= ФИЗИКА МОРЯ ==

УДК 551.465

КОЛЕБАНИЯ ДЕСЯТИЛЕТНЕГО МАСШТАБА СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В РАМКАХ СОВРЕМЕННОГО ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

© 2025 г. Н. В. Вакуленко, И. В. Серых*, Д. М. Сонечкин

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия *e-mail: iserykh@ocean.ru Поступила 11.03.2024 г. После доработки 28.05.2024 г. Принята к публикации 08.08.2024 г.

Рассмотрены средние температуры Северного полушария для приповерхностного воздуха, нижней тропосферы и верхнего слоя океана от 0 до 100 м. Оказалось, что все эти ряды сходны между собой в том, что они состоят из двух компонент: тренда потепления и наложенных на этот тренд колебаний примерно десятилетнего масштаба. Выдвинута гипотеза, что эта квазидесятилетняя изменчивость температуры связана с Эль-Ниньо — Южным колебанием. После удаления трендов из исследуемых рядов их автокорреляционные функции демонстрируют экспоненциальное убывание и последующие колебания в окрестности нуля при сдвигах ~ 5 лет и более, что теоретически позволяет прогнозировать их изменения с заблаговременностью 1—4 года. Анализ результатов эксперимента "Historical" для 58 моделей СМІР6 подтвердил сделанные выводы, а также показал, что на квазидесятилетнюю изменчивость средней температуры приповерхностного воздуха Северного полушария существенное влияние оказывают крупные извержения вулканов. Результаты эксперимента "piControl" для 50 моделей СМІР6 продемонстрировали возможность прогноза изменений средней температуры связанов компонентой которой является Эль-Ниньо — Южное колебание возможное все стественной межгодовой изменчивости климата, главной компонентой которой является Эль-Ниньо — Южное колебание.

Ключевые слова: температура, глобальное потепление, квазидесятилетние колебания, нижняя тропосфера, верхний слой океана, Эль-Ниньо – Южное колебание, модели СМІР6, извержения вулканов

DOI: 10.31857/S0030157425010015, EDN: DRLMLS

введение

Глобальное потепление климата, которое продолжается с последней четверти ХХ века до настоящего времени, не вызывает сомнений. Не прекращаются дебаты ученых-климатологов о причинах глобального потепления. Большинство из них являются сторонниками антропогенного влияния на климатические изменения [21]. Тем не менее, известны уже около десяти теорий изменения климата с объяснениями причин потепления [15]. Одна из них – это теория чередования ледниковых и межледниковых эпох Миланковича (1939 г.) в период плиоцена/плейстоцена, подтвержденная в середине 20-го столетия анализом палеоклиматических данных. По составленному календарю лелниковых и межлелниковых шиклов очевилно будушее окончание современного межледниковья и вступление планеты Земля в новый ледниковый период [3, 5]. Планетарные орбитальные циклы

можно использовать для прогнозирования квазидесятилетних колебаний. Феноменологическая модель показывает, что 60% потепления Земли с 1970 г. вызвано естественными циклами в Солнечной системе: действуют механизмы изменения гравитационных и магнитных сил планет, в частности, Юпитера и Сатурна, которые модулируют солнечную активность, влияющую на изменения климата [31, 32].

Проведенный обзор научных публикаций ведущих отечественных ученых-климатологов о существующих причинах современного глобального потепления позволил выделить три группы ученых по их выводам о влиянии природных и антропогенных факторов на изменение климата Земли [14]. Мнения ученых первой группы о преобладающем антропогенном факторе подробно изложены в шестом Докладе IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) [21]. Ученые второй группы допускают сопоставимое влияние как природных, так и антропогенных факторов на изменение современного климата. К третьей группе ученых относятся те, кто считает воздействие человека несущественным по сравнению внутренней климатической изменчивостью с и внешними (космическими) факторами по отношению к климатической системе. По одной из этих гипотез, современное глобальное потепление в значительной мере вызвано циклическими долгопериодными космическими воздействиями на Землю, при этом термодинамическая инерционность океана создает предпосылки для запаздывания отклика климата на внешнее воздействие [13]. Важную роль в изменении климата Земли играют космические влияния планет-гигантов, орбитальные эксцентриситеты и периоды вращения которых могут продуцировать основные 10-, 20-, и 60-летние колебания в Солнечной системе [7].

В Арктике температура повышается в последние десятилетия быстрее, чем в других регионах Северного полушария. В недавнем обзоре [11] были сформулированы особенности изменения температуры и площади морских льдов в Арктике за последние десятилетия: так называемое арктическое усиление глобальных изменений климата в Арктике; наличие потепления в середине XX века в высоких широтах Северного полушария, когда температуры в Арктике были сравнимы с современными температурами (этот феномен является примером естественной изменчивости климата); нелинейная связь между изменениями приповерхностной температуры в Арктике и глобальной температурой, что указывает на независимую динамику арктической климатической системы. С помощью численных экспериментов с совместной моделью общей циркуляции атмосферы установлено, что причиной ускорения потепления приповерхностной температуры воздуха в Северном полушарии (примерно половина от величины наблюдаемого тренда) является внутренняя долгопериодная климатическая изменчивость в Северной Атлантике, влияющая на изменение климата в Арктике [10].

