

ТЕОРИЯ И СОЦИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ ГЕОГРАФИИ

УДК 911.551.583

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫЕ АРКТИЧЕСКИЕ ВТОРЖЕНИЯ И ЭЛЬ-НИНЬО–ЮЖНОЕ КОЛЕБАНИЕ

© 2018 г. А. В. Холопцев¹, В. А. Семенов^{2,3}, Н. К. Кононова², *

¹ Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова, Севастополь, Россия

² Институт географии РАН, Москва, Россия

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

*e-mail: NinaKononova@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.03.2017 г.

Принята в печать 22.03.2018 г.

Анализируются статистические связи межгодовых изменений суммарной длительности продолжительных арктических вторжений (ПАВ) в Атлантическом и Тихоокеанском секторе Северного полушария с образованием барических гребней между арктическим и субтропическими антициклонами с вариациями климатических индексов процесса Эль-Ниньо–Южное колебание (ЭНЮК). Межгодовые изменения этих индексов в XX в. значимо влияли на вариации суммарной длительности рассматриваемых арктических вторжений в Тихоокеанском секторе в феврале. Для большинства индексов это влияние было наиболее сильным при опережении на 2 месяца. Выявленные связи, в целом, не являются стационарными и меняются в зависимости от рассматриваемого периода. Связь индексов ЭНЮК и суммарной длительности арктических вторжений в Атлантическом секторе в ноябре и октябре значима и в XXI в. при временных сдвигах между этими процессами 0–4 месяца.

Ключевые слова: продолжительные арктические вторжения, Эль-Ниньо–Южное колебание, глобальные климатические индексы

DOI: 10.1134/S2587556618040088

Введение. Объект исследования данной работы — ПАВ, приводящие к образованию мало подвижных барических гребней, соединяющих как минимум на трое суток арктический антициклон с субтропическим.

ПАВ блокируют западный перенос воздушных масс и влияют на метеоусловия во многих регионах Северного полушария нашей планеты, а также жизнедеятельность их населения, часто являясь причиной аномальных погодных режимов, волн жары и холода. Поэтому выявление факторов влияния на изменениях суммарной длительности существования (далее СДС) в том или ином месяце является актуальной проблемой физической географии, метеорологии и климатологии.

Наибольший интерес решение данной проблемы представляет в отношении ведущих мод глобальной естественной климатической изменчивости, из которых главной является ЭНЮК [25].

ЭНЮК впервые описано Г.Т. Уолкером в 1923 г. как значительные квазипериодические (с максимумом в спектре изменчивости на периоде около 4-х лет) колебания температуры поверхности Ти-

хого океана (ТПО) в его экваториальной области и связанные с ними колебания атлантической дивергенции (АД) в тропической зоне [25].

Значимые отклики на ЭНЮК возникают не только в тропической зоне нашей планеты [15], но и в регионах умеренных широт [2, 10]. Последнее, а также расположение природной зоны, где могут существовать ПАВ [11, 18], позволяет предположить, что подобные отклики способны проявляться и в их характеристиках.

Выявлению откликов на ЭНЮК различных процессов в системе “океан–атмосфера” посвящены работы многих отечественных и зарубежных авторов. Тем не менее в оценках связи ЭНЮК с изменениями длительности существования ПАВ в тех или иных секторах Северного полушария остается значительная неопределенность.

Так как выявление подобных связей позволило бы использовать результаты мониторинга соответствующих характеристик ЭНЮК при прогнозировании вариаций ПАВ, а также связанных с ними гидрометеорологических и физико-географических процессов, проверка адекватности

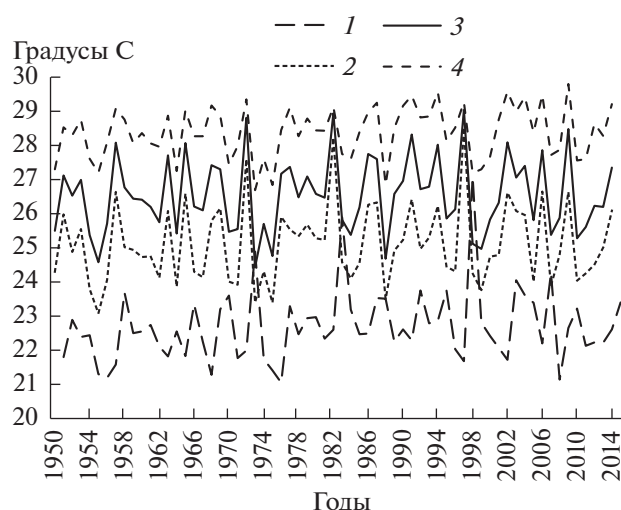


Рис. 1. Межгодовые изменения значений индексов Nino 34, Nino 1+2, Nino 3 и Nino 4 в декабре: 1 — Nino 1+2, 2 — Nino 3, 3 — Nino 34, 4 — Nino 4.

выдвинутой гипотезы представляет существенный теоретический и практический интерес.

Цель данной работы — выявление условий, при которых межгодовые изменения СДС ПАВ в каком-либо секторе Северного полушария значимо и устойчиво связаны с вариациями характеристик процесса ЭНЮК.

Материалы и методы. Установлено, что ЭНЮК проявляется во многих геофизических полях, но наиболее информативными его характеристиками являются индексы, определяемые особенностями распределения температуры поверхности океана (ТПО) и атмосферного давления (АД) над экваториальной зоной Тихого океана [2, 10, 12, 14, 15, 17]. Среди них наиболее часто используется Nino 34 [6]. Он определяется среднемесячной ТПО, осредненной для экваториального района Тихого океана (5° с.ш., 5° ю.ш.; 170° з.д., 120° з.д.). Также используются индексы Nino 1+2, Nino 3 и Nino 4, которые определяются аналогично, но для других районов Тихого океана.

Индекс Nino 1+2 характеризуется среднемесячными ТПО, осредненными для района ($0, 10^{\circ}$ ю.ш.; 90° з.д., 80° з.д.). Такая же характеристика района (5° с.ш., 5° ю.ш.; 150° з.д., 90° з.д.) рассматривается как индекс Nino 3. Аналогичная характеристика района (5° с.ш., 5° ю.ш.; 160° в.д., 150° з.д.) представляет собой индекс Nino 4.

В теплой фазе ЭНЮК значения этих индексов превышают средние уровни. В фазе Ла-Нинья значения данных индексов ниже их.

Особенности распределения АД над экваториальной зоной Тихого океана характеризуются значением индекса Южного колебания — SOI, который предложен Г.Т. Уолкером в 1924 г. [26].

Упомянутый индекс вычисляется как разность АД между Таити и Дарвином (Австралия). Отрицательные значения SOI соответствуют фазе Эль-Ниньо, а положительные — фазе Ла-Нинья.

