
- Rennert K.J., Wallace J.M.* Cross-Frequency Coupling, Skewness, and Blocking in the Northern Hemisphere Winter Circulation // *J. Climate.* 2009. V. 22. P. 5650–5666. Doi: 10.1175/2009JCLI2669.1.
- Semenov V.A.* Kolebaniya sovremennogo klimata, vyzvannye obratnymi svyaziyami v sisteme atmosfera – polyarnye l'dy – okean [Fluctuations of recent climate caused by feedbacks in the system of atmosphere-polar ice-ocean] *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and Applied Climatology].* 2015. № 1. P. 232–248 (in Russian). *Semenov V., Latif M.* Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012 // *Environ. Research Letters.* 2015. V. 10. 054020. Doi:10.1088/1748-9326/10/5/054020.
- Semenov V.A., Mokhov I.I., Latif M.* Vliyanie temperatury poverhnosti okeana i granits morskogo l'da na izmenenie regionalnogo klimata v Evrazii za poslednie desyatiletija [Influence of the ocean surface temperature and the sea ice borders on the regional climate change in Eurasia during last decades] // *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics].* 2012. V. 48. № 4. P. 403–421 (in Russian).
- Thompson D.W.J., Wallace J.M.* The arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 297–300.
- Trenberth K.E., Fasullo J.T.* An apparent hiatus in global warming? // *Earth's Future.* 2013. V. 1. P. 9–32. Doi:10.1002/2013EF000165.
- Vtoroy otsenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossiyskoj Federatsii. [The second assessment report on climate changes and their consequences in the Russian Federation] M.: Rosgidromet. 2014. 587 p. (in Russian).
- Zhang X., Sorteberg A., Zhang J., Gerdes R., Comiso J.C.* Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L22701. Doi:10.1029/2008GL035607.
- Zveryaev I.I., Gulev S.K.* Seasonality in secular changes and interannual variability of European air temperature during the twentieth century // *J. Geophysical Research.* 2009. V. 114. D02110. Doi:10.1029/2008JD010624.

Received 23.11.2016
Accepted 13.09.2017