Примерно за полувековой период продолжающегося глобального потепления учеными выдвигаются все новые и новые гипотезы резкого изменения климата на планете с предупреждением о катастрофических последствиях для человечества. Например, приводятся строгие научные факты причин таяния арктических льдов и ледниковых щитов Гренландии и западной части Антарктиды в областях с наименьшей толщиной земной коры. Это таяние происходит изнутри за счет геотермального тепла, поступающего из недр Земли (ядро планеты), а не извне (атмосфера) [1]. В этой же работе показано, что в 1998 г. в результате глобального энергетического скачка центра масс ядра Земли относительно центра масс мантии началось глобальное экспоненциальное увеличение катастрофических явлений, таких как землетрясения, цунами, извержения вулканов и увеличение температуры воздуха.

В современном глобальном потеплении квазидесятилетние колебания климата важны для жизни людей. При изучении короткопериодных колебаний климата необходимо учитывать изменения приходящей на Землю солнечной радиации, т.е. циклы Швабе, Хейла, Глейссберга. Хотя цикл солнечных пятен Швабе имеет малую энергию, в нелинейных динамических системах, таких как климатическая система, всегда есть реакция даже на малое внешнее возмущение. В инструментальных рядах глобальной температуры трех основных центров – NCDC, GISS и центра Хедли в Восточной Англии – обнаружены пики энергетического спектра на периодах 5, 8, 10, 15 лет и 22 года. Эти же пики обнаружены в рядах средних температур обоих полушарий, рассматриваемых по отдельности [4]. Картина вейвлетного преобразования показывает частотную модуляцию с периодом 90 лет (полупериод 180-летнего солнечного шикла) на вейвлетных масштабах 6-10 и 13-22 лет. Можно сделать вывод, что причиной вариаций климата в масштабе десятилетий является влияние Солнца [8]. Для исследования вклада Солнца в изменения климата были выбраны экваториальные регионы Тихого океана – Niño-3 и Niño-3.4 [25] – и показано, что в этих регионах наблюдаются выраженные пики частотного анализа временных рядов температуры на периоде ~ 12 лет. При исследовании отдельного региона Северного полушария (Южная Фенноскандия, 55-63° с.ш.) были обнаружены декадные и двухдекадные периодичности в температуре по семи реконструкциям средних температур за последние 225-300 лет [30]. Тем не менее, вопрос о том, являются ли эти колебания реакцией климата на солнечные циклы Швабе и Хейла или это проявления внутренней изменчивости, остается открытым.

В системе океан-атмосфера Атлантическая мультидекадная осцилляция (АМО) и Тихоокеанская декадная осцилляция (ТДО) являются проявлениями естественной климатической изменчивости. Крупномасштабное явление АМО приводит к существенному глобальному отклику в атмосфере, который проявляется в нижней и средней тропосфере [16]. ТДО в большей степени связана с динамикой крупномасштабных круговоротов в Тихом океане, которые сказываются на аномалиях температуры поверхности океана, что приводит к атмосферным изменениям [9]. В недавней статье [29] представлены данные наблюдений о 10-15-летней периодичности океанической циркуляции в Атлантике, которая описывается как панатлантическое десятилетнее колебание климата – pan-Atlantic decadal oscillation. Несмотря на то, что АМО определяет максимальные изменения температуры поверхности океана в Северной Атлантике, квазидесятилетние колебания через изменения океанической и атмосферной циркуляции распространяются на весь Атлантический океан и за его пределы.

Из-за большой инерции океанической составляющей в системе океан-атмосфера возможна предсказуемость в десятилетнем масштабе различных метеорологических явлений. Так, в докладе ІРСС указано, что естественная изменчивость климата может временно усилить или затмить антропогенное изменение климата в десятилетних масштабах времени [20]. В работе [22] исследованы глобальные средние приземные температуры с точки зрения таких долгопериодических изменений. Обнаружено два основных колебания: сильное колебание с периодом около 70 лет и амплитудой около 0.09 К и квазилвалиатилетнее колебание с амплитудой около 0.06 К. Эти долгопериодные колебания могут усилить или ослабить повышение температуры Северного полушария, если их фазы положительно или отрицательно дополняют основную долгосрочную тенденцию.

Прогнозирование климатической изменчивости в десятилетних масштабах затруднено из-за схожести временных масштабов развития глобального потепления и естественных колебаний, главным фактором которых являются океаны [23]. На прогнозирование в десятилетнем масштабе времени влияют изменения инерции климатической системы, внутренняя изменчивость квазидесятилетних колебаний и внешние воздействия, такие как солнечная активность, извержение вулканов и антропогенный фактор [27]. Десятилетнее прогнозирование является новым направлением в исследовании изменений климата. Модели СМІР5 и СМІР6 включают десятилетние прогнозы в качестве одного из экспериментов по моделированию изменений климата. При этом инициализация моделей имеет решающее значение как для учета внутренней изменчивости климатической системы, так и для учета внешних воздействий [38].

Целью данной работы является исследование возможности прогноза изменений средней температуры Северного полушария на несколько лет вперед на основе естественной квазидесятилетней изменчивости климата.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

Для исследования изменений климата Северного полушария с середины 20-го века рассматриваются данные о приповерхностной температуре воздуха, средней температуре в нижней тропосфере и в верхнем 100-метровом слое океана. Временной ряд средней приповерхностной температуры воздуха за период инструментальных наблюдений предоставлен центром Хедли и Отделом климатических исследований Университета Восточной Англии (HadCRUT5) [28]. Временной ряд среднемесячной температуры нижней тропосферы с 1979 г. для Северного полушария (0°-82.5° с.ш.) (TLT) содержит данные системы листаншионного зонлирования, полученные со спутников Национального управления океанографии и атмосферы (NOAA) [26]. Временной ряд вертикальных аномалий среднегодовых температур океана для слоя 0-100 м с 1955 г. до настоящего времени (WO100) взят из базы данных Мирового океана (WOD18) [24].