Используют также комбинированные индексы [24, 27], в том числе Best и ONI. Информация о значениях этих индексов за период с января 1950 г. содержится в базе данных [29]. А многолетний ход упомянутых индексов характеризуется существенным подобием, но каждому из них присущи свои особенности. В качестве примера, на рис. 1 показаны межгодовые изменения значений индексов Nino 34, Nino 1+2, Nino 3 и Nino 4 в декабре.

Как видно из рис. 1, несмотря на то что межгодовые изменения индексов Nino во многом подобны, амплитуды их экстремумов в некоторые годы заметно различаются. Не менее информативны различия аналогичных изменений и для других индексов ЭНЮК.

В 1946 г. Б.Л. Дзердзеевский, В.М. Курганская и З.М. Витвицкая предложили типизацию атмосферной циркуляции Северного полушария. Был выделен 41 элементарный циркуляционный механизм (далее ЭЦМ) [5]. Каждому ЭЦМ соответствует динамическая схема [4, 5]. Наличие динамических схем позволяет судить не только о циркуляции атмосферы над Северным полушарием, но и над его секторами.

Основными признаками, по которым ЭЦМ с антициклоном на полюсе различаются между собой, служат количество и расположение барических гребней, соединяющих арктический антициклон с тем или иным субтропическим антициклоном [4].

В качестве примеров, демонстрирующих различия между ЭЦМ, на рис. 2 приведены динамические схемы ЭЦМ 106 и 12а.

Рис. 2а показывает, что при ЭЦМ 106 ПАВ происходят в Европейский и Американский секторы. Как видно из материалов рис. 26, в период действия ЭЦМ 12а барические гребни, обусловленные ПАВ, существуют в Атлантическом, Сибирском/Дальневосточном, Тихоокеанском и Американском секторах (всего 4 гребня).

Для каждого сектора Северного полушария определены ЭЦМ, при которых в нем существуют подобные барические гребни. Перечни ЭЦМ с ПАВ для каждого сектора, в соответствии с [4], представлены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что наибольшее количество ЭЦМ, при которых существуют подобные барические гребни, соответствует Сибирскому и Дальневосточному секторам, а наименьшее — Европейскому сектору.

По табл. 1 и Календарю последовательной смены ЭЦМ [28] установлены СДС субполярной

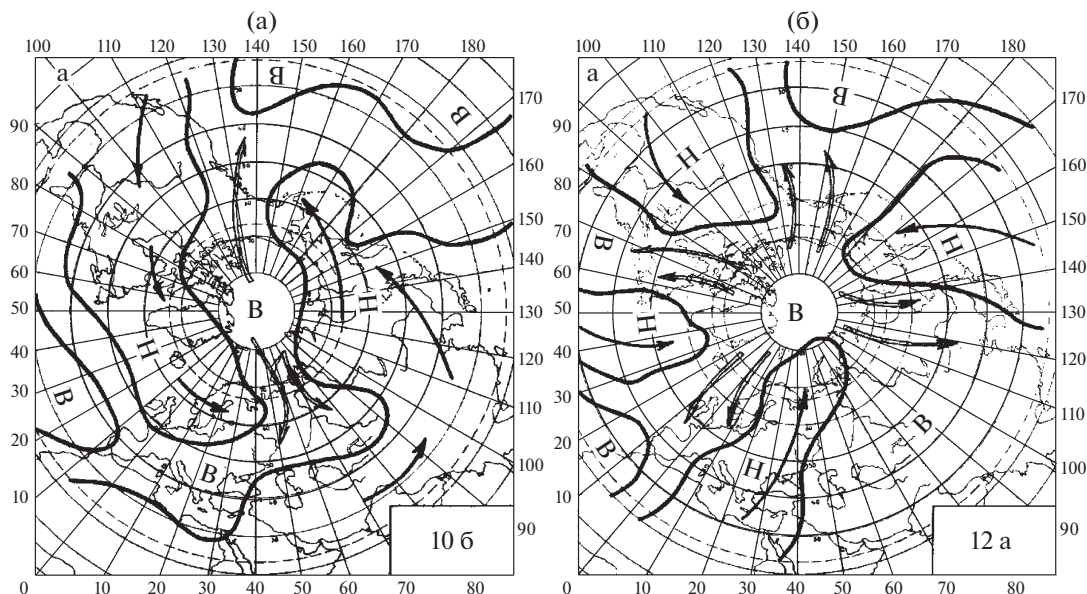


Рис. 2. Динамические схемы ЭЦМ: (а) 10б; (б) 12а.

дивергенции (СПД) в том или ином месяце всех барических гребней, которые выявлены в секторах Северного полушария с 1 января 1950 г. по 31 декабря 2015 г.

Учтено, что барический гребень в некотором секторе может существовать не только в период действия одного ЭЦМ, указанного в табл. 1, но и при его смене другим ЭЦМ. Если после завершения периода действия одного ЭЦМ возникает следующий ЭЦМ, который также упомянут в таблице, то продолжительность существования соответствующего барического гребня надо вычислять как сумму периодов действия этих ЭЦМ.

За начало периода существования ПАВ в некотором секторе Северного полушария принята дата начала первого из подобных ЭЦМ, а за его окончание — дата завершения последнего из них. Если начало этого периода приходится на один месяц, а его окончание — на другой, при вычислении весь он относился к тому месяцу, которому соответствует его большая часть.

С помощью описанной методики определены значения СДС в каждом месяце всех ПАВ, выявленных в том или ином секторе, для отрезка времени 1950–2015 гг.

Предполагалось, что блокирующий эффект, создаваемый ПАВ, существенен, если длительность его существования не менее 3 суток. Графики распределения ПАВ в каждом секторе за 1950–2015 гг. по их продолжительности приведены на рис. 3.

Как следует из материалов рис. 3, в любых секторах за 1982–2015 гг. преобладали процессы длительностью 3 суток. Значение СДС ПАВ в каком-либо секторе, которое соответствует некоторому месяцу, определено как сумма периодов существования ПАВ, относящихся к ним. Из полученных таким образом месячных значений СДС ПАВ для каждого сектора сформированы временные ряды, которые анализируются в данной работе.