Из-за нестационарного характера изменений климата к перечисленным выше временным рядам некорректно применять традиционные средства анализа стационарных случайных процессов. Исходя из этого, исследуемые временные ряды были подвергнуты предварительному разделению на нестационарную (тренд) и осцилляторную компоненты [12]. В итоге для анализируемых временных рядов среднегодовой температуры получены тренды потепления за весь период исследования с 1955 (для TLT с 1979 г.) по 2023 гг. и выявлены квазидесятилетние колебания после удаления этих трендов и трехлетнего скользящего сглаживания.

Поскольку анализируемые ряды данных инструментальных измерений имеют продолжительность, в которую укладываются только ~7 периодов квазидесятилетнего колебания (~4 для TLT), были исследованы результаты эксперимента "Historical" шестого этапа Проекта взаимного сравнения совместных моделей (Coupled Model Intercomparison Project phase 6 – CMIP6) за период 1851–2014 гг. [17]. В этом эксперименте присутствует форсинг от изменений концентрации парниковых газов в атмосфере, приходящей солнечной радиации и крупных извержений вулканов. Названия и результаты рассмотренных 58 моделей СМІР6 представлены в табл. 1. Следует обратить внимание, что некоторые организации представили в СМІР6 сразу несколько моделей, которые могут различаться как разрешением, так и другими параметрами. При этом разные модели одной и той же организации, например, модели ВСС–СЅМ2-МR и ВСС-ESM1, могут демонстрировать существенно отличающиеся результаты. Дополнительно к эксперименту "Historical" были исследованы результаты эксперимента "piControl" для 50 моделей СМІР6. В эксперименте "pi-Control" нет изменений во внешнем воздействии (за исключением годового хода солнечной радиации), и при этом продолжительность получаемых в рамках этого эксперимента временных рядов составляет в основном 500 модельных лет.

Таблица 1. Тренды изменений средней температуры воздуха у поверхности Северного полушария по результатам эксперимента "Historical" для 58 моделей СМІР6 за 1851–2014 гг., средние абсолютные значения автокорреляционных функций этих изменений при сдвигах от 15 до 30 лет и результаты взаимного корреляционного анализа этих изменений с индексом Эль-Ниньо – Южного колебания (ONI)

	er)	Квадратичный тренд (°С за 100 лет) ²)	Автокор	реляции при 15—30 лет	-RIG	Makc. 1 J)	
Название модели	Линейный тренд (°C за 100 л		исходные данные	без ли- нейного тренда	без ква- дратично- го тренда	Макс. корр ция с ОNI	Сдвиг при у корреляции с ONI (годь
ACCESS-CM2	0.27	1.66	0.12	0.08	0.22	0.41	0
ACCESS-ESM1-5	0.41	2.17	0.15	0.46	0.14	0.48	-1
AWI-CM-1-1-MR	0.70	1.70	0.48	0.16	0.05	0.42	-1
AWI-ESM-1-1-LR	0.65	1.96	0.29	0.17	0.05	0.65	-1
BCC-CSM2-MR	0.47	1.09	0.28	0.13	0.09	0.31	0
BCC-ESM1	0.02	0.96	0.17	0.16	0.16	0.44	-1
CAMS-CSM1-0	0.46	0.94	0.29	0.09	0.08	0.48	0
CanESM5	0.74	2.07	0.24	0.36	0.09	0.52	-1
CanESM5-CanOE	0.74	2.31	0.18	0.22	0.14	0.49	-1
CAS-ESM2-0	0.19	1.05	0.07	0.04	0.05	0.59	0
CESM2	0.44	1.41	0.08	0.12	0.05	0.54	0
CESM2-FV2	0.30	1.52	0.14	0.16	0.05	0.48	0
CESM2-WACCM	0.55	1.45	0.11	0.12	0.04	0.49	0
CESM2-WACCM-FV2	0.37	1.06	0.07	0.05	0.16	0.54	0
CIESM	0.79	0.97	0.64	0.13	0.11	0.48	0
CMCC-CM2-SR5	0.88	2.09	0.45	0.15	0.05	0.66	0
CMCC-ESM2	0.82	1.85	0.33	0.20	0.16	0.60	0
CNRM-CM6-1	0.52	3.26	0.21	0.47	0.08	0.41	-1
CNRM-CM6-1-HR	0.67	1.31	0.61	0.33	0.05	0.44	-1
CNRM-ESM2-1	0.36	2.91	0.17	0.49	0.09	0.42	-1
E3SM-1-0	0.25	2.28	0.08	0.33	0.08	0.25	0
E3SM-1-1	0.04	2.32	0.08	0.10	0.22	0.22	-1
E3SM-1-1-ECA	0.17	2.35	0.11	0.31	0.12	0.33	0
EC-Earth3	0.25	3.98	0.42	0.60	0.11	0.38	-1
EC-Earth3-AerChem	-0.03	2.45	0.19	0.17	0.12	0.27	0
EC-Earth3-Veg	1.18	1.54	0.68	0.17	0.11	0.43	0