Для оценки влияния на изучаемые связи выбора минимально возможной продолжительности

Таблица 1. Блокирующие ЭЦМ для различных секторов Северного полушария

Сектор	Блокирующие ЭЦМ
Атлантический (60° W – 0)	3, 8а, 8бл, 8гз, 8гл, 9а, 12а, 12бз, 12бл
Европейский (0–60° E)	4а, 4б, 4в, 8бз, 10а, 10б, 12вз
Сибирский (60° E – 120° E)	5а, 5б, 5в, 5г, 8бз, 8бл, 8вз, 8вл, 8гз, 8гл, 11а, 11б, 11в, 11г, 12а, 12бз, 12бл, 12вз, 12вл, 12г
Дальневосточный (120° E – 170° E)	5а, 5б, 5в, 5г, 8бз, 11а, 11б, 11в, 11г, 12а, 12бз, 12вз, 12вл, 12г
Тихоокеанский (170° E – 120° W)	6, 8вз, 8вл, 9а, 12а, 12г
Американский (120° W – 60° W)	7аз, 7ал, 7бз, 7бл, 8а, 10а, 10б, 11а, 11б, 11в, 11г, 12а, 12бз, 12бл, 12вз, 12вл, 12г

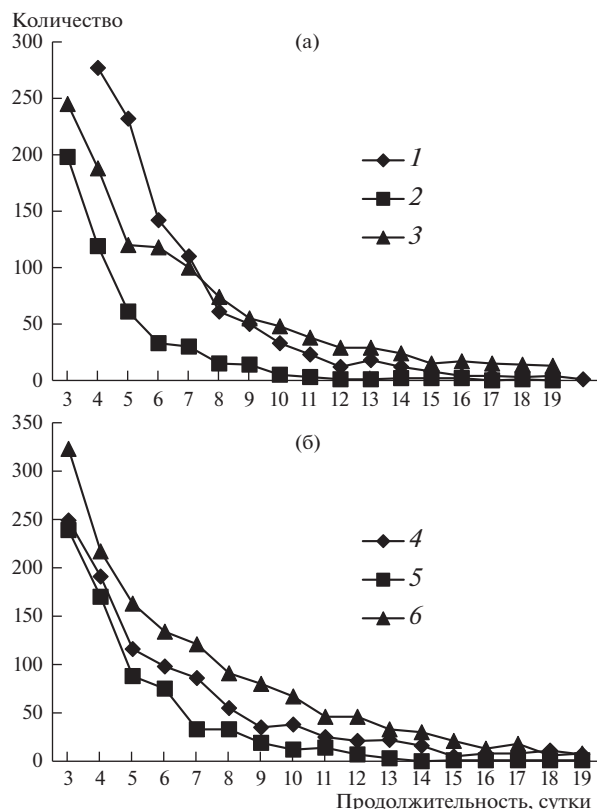


Рис. 3. Распределение ПАВ по их продолжительности в секторах Северного полушария в 1950–2015 гг.: 1 – в Атлантическом, 2 – в Европейском, 3 – в Сибирском, 4 – в Дальневосточном, 5 – в Тихоокеанском, 6 – в Американском.

ПАВ для каждого сектора и каждого месяца сформировано по два ряда месячных значений их СДС.

Первый ряд образуют значения СДС всех ПАВ. Значения, продолжительность существования которых составляла не менее 5 суток, образуют второй ряд. С помощью полученных рядов изучена зависимость от времени годовых значений СДС ПАВ для каждого сектора.

В качестве примера, такая зависимость для Атлантического, Тихоокеанского и Европейского сектора, соответствующая продолжительности ПАВ 3 суток и более, приведена на рис. 4.

На рис. 4а видно, что представленные процессы стационарными не являются. В период 1950–1990 гг. и в Тихоокеанском, и Атлантическом секторе диапазон изменений годовых СДС ПАВ велик. В период 1990–2015 гг. доминируют тенденции увеличения этих показателей.

Аналогичными свойствами обладают СДС ПАВ в Сибирском, Дальневосточном и Американском секторе. Как следует из рис. 4б, в Европейском секторе за 1950–1970 гг. значения СДС ПАВ снижались, в 1970–1983 гг. они росли, а в 1983–2015 гг. вновь уменьшались.

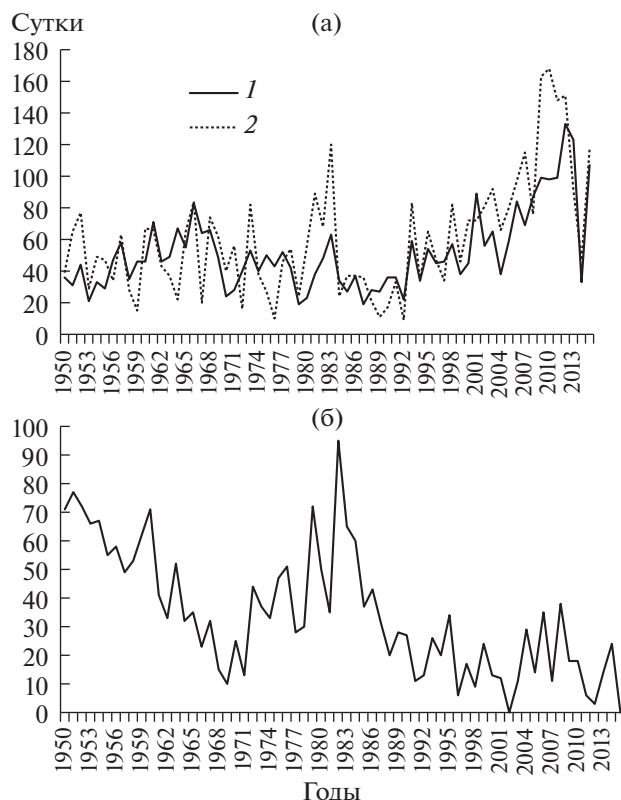


Рис. 4. Годовая СДС ПАВ длительностью 3 суток и более в секторах: (а) 1 – в Тихоокеанском, 2 – в Атлантическом; (б) в Европейском.

Выявленные закономерности соответствуют представлениям [8] об изменениях во второй половине XX–начале XXI в. СДС ЭЦМ, при которых в тех или иных секторах существуют ПАВ, что свидетельствует об адекватности методики их выявления.

С использованием сформированных временных рядов месячных СДС ПАВ для каждого сектора Северного полушария изучены их статистические связи с межгодовыми изменениями всех рассматриваемых индексов ЭНЮК в том или ином месяце. При этом предполагалось, что изменения индексов ЭНЮК могут опережать по времени вариации СДС ПАВ на 0–11 месяцев.

В рассматриваемых временных рядах удалены линейные тренды, что позволило применить метод корреляционного анализа [1] и критерий Стьюдента [7] для оценки статистической значимости трендов. Связь признавалась значимой, если значение коэффициента корреляции сопоставляемых фрагментов временных рядов превышало по модулю уровень 95% порога статистической значимости. При определении значения этого порога учитывалось число степеней свободы сопоставляемых рядов [1].

Таблица 2. Значения коэффициента корреляции временных рядов индексов ЭНЮК с СДС ПАВ в Тихоокеанском секторе в феврале за 1950–2014 гг.

ПАВ (3 суток и более) в феврале. 95% порог=0.24									
Сдвиг (мес)	NINO1+2	NINO3	NINO4	NINO34	BEST	MEI	ONI	TNI	SOI
0	–0.272	–0.371	–0.320	–0.378	–0.398	–0.321	–0.379	0.213	0.338
1	–0.263	–0.382	–0.358	–0.402	–0.338	–0.316	–0.396	0.236	0.275
2	–0.294	–0.314	–0.301	–0.335	–0.274	–0.333	–0.308	0.178	0.251
3	–0.273	–0.254	–0.284	–0.267	–0.273	–0.326	–0.286	0.209	0.284
4	–0.255	–0.233	–0.313	–0.273	–0.288	–0.332	–0.252	0.225	0.259
5	–0.127	–0.213	–0.319	–0.244	–0.273	–0.308	–0.256	0.257	0.298
6	–0.082	–0.203	–0.324	–0.286	–0.278	–0.275	–0.271	0.273	0.312
7	–0.008	–0.189	–0.375	–0.318	–0.249	–0.244	–0.309	0.294	0.218
8	–0.038	–0.209	–0.358	–0.321	–0.314	–0.254	–0.302	0.313	0.295
9	0.012	–0.089	–0.349	–0.230	–0.253	–0.163	–0.265	0.330	0.242
10	0.047	–0.011	–0.341	–0.217	–0.162	–0.126	–0.217	0.325	0.075
11	–0.009	–0.090	–0.260	–0.196	–0.152	–0.129	–0.183	0.340	0.094
ПАВ (5 суток и более) в феврале. 95% порог=0.24									
Сдвиг (мес)	NINO1+2	NINO3	NINO4	NINO34	BEST	MEI	ONI	TNI	SOI
0	–0.243	–0.322	–0.269	–0.335	–0.282	–0.265	–0.338	0.169	0.204
1	–0.217	–0.334	–0.315	–0.357	–0.254	–0.267	–0.350	0.207	0.187
2	–0.184	–0.244	–0.254	–0.279	–0.161	–0.249	–0.250	0.150	0.112
3	–0.147	–0.171	–0.226	–0.204	–0.184	–0.246	–0.223	0.206	0.175
4	–0.159	–0.147	–0.250	–0.198	–0.224	–0.262	–0.186	0.247	0.210
5	–0.035	–0.130	–0.264	–0.183	–0.194	–0.232	–0.193	0.294	0.237
6	0.017	–0.126	–0.309	–0.235	–0.228	–0.210	–0.223	0.312	0.253
7	0.045	–0.135	–0.375	–0.290	–0.218	–0.170	–0.272	0.331	0.200
8	0.020	–0.158	–0.351	–0.299	–0.283	–0.169	–0.267	0.338	0.238
9	0.067	–0.034	–0.309	–0.186	–0.216	–0.128	–0.234	0.351	0.213
10	0.061	0.012	–0.337	–0.200	–0.172	–0.100	–0.188	0.338	0.091
11	0.0320	–0.026	–0.271	–0.177	–0.151	–0.110	–0.166	0.347	0.105

Примечание. Полужирным шрифтом выделены те значения коэффициента корреляции, которые превышают статистический порог значимости 95% (0.24).

Существенным свойством связей, которое во многом определяет возможность их использования в задачах прогнозирования, является их устойчивость к изменениям временных интервалов, для которых она оценивается. Связь между временными рядами изучаемого процесса и некоторого его фактора рассматривается как устойчивая при выполнении следующих условий:

1) она признана значимой для всего изучаемого периода;

2) если при увеличении года начала сопоставляемых фрагментов временных рядов значение модуля рассчитанного для них коэффициента корреляции возрастает.

Связь, значимость которой установлена для всего изучаемого периода времени, может рассматриваться как устойчивая, если она растет. Последнее позволяет предположить, что, если в

будущем факторы, которые обуславливают данную связь, не изменятся, то она сохранит свою значимость, и ее учет при прогнозировании может быть результативным.

Для проверки наличия у выявленных связей подобного свойства необходимо проанализировать зависимость их силы от времени начала фрагментов изучаемых временных рядов. В качестве частей этого периода в данной работе рассматривались всевозможные вложенные в него отрезки времени длиной от 16 до 64 лет. Как характеристика связи изучаемых процессов, на том или ином отрезке времени рассматривалось значение коэффициента их корреляции.

Результаты исследования и их анализ. В соответствии с описанной методикой, изучены статистические связи между различными индексами ЭНЮК для каждого месяца, а также запаздываю-

Таблица 3. Значения коэффициента корреляции временных рядов индексов ЭНЮК с СДС ПАВ в ноябре в Атлантическом секторе за 1950–2014 гг.

ПАВ (3 суток и более) в ноябре. 95% порог=0.24									
Сдвиг (мес)	NINO1+2	NINO3	NINO4	NINO34	BEST	MEI	ONI	TNI	SOI
0	–0.323	–0.326	–0.302	–0.318	–0.335	–0.359	–0.300	0.125	0.344
1	–0.318	–0.339	–0.288	–0.311	–0.329	–0.372	–0.286	0.101	0.325
2	–0.262	–0.248	–0.297	–0.251	–0.346	–0.352	–0.265	0.090	0.326
3	–0.156	–0.207	–0.252	–0.255	–0.299	–0.297	–0.230	0.095	0.305
ПАВ (3 суток и более) в ноябре. 95% порог=0.24									
Сдвиг (мес)	NINO1+2	NINO3	NINO4	NINO34	BEST	MEI	ONI	TNI	SOI
0	–0.323	–0.326	–0.302	–0.318	–0.335	–0.359	–0.300	0.125	0.344
1	–0.318	–0.339	–0.288	–0.311	–0.329	–0.372	–0.286	0.101	0.325
2	–0.262	–0.248	–0.297	–0.251	–0.346	–0.352	–0.265	0.090	0.326
3	–0.156	–0.207	–0.252	–0.255	–0.299	–0.297	–0.230	0.095	0.305
4	–0.03	–0.149	–0.17	–0.205	–0.223	–0.239	–0.200	0.117	0.202
ПАВ (5 суток и более) в феврале. 95% порог=0.24									
Сдвиг (мес)	NINO1+2	NINO3	NINO4	NINO34	BEST	MEI	ONI	TNI	SOI
0	–0.209	–0.226	–0.249	–0.232	–0.264	–0.248	–0.211	0.172	0.258
1	–0.216	–0.207	–0.228	–0.201	–0.256	–0.256	–0.187	0.121	0.214
2	–0.190	–0.132	–0.232	–0.143	–0.269	–0.245	–0.162	0.090	0.253
3	–0.142	–0.139	–0.184	–0.167	–0.199	–0.191	–0.134	0.092	0.207
4	0.005	–0.079	–0.080	–0.117	–0.117	–0.118	–0.098	0.099	0.040

Примечание. Полужирным шрифтом выделены те значения коэффициента корреляции, которые превышают статистический порог значимости 95% (0.24).

щими на 0–12 месяцев месячными СДС рассматриваемых ПАВ в различных секторах Северного полушария для периода 1950–2014 гг.

Установлено, что сила изучаемых связей для процессов длительностью не менее 3 суток больше, чем для процессов длительностью не менее 5 суток. Рассматриваемые связи являются наиболее значимыми и устойчивыми при условии, что ПАВ располагаются в Тихоокеанском и Атлантическом секторе.

В Тихоокеанском секторе изучаемые связи обладают указанными свойствами, если рассматриваются изменения февральских СДС ПАВ.