Таблица 1. Окончание

Название модели	Линейный тренд (°С за 100 лет)	Квадратичный тренд (°С за 100 лет) ²)	Автокорреляции при сдвигах 15–30 лет			- BIG	акс.
			исходные данные	без ли- нейного тренда	без ква- дратично- го тренда	Макс. корре ция с ОNI	Сдвиг при м корреляции с ONI (годы
FGOALS-f3-L	0.69	1.81	0.30	0.34	0.08	0.43	0
FGOALS-g3	0.69	1.56	0.50	0.13	0.12	0.39	0
FIO-ESM-2-0	0.78	2.10	0.46	0.18	0.12	0.48	0
GFDL-CM4	0.32	1.74	0.17	0.20	0.11	0.43	-1
GFDL-ESM4	0.21	0.30	0.12	0.10	0.11	0.51	-1
GISS-E2-1-G	0.33	1.13	0.07	0.07	0.06	0.60	-1
GISS-E2-1-G-CC	0.46	1.93	0.11	0.20	0.08	0.57	-1
GISS-E2-1-H	0.58	1.59	0.15	0.25	0.14	0.45	-1
GISS-E2-2-H	0.46	1.66	0.06	0.26	0.07	0.38	0
HadGEM3-GC31-LL	0.21	2.07	0.16	0.22	0.13	0.40	-1
HadGEM3-GC31-MM	0.27	1.95	0.09	0.13	0.10	0.44	-1
IITM-ESM	0.70	1.13	0.58	0.13	0.10	0.26	-1
INM-CM4-8	0.55	0.68	0.52	0.07	0.06	0.28	-1
INM-CM5-0	0.53	0.76	0.42	0.08	0.08	0.39	0
IPSL-CM6A-LR	0.87	2.34	0.53	0.27	0.08	0.55	-1
KACE-1-0-G	0.77	2.16	0.45	0.24	0.35	0.48	0
KIOST-ESM	0.80	2.03	0.40	0.19	0.05	0.36	0
MCM-UA-1-0	0.76	1.74	0.45	0.11	0.09	0.61	-1
MIROC6	0.41	1.21	0.16	0.12	0.09	0.63	-1
MIROC-ES2L	0.34	1.25	0.05	0.08	0.10	0.63	0
MPI-ESM-1-2-HAM	0.19	1.21	0.19	0.11	0.10	0.23	0
MPI-ESM1-2-HR	0.65	0.88	0.44	0.14	0.15	0.47	-1
MPI-ESM1-2-LR	0.65	1.54	0.36	0.11	0.11	0.45	-1
MRI-ESM2-0	0.38	0.94	0.10	0.15	0.23	0.41	0
NESM3	0.52	1.06	0.14	0.14	0.20	0.40	0
NorCPM1	0.23	2.03	0.17	0.20	0.17	0.51	-1
NorESM2-LM	0.26	1.24	0.10	0.11	0.04	0.54	0
NorESM2-MM	0.21	1.57	0.13	0.08	0.18	0.83	-1
SAM0-UNICON	0.33	1.19	0.18	0.13	0.18	0.62	0
TaiESM1	0.03	1.67	0.21	0.20	0.22	0.33	0
UKESM1-0-LL	0.02	2.03	0.39	0.42	0.09	0.41	-1
UKESM1-1-LL	0.53	1.52	0.07	0.31	0.15	0.38	0
Среднее	0.46	1.67	0.26	0.19	0.11	0.46	_
Станд. отклонение	0.26	0.65	0.17	0.12	0.06	0.12	_

Методом быстрого преобразования Фурье с максимальным разрешением оценены энергетические спектры временных рядов среднегодовых значений средней температуры воздуха у поверхности (ТВП) Северного полушария в эксперименте "Historical" для 58 рассмотренных моделей СМІР6. Каждая запись наблюдений любой гидрологической величины, даже если эта величина непрерывно изменяется, имеет конечную длину и конечное временное разрешение. Такая запись может быть представлена не интегралом Фурье S(f), где f является непрерывно изменяющейся частотой, а только конечным рядом коэффициентов Фурье $S(f_n)$ (где $f_n - из$ дискретной последовательности частот), соответствуюших гармоникам, которые кратны обшей длине записи. В результате действительная амплитуда гармоники Фурье, которая не кратна общей длине записи, может быть недооценена, если эта амплитуда незначительно отличается от амплитуд ближайших гармоник. Чтобы избежать этого, можно использовать многократное вычисление периодограмм для записей, которые остаются после последовательного сокращения начальной записи. Затем все такие периодограммы совмещаются и, в случае совпадения периодов, усредняются. Это увеличивает спектральное разрешение и, таким образом, позволяет точнее определять периоды пиков спектральной плотности, не кратные общей длине исходной записи. По-видимому, впервые этот прием был применен в [37].