В табл. 2 приведены значения коэффициента корреляции временных рядов всех индексов ЭНЮК, а также рядов СДС в феврале ПАВ в Тихоокеанском секторе продолжительностью 3 суток и более, а также 5 суток и более. Они рассчитаны для рядов индексов ЭНЮК за разные месяцы за 1950–2014 гг. для случаев, которые опережают ряды СДС ПАВ на 0–11 месяцев.

Как следует из табл. 2, связи вариаций индексов ЭНЮК с изменениями СДС в феврале ПАВ в Тихоокеанском секторе сильнее для ПАВ продолжительностью 3 суток и более. Для всех индексов, кроме TNI, они наиболее сильны при сдвигах по времени на 1 или 2 месяца.

Для индекса TNI они наиболее сильны при сдвигах 9 и 11 месяцев. При столь же значительных временных сдвигах значимые связи выявлены лишь для индекса NINO 4. Следовательно, в задачах прогнозирования изменений месячных СДС ПАВ в Тихоокеанском секторе указанные индексы наиболее перспективны. Для ПАВ в Атлантическом секторе рассматриваемые связи значимы и устойчивы лишь для ноября. Для этого случая в табл. 3 приведены значения коэффициента корреляции временных рядов индексов ЭНЮК с рядами СДС ПАВ.

Из табл. 3 видно, что наиболее сильны связи межгодовых вариаций за 1950–2014 гг. СДС ноябрьских ПАВ длительностью не менее 3 суток в Атлантическом секторе с изменениями индексов MEI и Best.

Из табл. 2 и 3 видно, что ноябрь, для которого межгодовые изменения СДС ПАВ в Атлантическом секторе значимо связаны с вариациями рассматриваемых индексов ЭНЮК, опережает по времени февраль, для которого аналогичные связи выявлены в Тихоокеанском секторе. Поэтому связи, представленные в табл. 3, не могут быть следствием наличия влияния изменений СДС ПАВ в Тихоокеанском секторе на вариации их СДС в Атлантическом секторе.

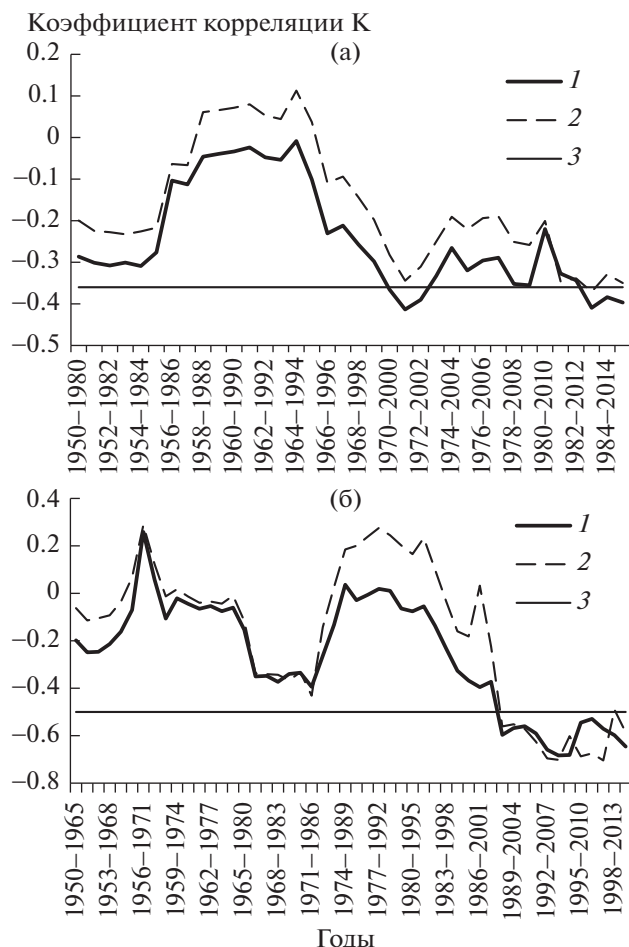


Рис. 5. Скользящие средние значений коэффициента корреляции межгодовых изменений СДС ноябрьских ПАВ в Атлантическом секторе продолжительностью 3 суток и более с опережающими их по времени вариациями ГКИ NINO34: (а) 30-летние; (б) 16-летние: 1 – без смещения, 2 – опережение 3 месяца, 3 – уровень значимости 95%.

Последнее позволяет предположить, что связи, представленные в табл. 3, обусловлены влиянием на вариации СДС ПАВ в Атлантическом секторе иного процесса, который связан с ЭНЮК.

Установлено, что в Атлантическом секторе зависимость силы выявленных связей от времени является возрастающей при любой продолжительности отрезков времени, по которым она оценивалась. Как пример, на рис. 5 представлены 30- и 16-летние скользящие средние значений коэффициента корреляции межгодовых изменений СДС в Атлантическом секторе ноябрьских ПАВ длительностью 3 суток и более с вариациями индекса NINO 34.

Как видно на рис. 5, в коэффициентах корреляции рассматриваемых процессов, начиная с 1977 г., присутствуют убывающие тренды. При

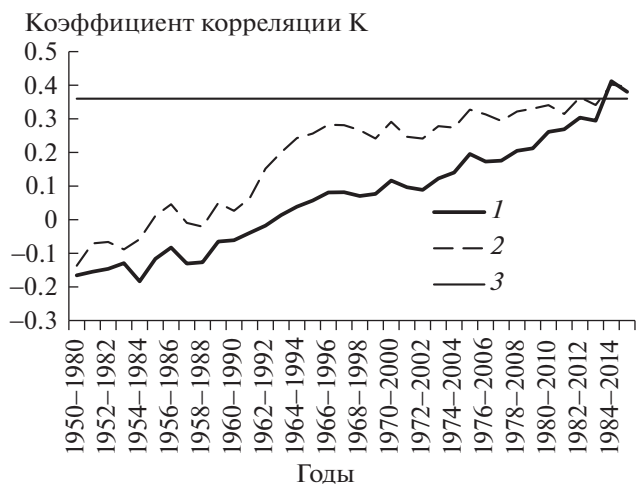


Рис. 6. 30-летние скользящие средние значений коэффициента корреляции межгодовых изменений СДС ПАВ длительностью не менее 3 суток в Атлантическом секторе в октябре с опережающими их на 0 и 3 месяца вариациями ГКИ NINO34: 1 – 0 месяцев, 2 – 3 месяца, 3 – уровень значимости 95%.

этом на рис. 5а видно, что, начиная с 1982 г., при сдвигах между изучаемыми процессами 0 и 3 месяца значения этого коэффициента для “скользящих окон” длиной 30 лет по модулю превосходят уровень 95% порога статистической значимости.

Из рис. 5б следует, что значения этого же коэффициента, рассчитанные для скользящих окон длиной 16 лет, превосходят по модулю соответствующий уровень 95% порога при временных сдвигах между изучаемыми процессами 0 и 3 месяца, начиная с 1988 г.

Следовательно, данные связи обладают устойчивостью значимости к длине и временным сдвигам интервала, для которого они оцениваются, что позволяет допускать целесообразность их учета в задачах прогнозирования.

Таковыми же свойствами обладает зависимость, рассчитанная для скользящих окон длиной 20 лет и менее, которые соответствуют ноябрьским ПАВ в том же секторе продолжительностью 5 суток и более.

При длинах скользящих окон 40 лет и менее значимыми и устойчивыми являются также связи межгодовых вариаций индекса NINO 34 с изменениями СДС ПАВ и в октябре.

Как пример, на рис. 6 представлены 30-летние скользящие средние значений коэффициента корреляции межгодовых изменений СДС ПАВ в Атлантическом секторе в октябре с опережающими их вариациями индекса NINO 34.

Рис. 6 показывает, что сила связи СДС октябрьских ПАВ в Атлантическом секторе с вариациями индекса NINO 34, которые опережают их на 0 и 3 месяца, в рассматриваемый период воз-



Рис. 7. 30-летние скользящие средние коэффициента корреляции межгодовых изменений СДС ПАВ в Тихоокеанском секторе в феврале с опережающими их на 0 и 3 месяца вариациями ГКИ NINO 3.4.

растала. При этом, начиная с 1983 г., подобные связи являются статистически значимыми. Указанные особенности свидетельствуют об устойчивости на данном интервале значимости связей. Наличие данного свойства позволяет также предполагать возможность использования выявленной связи при прогнозировании.

Аналогичные расчеты для Тихоокеанского сектора даны на рис. 7.

На рис. 7, для 30-летних скользящих средних, начинающихся до 1975 г., рассматриваемая связь является значимой при сдвигах между рассматриваемыми процессами 0 и 3 месяца. Для “окон”, начинающихся позже 1977 г., она значимой не является. Данный вывод справедлив и для связей между СДС ПАВ в Тихоокеанском секторе с любыми рассматриваемыми индексами ЭНЮК в другие месяцы.

Обсуждение полученных результатов. Впервые исследование связей между вариациями ТПО акваторий приэкваториальной зоны Тихого океана, которые обусловлены ЭНЮК, с метеорологическими процессами в регионах, удаленных от экватора, осуществлено Я. Бьеркнесом [19]. Принято считать, что влияние ЭНЮК на атмосферную циркуляцию в умеренных широтах обусловлено процессами, происходящими в меридиональной вертикальной ячейке Хэдли [19, 20, 24], а также распространением волн Россби [22].

ЭНЮК порождает существенные вариации распределения ТПО в районах приэкваториальной зоны Тихого океана. Вследствие этих вариаций над такими районами изменяется АД, что приводит к возбуждению волны Россби, которая распространяется от экватора, порождая анома-

лии во внетропической циркуляции атмосферы как Северного, так и Южного полушария [16]. Возникают подобные аномалии и над северными регионами Тихого океана [6], над которыми могут существовать ПАВ.

Откликом на повышение ТПО приэкваториальной зоны Тихого океана в положительной фазе ЭНЮК является снижение АД в Алеутском минимуме, а также повышение АД над Канадой [21, 23].

В период отрицательной фазы ЭНЮК над Чукотским и Беринговым морями АД повышается, что и приводит к увеличению продолжительности существования ПАВ. Последнее объясняет наличие значимой корреляции межгодовых вариаций ПАВ в Тихоокеанском секторе со всеми рассматриваемыми индексами.

С учетом скорости распространения в атмосфере волн Россби отклик на изменения распределения ТПО Тихого океана в декабре, которые обусловлены ЭНЮК, запаздывает на 1–2 месяца. Поэтому наиболее сильная связь межгодовых вариаций индексов с изменениями СДС тихоокеанских ПАВ наблюдается в феврале. Причиной выявленного ее ослабления может стать усиление влияния других факторов. Один из них – Тихоокеанская декадная осцилляция [29].

Влияние ЭНЮК на ПАВ в Северном полушарии ощущается не только в Тихоокеанском секторе. Выявлены отклики на него, которые проявляются также в Атлантическом и Европейском секторе [10, 14], хотя некоторыми авторами влияние ЭНЮК на погоду в России отрицается [3].

Установлено, что ЭНЮК оказывает влияние на глобальный температурный градиент экватор – полюс, а также на шторм-треки североатлантических и средиземноморских циклонов. Выявлена связь ЭНЮК с Североатлантическим колебанием (далее САК) [2, 10], что позволяет предположить, что оно обуславливает влияние ЭНЮК на изменения СДС ПАВ в Атлантическом секторе.

Для проверки адекватности данного предположения проанализированы статистические связи изучаемого процесса в Атлантическом секторе с вариациями индекса САК, а также последних с межгодовыми изменениями индексов ЭНЮК. Для этого использована база данных NOAA [29].

Установлено, что связь межгодовых изменений СДС ПАВ в Атлантическом секторе с вариациями индекса САК, которые оценены по отрезкам временных рядов длиной от 16 до 65 лет, значимы, а корреляция отрицательна, если они совпадают по времени. Как пример, на рис. 8 приведен годовой ход значений коэффициента корреляции рассматриваемых процессов, оцененных за 1950–2014 гг.

Из материалов рис. 8 следует, что отрицательная корреляция межгодовых изменений состоя-

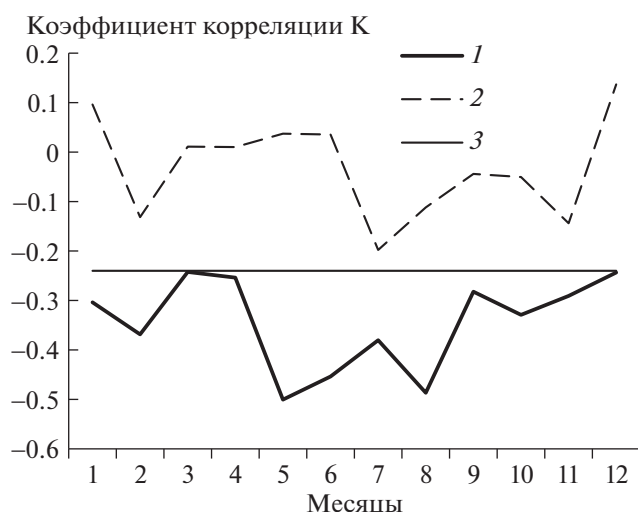


Рис. 8. Годовой ход значений коэффициента корреляции межгодовых изменений СДС ПАВ в Атлантическом секторе с вариациями индекса САК, оцененных за период 1950–2014 гг.: 1 — сдвиг 0 месяцев, 2 — сдвиг 1 месяц, 3 — уровень значимости 95%.

ния САК с вариациями СДС ПАВ в Атлантическом секторе значима лишь при нулевых сдвигах между ними.

Значимая статистическая связь в период 1950–2014 гг. межгодовых изменений индекса САК с вариациями состояния ЭНЮК существует только в ноябре и если эти процессы рассматриваются на одном и том же отрезке времени.