При использовании такого подхода спектры мощности оцениваются не только для общей длины записи, но также для сокращенных записей исходного временного ряда с последующим совмещением всех полученных периодограмм. Спектры с максимальным разрешением средней ТВП Северного полушария построены путем последовательного сокращения длин этих временных рядов до половины (82 года) от их первоначальной длины (164 года), поскольку при этом получаются наиболее непрерывные оценки спектральной плотности для всех частот. Спектры оценивались сначала для ряда длиной N: (1, ..., N);затем для 2-х рядов длины N-1: (1, ..., N-1) и (2, ..., N); затем для 3-x рядов длины N-2: (1, ..., *N*-2), (2, ..., *N*-1) и (3, ..., *N*) и т.д. до *N*/2 рядов длины N/2: (1, ..., N/2), (2, ..., N/2 + 1), ..., (N/2, ..., N). Затем все полученные спектры объединялись в один путем упорядочивания по частотам и усреднения при совпадении частот [33].

Вейвлет-преобразования проводились с использованием вейвлета Морле с коэффициентом 6.2035 для соответствия с результатами быстрого преобразования Фурье и шагом по частоте 1.1892 года, что является корнем 4-й степени из 2 [34].

В качестве индекса Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК) использован Oceanic Niño Index (ONI), который вычисляется как средние аномалии температуры поверхности Тихого океана в районе Niño-3.4 (5° с.ш. – 5° ю.ш., 120°–170° з.д.).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изменения аномалий средних температур Северного полушария для приповерхностного воздуха, нижней тропосферы и верхнего 100-метрового слоя океана за последние несколько десятков лет показаны на рис. 1а. Видно, что все эти три графика в общих чертах похожи друг на друга, и каждый из них состоит из двух компонент: компоненты общего тренда потепления и компоненты наложенного на этот тренд колебания температуры примерно десятилетнего масштаба. Эти компоненты легко отделяются друг от друга с помощью удаления тренда и применения трехлетнего скользящего среднего (рис. 16).

Следует отметить, что аппроксимация рядов аномалий средних температур Северного полушария для приповерхностного воздуха и верхнего 100-метрового слоя океана полиномами 2-го порядка, а ряда для нижней тропосферы — полиномом 1-го порядка связана с меньшей продолжительностью ряда для нижней тропосферы



1955 1960 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 Календарные годы

Рис. 1. а) Вариации аномалий среднегодовых значений температуры Северного полушария с компонентами общего тренда: 1 – для приповерхностного слоя воздуха за 1955–2023 гг. (квадратичный тренд), 2 – для нижней тропосферы за 1979–2023 гг. (линейный тренд), 3 – для верхнего 100-метрового слоя океана за 1955–2023 гг. (квадратичный тренд). б) То же самое после трехлетнего сглаживания и удаления трендов для всех трех рядов.

(с 1979 г.). На графиках 1 и 3 рис. 1а видно, что средняя температура Северного полушария не росла, а скорее даже понижалась с 1955 г. до середины 1970-х гг. Поэтому исследуемым рядам, за-хватывающим временной интервал до 1970-х гг., из-за начавшегося в середине 1970-х роста температуры лучше соответствует приближение параболой, чем прямой линией.

По графикам изменений аномалий средних температур Северного полушария для приповерхностного воздуха (рис. 1а, линия 1) и верхнего 100-метрового слоя океана (рис. 1а, линия 3), а также по графикам приближающих их полиномов 2-й степени видно, что температура приповерхностного воздуха Северного полушария росла в 1955–2023 гг. быстрее и с большим ускорением по сравнению с температурой верхнего 100-метрового слоя океана вследствие более высокой инерционности последнего. Длины рядов аномалий средних температур Северного полушария для приповерхностного воздуха и верхнего 100-метрового слоя океана имеют одинаковую длину (69 лет), отличающуюся от длины ряда для нижней тропосферы (45 лет). С учетом этого, по графикам рис. 1а можно заключить, что температура нижней тропосферы Северного полушария (рис. 1а, линия 2) росла за общий период 1979-2023 гг. примерно с такой же скоростью, как и температура приповерхностного воздуха, но быстрее по сравнению с температурой верхнего 100-метрового слоя океана.

На рис. 16 показаны ряды квазидесятилетних колебаний средних температур Северного полушария после удаления трендов и применения трехлетнего скользящего среднего. Графики для приповерхностного воздуха, нижней тропосферы и верхнего 100-метрового слоя океана различаются между собой, но в целом видно общее сходство между ними. Можно предположить, что межгодовые колебания этих рядов имеют отношение к ЭНЮК и связанной с ним так называемой Глобальной атмосферной осцилляцией (ГАО) [2]. Периодичность ГАО, в свою очередь, связана с откликом климатической системы на следующие квазипериодические внешние воздействия: Чандлеровское колебание полюсов Земли с периодом ~ 1.2 года, квазиодиннадцатилетнюю цикличность солнечной активности и лунно-солнечную нутацию земной оси с периодом ~18.6 года [33]. В свою очередь, западно-восточное распространение пространственной структуры ГАО приводит к чередованию событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья, что позволяет предсказывать эти события с примерно годовой заблаговременностью [34].

Заблаговременное прогнозирование сильных событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья, в свою очередь, позволяет давать прогноз на 1-4 года вперед для средней температуры Северного полушария. Так, например, локальные максимумы на графиках рис. 1б в 1987, 1998 и 2016 гг. можно связать с сильными событиями Эль-Ниньо 1986-1987, 1997-1998 и 2015-2016 гг., а локальные минимумы в 1976, 2000, 2011 и 2022 гг. - с сильными и продолжительными событиями Ла-Нинья 1973-1976, 1998-2000, 2010-2012 и 2020-2022 гг. Самый теплый за все время инструментальных наблюдений 2023 г. связан с начавшимся в данном году событием Эль-Ниньо. Таким образом, можно утверждать, что в период и примерно в течение 1 года после сильных событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья наблюдаются соответственно положительные и отрицательные аномалии средней температуры Северного полушария. Исходя из этого, прогноз сильных событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с годовой заблаговременностью позволяет прогнозировать среднюю температуру Северного полушария на 1-4 года вперед, если vчесть, что сильные события Эль-Ниньо обычно длятся около 1 года, а сильные события Ла-Нинья могут продолжаться от 1 года до 3 лет.

Приведенные на рис. 16 временные ряды квазидесятилетних колебаний средних температур Северного полушария характеризуются корреляционными функциями (рис. 2), которые имеют характер экспоненциального затухания



Рис. 2. Автокорреляционные функции по трехлетним скользящим среднегодовым значениям температуры Северного полушария после вычета тренда: 1 – для приповерхностного слоя воздуха за 1955–2023 гг., 2 – для нижней тропосферы за 1979–2023 гг., 3 – для верхнего 100-метрового слоя океана за 1955–2023 гг.

и последующих колебаний в окрестности нуля при сдвигах ~5 лет и более, что дает теоретическую возможность успешного прогнозирования их изменений с заблаговременностью менее 5 лет. Это подтверждает предыдущее заключение о возможности успешного прогноза средней температуры Северного полушария с заблаговременностью 1–4 года.

Интересной особенностью оказалось то, что автокорреляционная функция температуры нижней тропосферы Северного полушария (рис. 2, линия 2) спадает быстрее, чем автокорреляционная функция температуры приповерхностного воздуха (рис. 2, линия 1), которая, в свою очередь, спадает быстрее автокорреляционной функции средней температуры верхних 100 метров океана Северного полушария (рис. 2, линия 3). Вследствие этого, а также упомянутого выше заключения о том, что скорость потепления нижней тропосферы опережает скорость потепления верхнего слоя океана (рис. 1а), можно предположить, что современное потепление температуры приповерхностного слоя воздуха является результатом теплового взаимодействия приповерхностного слоя воздуха с вышележащим слоем нижней тропосферы и нижележащими слоями океана.

Дополнительно к тренду потепления и квазидесятилетним колебаниям, существенное воздействие на среднюю температуру Северного полушария оказывают крупные извержения вулканов [18, 19]. Так, на графиках рис. 16 видны существенные понижения температуры в течение нескольких лет после 1963, 1982 и 1991 гг., которые можно связать с извержениями вулканов Агунг (1963 г.), Эль-Чичон (1982 г.) и Пинатубо (1991 г.). К сожалению, в настоящее время нет возможности точно прогнозировать такие извержения, что приводит к неопределенности и в прогнозах температуры Северного полушария. При этом интересной особенностью является то, что ряд средних температур верхних 100 м океана (рис. 1б, линия 3) реагирует на извержения вулканов медленнее и слабее, чем ряды температуры атмосферы (рис. 16, линии 1 и 2). Эту особенность можно связать с большой инерционностью океана, который смягчает понижение температуры атмосферы после извержений вулканов, постепенно отдавая накопленное за предыдущие годы тепло.

Для проверки заключений, полученных вследствие анализа данных наблюдений, исследованы результаты эксперимента "Historical" для 58 моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМІР6 (табл. 1). Для каждой из 58 моделей климатической Земной системы с помощью приближения полиномами 1-й и 2-й степени проведены оценки изменений средней температуры воздуха у поверхности Северного полушария за 1851– 2014 гг. (табл. 1, столбцы 2 и 3). Временные ряды средней ТВП Северного полушария с помощью метода наименьших квадратов аппроксимировались полиномами 1-й и 2-й степени: y = ax + bи $y = ax^2 + bx + c$. Коэффициенты "*a*" при члене старшего порядка этих полиномов соответственно характеризуют скорость (табл. 1, столбец 2) и ускорение (табл. 1, столбец 3) изменений средней ТВП Северного полушария за 1851–2014 гг.

Анализ результатов эксперимента "Historical" СМІР6 показал, что большинство из 58 рассмотренных моделей демонстрируют положительные и статистически значимо отличные от 0 с вероятностью >95% (величины большие +0.04°С за 100 лет) линейные тренды роста средней ТВП Северного полушария за 1851–2014 гг. (табл. 1, столбец 2). При этом все из рассмотренных 58 моделей СМІР6 имеют положительный коэффициент при члене 2-й степени квадратичного полинома, аппроксимирующего изменения средней ТВП Северного полушария за 1851–2014 гг. (табл. 1, столбец 3). Это означает, что ветви парабол, которыми проводилось приближение, направлены вверх у всех рассмотренных 58 моделей СМІР6.

Чтобы проверить то, что значения средней ТВП Северного полушария в начале исследуемого периода были меньше, чем в его конце, аномалии ТВП для каждой модели были усреднены за первые и последние 30 лет периода 1851-2014 гг. Оказалось, что у всех рассмотренных моделей средние аномалии ТВП за 1851-1880 гг. меньше средних аномалий ТВП за 1985-2014 гг. Исходя из всех вышеперечисленных результатов, можно заключить, что модели СМІР6 в целом демонстрируют ускоряющийся рост средней ТВП Северного полушария за исследуемый период. Это полностью соответствует форсингу от антропогенного увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере, который присутствует в эксперименте "Historical" CMIP6.