Установлено, что связи САК и ЭНЮК, выявленные в XX в. [2, 10], обладают устойчивостью и продолжают существовать также в XXI в.

Сопоставление оценок значений коэффициента корреляции между индексами ЭНЮК (см. табл. 3), а также САК и СДС ПАВ показывает наличие соответствия между ними. Значимая корреляция межгодовых изменений ноябрьских значений индексов САК и SOI отрицательна, как и корреляция межгодовых изменений ноябрьских значений индексов САК и СДС ПАВ в Атлантическом секторе. Поэтому корреляция межгодовых изменений ноябрьских значений индекса SOI и вариаций СДС ПАВ в ноябре в Атлантическом секторе значима и положительна.

Таковы же причины значимой отрицательной корреляции межгодовых изменений ноябрьских значений других индексов ЭНЮК с вариациями продолжительности существования в ноябре ПАВ в Атлантическом секторе. Следовательно, рис. 8 и корреляции с индексом САК подтверждают адекватность рассматриваемого предположения.

Выводы. Межгодовые изменения состояния ЭНЮК в XX в. значимо влияли на ПАВ в Тихоокеанском секторе, СДС которых соответствовала февралю.

Для большинства индексов это влияние было наиболее сильным при сдвигах между процессами 2 месяца. В XXI в. оно значимым уже не является.

Связи ЭНЮК и ПАВ в Атлантическом секторе значимы и в XXI в., если их СДС рассматривается в ноябре и октябре, а временные сдвиги между этими процессами 0–4 месяца. Их сила максимальна, если эти сдвиги равны нулю. Данные связи обладают устойчивостью к временным сдвигам и усиливаются, что позволяет предполагать возможность их эффективного использования при прогнозировании СДС существующих здесь ПАВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: ЮНИТИ, 1998. 1022 с.
2. Воскресенская Е.Н., Полонский А.Б. Северо-Атлантическое колебание и явления Эль-Ниньо // Морской гидрофизический журн. 1992. № 4. С. 23–30.
3. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Клещенко Л.К., Аристова Л.Н. О связи климатических аномалий на территории России с явлением Эль-Ниньо—Южное колебание // Метеорология и гидрология. 1999. № 5. С. 32–51.
4. Дзердзеевский Б.Л. Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии: Материалы метеорологических исследований. М.: Изд. ИГ АН СССР и Междувед. Геофиз. комитета при Президиуме АН СССР, 1968. 240 с.
5. Дзердзеевский Б.Л., Курганская В.М., Витвицкая З.М. Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // Труды научно-исслед. учреждений Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сер. 2. Синоптическая метеорология. Вып. 21. Центральный институт прогнозов. М.—Л.: Гидрометиздат, 1946. 80 с.
6. Железнова И.В., Гущина Д.Ю. Отклик глобальной циркуляции атмосферы на два типа Эль-Ниньо // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 36–50.
7. Закс Ш. Теория статистических выводов / пер. с англ. яз. Е.В. Чепурина / под ред. Ю.К. Беляева. М.: Мир, 1971. 626 с.
8. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому / отв. ред. А.Б. Шамакин. М.: ИГ РАН. Воентехиниздат, 2009. 372 с.
9. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
10. Мохов И.И., Акперов М.Г., Прокофьева М.А. Блокнги в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // ДАН. 2013. Т. 449. № 5. С. 1–5.
11. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Исследование взаимного влияния процессов Эль-Ниньо—Южное колебание и Северо-Атлантического и Арктического колебаний нелинейными методами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 5. С. 650–667.

12. *Мохов И.И., Тимажеев А.В.* Климатические аномалии в регионах Евразии: эффекты явлений Эль-Ниньо / Ла-Нинья // ДАН. 2013. Т. 453. № 2. С. 211–214.
13. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч. III. Служба морских гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 143 с.
14. *Нестеров Е.С.* Изменчивость характеристик атмосферы и океана в атлантико-европейском регионе в годы событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья // Метеорология и гидрология. 2000. № 8. С. 74–83.
15. *Петросяни М.А., Семенов Е.К., Гущина Д.Ю., Соколикхина Е.В., Соколикхина Н.Н.* Циркуляция атмосферы в тропиках: климат и изменчивость. М.: Макс Пресс, 2005. 670 с.
16. *Петросяни М.А., Гущина Д.Ю.* Крупномасштабное взаимодействие глобальной циркуляции атмосферы с температурой поверхности экваториального Тихого океана // Метеорология и гидрология. 1998. № 12. С. 5–22.
17. *Полонский А.Б.* Роль океана в изменениях климата. Киев: Наукова думка, 2008. 184 с.
18. *Шакина Н.П., Иванова А.Р.* Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирование // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 5–18.
19. *Bjerknes J.* A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of Ocean temperature // Tellus. 1966. V. 18. № 4. P. 820–829.
20. *Bjerknes J.* Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific // Mon. Wea. Rev. 1969. V. 97. P. 163–172.
21. *Held I.M.S., Lyons S.W., Nigam S.* Transients and the extratropical response to El Nino // J. Atmos. Sci. 1989. V. 46. P. 163–174.
22. *Horel J.D., Wallace J.M.* Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation // Mon. Wea. Rev. 1981. V. 109. P. 813–829.
23. *Lau N.-C.* Modeling the seasonal dependence of the atmospheric response to El Ninos in 1962–1976 // Mon. Wea. Rev. 1985. V. 113. P. 1970–1996.
24. *Trenberth K.E., Stepaniak D.P.* Indices of El Nino evolution // J. Clim., 2001. V. 14. P. 1601–1624.
25. *Walker G.T.* Correlation in seasonal variations of weather, VIII. A preliminary study of world weather // Memoirs of the India Meteorological Department. 1923. V. 24. № 4. P. 75–131.
26. *Walker G.T.* Correlation in seasonal variations of weather, IX. A further study of world weather // Memoirs of the India Meteorological Department. 1924. V. 24. № 9. P. 275–333.
27. *Wolter K., Timlin M.S.* El-Nino / Southern Oscillation behavior since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext) // Intl. J. Climatology. 2011. № 31 (7). P. 1074–1087.
28. Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в XX — начале XXI века. URL: <http://www.atmospheric-circulation.ru>.
29. NOAA database on the values of global climatic indices. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/data/climateindices/list/forinfo>.

Long arctic invasion and El-Nino–Southern Oscillation

A. V. Kholoptsev¹, V. A. Semenov^{2, 3}, and N. K. Kononova^{2, *}

¹ Sevastopol Branch, Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia

² Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: NinaKononova@yandex.ru

Received March 09, 2017

Accepted March 22, 2018

The statistical relationships of interannual changes in the total duration of Long Arctic Invasion in Atlantic and Pacific sectors of the Northern Hemisphere with the formation of baric ridges between the Arctic and subtropical anticyclones with variations of climate indices of the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) process are analyzed. Interannual changes in these indices in the 20th century significantly influenced the variations in the total duration of the considered Arctic invasions in the Pacific sector in February. For most indices, this effect was strongest if their ranks, ahead of the ranks of the processes studied for two months. The revealed relationships, in general, are not stationary and vary depending on the period under review. The relationship of ENSO indices and the total duration of the Arctic invasions in the Atlantic sector in November and October are significant in the 21st century, when the time shifts between these processes were 0–4 months.