Данное заключение подтверждают графики средних, максимальных и минимальных значений аномалий годовых ТВП, усредненных по Северному полушарию, для ансамбля 58 моделей СМІР6 за 1851–2014 гг. (рис. 3, линии 1, 2 и 3 соответственно). На этих графиках видно, что средняя ТВП менялась на протяжении 1851– 2014 гг. неравномерно. С начала исследуемого периода и до середины 1970-х годов средняя ТВП Северного полушария если и росла, то весьма незначительно, но с середины 1970-х по 2014 гг. наблюдается ее быстрый рост. На фоне этих междекадных изменений (протяженностью более 10 лет) наблюдаются более короткопериодные (протяженностью менее 10 лет) понижения средней ТВП Северного полушария в 1880-х, 1900-х, 1910-х, 1960-х, 1980-х и 1990-х гг., которые соответственно связаны с извержениями вулканов Кракатау (1883 г.), Санта-Мария (1902 г.), Катмай (1912 г.), Агунг (1963 г.), Эль-Чичон (1982 г.) и Пинатубо (1991 г.) [18, 19].

Таким образом, на графике среднемодельных изменений средней ТВП Северного полушария за 1851—2014 гг. (рис. 3, линия 1) наблюдается влияние 2-х внешних сил (форсингов): положительный долгопериодный (несколько десятилетий) тренд от антропогенного увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере и естественные короткопериодные (менее 10 лет) похолодания от крупных извержений вулканов. Эти же особенности наблюдаются и на графиках максимальных и минимальных значений ТВП среди 58 моделей СМІР6 (рис. 3, линии 2 и 3). При этом межмодельный разброс составляет ~1°С и сохраняется практически постоянным на протяжении всех 1851–2014 гг. эксперимента "Historical" СМІР6.

Квазидесятилетние колебания, связанные с ЭНЮК и другими модами естественной внутренней климатической изменчивости, оказались подавлены в ряду среднемодельных изменений средней ТВП Северного полушария (рис. 3, линия 1) из-за проведенного усреднения результатов 58 моделей СМІР6. Это произошло из-за того, что разные модели СМІР6 демонстрируют различную периодичность ЭНЮК [35]. Более того, в различных прогонах даже одной и той же модели фазы ЭНЮК могут не совпадать, что при



Рис. 3. Изменения за 1851–2014 гг. средних аномалий годовых температур воздуха у поверхности Северного полушария по результатам эксперимента "Historical" для 58 моделей СМІР6: 1 – средние, 2 – максимальные, 3 – минимальные значения.

усреднении достаточно большого числа таких временных рядов подавляет влияние естественной внутренней климатической изменчивости в итоговом среднем ряду.

Чтобы при усреднении снизить подавление квазилесятилетних колебаний. вызванных естественной внутренней климатической изменчивостью, автокорреляционные функции аномалий средней ТВП Северного полушария были сначала рассчитаны для каждой из 58 моделей СМІР6 в отдельности, взяты по модулю, а уже потом усреднены (рис. 4). При этом автокорреляционные функции сначала строились для исходных аномалий ТВП (рис. 4, линия 1), затем для аномалий с удаленным линейным трендом (рис. 4, линия 2), а затем для аномалий с удаленным квадратичным трендом (рис. 4, линия 3). Видно, что после предварительного удаления квадратичного тренда из рядов ТВП автокорреляционные функции спадают в окрестность нуля быстрее, чем без удаления. При этом из-за взятия по модулю автокорреляционных функций их экспоненциальное затухание заканчивается при сдвигах примерно в 15 лет, что превосходит 5 лет в случае с неабсолютными значениями (рис. 2).

После спадания абсолютные значения автокорреляционных функций продолжают оставаться близкими к нулю, что подтверждают средние значения автокорреляций при сдвигах 15—30 лет, подсчитанные для каждой модели по исходным рядам (табл. 1, столбец 4), а также по рядам с уда-



Рис. 4. Средние для 58 моделей СМІР6 значения взятых по модулю коэффициентов автокорреляции со сдвигами от 0 до 30 лет средних аномалий годовых температур воздуха у поверхности Северного полушария по результатам эксперимента "Historical" за 1851–2014 гг.: 1 – исходные значения, 2 – с удалением линейного тренда, 3 – с удалением квадратичного тренда.

ленными линейными (табл. 1, столбец 5) и квадратичными (табл. 1, столбец 6) трендами. Перечисленные выше полученные по моделям СМІР6 результаты подтверждают экспоненциальное затухание автокорреляционных функций средней температуры Северного полушария и последующее их колебание в окрестности нуля при сдвигах ~ 5 лет и более.

Чтобы исследовать периодичность квазидесятилетних колебаний, были проведены оценки энергетических спектров рядов, нормированных на их стандартные отклонения, средних аномалий годовых ТВП Северного полушария за 1851—2014 гг. для каждой из 58 моделей СМІР6 в отдельности. Для более точного определения периодов спектральных пиков спектры вычислялись с максимальным разрешением [33]. Затем все полученные спектры усреднялись (рис. 5, линия 1), а также определялись их максимальные и минимальные значения для 58 моделей СМІР6 (рис. 5, линии 2 и 3 соответственно).