Keywords: long arctic invasion, El-Nino–Southern Oscillation, global climatic indices.

REFERENCES

1. Aivazian S.A., Mhitarian V.S. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki* [Applied Statistics and Econometrics Fundamentals]. Moscow: YUNITY Publ., 1998. 1022 p.
2. Voskresenskaya E.N., Polonsky A.B. North Atlantic Oscillation and El Niño. *Morskoi Gidrofizicheskii Zhurnal*, 1992, no. 4, pp. 23–30. (In Russ.).
3. Gruza G.V., Rankova E.J., Kleschenko L.K., Sokolikhina E.V., Sokolikhina N.N. On the relationship be-

- tween climate anomalies in Russia with El Niño-Southern Oscillation. *Meteorol. Gidrol.*, 1999, no. 5, pp. 32–51. (In Russ.).
4. Dzerdzeevskii B.L. The circulation mechanisms in the atmosphere of the Northern Hemisphere in the twentieth century. *Materialy meteorologicheskikh issledovaniy*. Moscow: IG AN SSSR, Soviet Geophysical Committee, 1968. 240 p. (In Russ.).
 5. Dzerdzeevskii B.L., Kurganskaya V.M., Vitvitskaya Z.M. Classification of circulation mechanisms in the Northern Hemisphere and characteristics of synoptic seasons. In *Trudy n.-i. Uchrezhdenii Gl. Upr. Gidrometeorol. Sluzhby pri Sovete Ministrov SSSR. Ser. 2. Sinopticheskaya Meteorologiya*, Moscow, Leningrad: Gidrometizdat, 1946, no. 21. 80 p. (In Russ.).
 6. Zheleznova I.V., Guschina D.J. The response of the global atmospheric circulation in the two types of El Niño. *Meteorol. Gidrol.*, 2015, no. 3, pp. 36–50. (In Russ.).
 7. Zacks S. The Theory of Statistical Inference. New-York: John Wiley & Sons Inc., 1971. 626 p.
 8. Kononova N.K. *Klassifikatsiya tsirkulyatsionnykh mekhanizmov Severnogo polushariya po B.L. Dzerdzeevskomu* [Classification Circulation Mechanisms of the Northern Hemisphere According to BL Dzerdzeevskii]. Shmakina A.B., Ed. Moscow: IG RAS, Voentehinizdat Publ., 2009. 372 p.
 9. Kramer G. *Matematicheskie metody statistiki* [Mathematical Methods of Statistics]. Moscow: Mir Publ., 1975. 648 p.
 10. Mokhov I.I., Akbarov M.G., Prokofieva M.A. Blockings in the Northern Hemisphere and the Euro-Atlantic region: assessment of changes from reanalysis data and model calculations. *Dokl. Akad. Nauk*, 2013, vol. 449, no. 5, pp. 1–5. (In Russ.).
 11. Mokhov I.I., Smirnov D.A. Study of mutual influence processes of the El Niño-Southern Oscillation and the North Atlantic and Arctic Oscillations of Nonlinear methods. *Dokl. Akad. Nauk*, 2006, vol. 42, no. 5, pp. 650–667. (In Russ.).
 12. Mokhov I.I., Timazhev A.V. Climatic anomalies in the regions of Eurasia: the effects of El Niño / La Niña. *Dokl. Akad. Nauk*, 2013, vol. 453, no. 2, pp. 211–214. (In Russ.).
 13. *Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3, chast'. III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov* [Manual on the Service Forecasts. Step 3, part. III. Service Marine Hydrological Forecasts]. Leningrad: Gidrometizdat Publ., 1982. 143 p.
 14. Nesterov E.S. The variability of the characteristics of the atmosphere and ocean in the Atlantic-European region during the events of El Niño and La Niña. *Meteorol. Gidrol.*, 2000, no. 8, pp. 74–83. (In Russ.).
 15. Petrosyants M.A., Semenov E.K., Guschina D.U., Sokolikhina E.V., Sokolikhina N.N. *Tsirkulyatsiya atmosfery v tropikakh: klimat i izmenchivost* [The Circulation of the Atmosphere in the Tropics: the Climate and Variability]. Moscow: Max Press Publ., 2005. 670 p.
 16. Petrosyants M.A., Guschina D.U. The Large-scale interaction of the global circulation of the atmosphere with the surface temperature of the equatorial Pacific Ocean. *Meteorol. Gidrol.*, 1998, no. 12, pp. 5–22. (In Russ.).
 17. Polonsky A.B. *Rol okeana v izmeneniyakh klimata* [The Ocean's Role in Climate Change]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 2008, 184 p. (In Russ.).
 18. Shakina N.P., Ivanova A.R. Blocking anticyclones: the current state of research and forecasting. *Meteorol. Gidrol.*, 2010, no. 11, pp. 5–18. (In Russ.).
 19. Bjerknes J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of Ocean temperature. *Tellus*, 1966, vol. 18, no. 4, pp. 820–829.
 20. Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 1966, vol. 97, pp. 163–172.
 21. Held I.M.S., Lyons S.W. and Nigam S. Transients and the extratropical response to El Nino. *J. Atmos. Sci.*, 1989, vol. 46, pp. 163–174.
 22. Horel J.D., Wallace J. M. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.* 1981, vol. 109, pp. 813–829.
 23. Lau N.C. Modeling the seasonal dependence of the atmospheric response to observed El-Ninos in 1962–76. *Mon. Wea. Rev.*, 1985, vol. 113, pp. 1970–1996.
 24. Trenberth K.E. and Stepaniak D.P. Indices of El Nino evolution. *J. Clim.*, 2001, vol. 14, pp. 1601–1624.
 25. Walker G.T. Correlation in seasonal variations of weather, VIII. A preliminary study of world weather. *Memoirs of the India Meteorological Department*, 1923, vol. 24, no. 4, pp. 75–131.
 26. Walker, G.T. Correlation in seasonal variations of weather, IX. A further study of world weather. *Memoirs of the India Meteorological Department*, vol. 24, no. 9, pp. 275–333.
 27. Wolter K., Timlin M.S. El-Nino/Southern Oscillation behavior since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *Intl. J. Climatology*, 2011, no. 31(7), pp. 1074–1087.
 28. *Fluctuations of atmospheric circulation in the Northern Hemisphere in the twentieth century – beginning of the XXI century*. Available at: <http://www.atmospheric-circulation.ru> (accessed 12.05.2018).
 29. NOAA database on the values of global climatic indices. Available at: <http://www.esrl.noaa.gov/data/climateindices/list/forinfo> (accessed 12.05.2018).