На полученном среднемодельном спектре ТВП Северного полушария (рис. 5, линия 1) выделяются пики на следующих периодах: 5.7, 7.2, 8.9, 10.1, 15.6, 21.8 и 26.7 лет. Все эти спектральные пики на периодах от 5 до 30 лет можно отнести к проявлению квазидесятилетней изменчивости средней температуры Северного полушария. Пик на периоде 8.9 лет, по всей видимости, является супергармоникой 1:3 периода 26.7 лет, причины которого, возможно, связанны с такой модой климатической изменчивости, как Тихоокеанская декадная осцилляция, для которой характерны периоды 20-30 лет. Пик на периоде 21.8 лет, скорее всего, является проявлением 22-летнего цикла Хейла солнечной активности, а пик на периоде 7.2 года – его супергармоникой 1:3. Пик на периоде 5.7 лет можно отнести как к супергармонике 1:2 квазиодиннадцатилетнего цикла Швабе солнечной активности, так и к ЭНЮК, для которого характерны периоды от 2 до 7 лет. Пик на периоде 15.6 года, возможно, является проявлением квазипятнадцатилетней периодичности океанической циркуляции в Атлантике, влияющей также и на температуру в Арктике [6]. Есть основания предположить, что спектральный пик на периоде 10.1 года возник в результате того, что временные промежутки между перечисленными выше крупными извержениями вулканов в 1883, 1902, 1912, 1963, 1982 и 1991 гг. примерно составляют либо 10 лет, либо число, кратное 10.

Для проверки последнего предположения построена средняя для 58 моделей СМІР6 вейвлетдиаграмма временных рядов средних аномалий КОЛЕБАНИЯ ДЕСЯТИЛЕТНЕГО МАСШТАБА...



Рис. 5. Оценки энергетических спектров с максимальным разрешением нормированных временных рядов средних аномалий годовых температур воздуха у поверхности Северного полушария по результатам эксперимента "Historical" для 58 моделей СМІР6 за 1851–2014 гг.: 1 – средние, 2 – максимальные, 3 – минимальные значения.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 65 № 1 2025

15

годовых ТВП Северного полушария по результатам эксперимента "Historical" за 1851-2014 гг. (рис. 6). На этой среднемодельной вейвлет-диаграмме видно, что основные энергии колебаний на периодах, близких к 10 годам, сосредоточены примерно в 1880-1920 и 1960-2000 гг., когда и происходили перечисленные выше крупные извержения вулканов. Нужно отметить, что для построения среднемодельной вейвлет-диаграммы (рис. 6) сначала для каждой из 58 моделей СМІР6 выполнялось вейвлет-преобразование временного ряда средних аномалий годовых ТВП Северного полушария по результатам эксперимента "Historical" за 1851-2014 гг. с предварительно примененным фильтром Баттерворта высоких частот для удаления колебаний на периодах более 60 лет. а уже затем все эти полученные 58 вейвлет-преобразований усреднялись. Несмотря на это, в среднемодельной вейвлет-диаграмме (рис. 6) влияние мод естественной квазидесятилетней климатической изменчивости оказалось частично подавлено из-за упомянутого выше эффекта при усреднении модельных результатов с несовпадающими периодами и фазами колебаний.

Интересной особенностью, видной на среднемодельной вейвлет-диаграмме (рис. 6), является то, что наибольшие энергии колебаний на периодах 10–30 лет также наблюдаются в 1880–1920 и 1960–2000 гг., когда происходили крупные извержения вулканов. А наибольшие энергии колебаний на периодах ~3–10 лет наблюдаются в 1880-х и 1990-х гг., когда произошли наиболее мощные по оказанному эффекту на сокращение достигающей поверхности Земли солнечной радиации извержения вулканов Кракатау (1883 г.) и Пинатубо (1991 г.). На основании этого можно заключить, что крупнейшие извержения вулканов существенно влияют на квазидесятилетнюю изменчивость средней ТВП Северного полушария благодаря тому отрицательному радиационному воздействию, которое они оказывают на нелинейную динамическую климатическую систему.

Дополнительно к перечисленным выше спектральным пикам на среднем спектре ТВП Северного полушария (рис. 5, линия 1) и в особенности на графике максимальных значений спектральной плотности для 58 моделей СМІРб (рис. 5, линия 2) можно выделить пики на периодах примерно от 2 до 7 лет. По всей видимости, эти пики связаны с ЭНЮК, периодичность которого у разных моделей СМІРб довольно существенно различается [35]. Чтобы проверить эту гипотезу, для каждой из исследуемых 58 моделей СМІРб были вычислены взаимные корреляционные функции между среднегодовыми значениями индекса ЭНЮК ОNІ и средними аномалиями ТВП



Рис. 6. Средняя для 58 моделей СМІР6 вейвлет-диаграмма нормированных временных рядов средних аномалий годовых температур воздуха у поверхности Северного полушария по результатам эксперимента "Historical" за 1851–2014 гг.

Северного полушария. Найдены максимальные значения этих кросс-корреляционных функций (таблица 1, столбец 7) и сдвиги, при которых эти максимальные значения достигаются (таблица 1, столбец 8). Если сдвиг равняется –1 году, – значит. изменения ONI опережают изменения средней ТВП Северного полушария примерно на 1 год, если сдвиг равняется 0, – значит, эти изменения ближе к квазисинхронным. Значения максимальных кросс-корреляций между ONI и средней ТВП Северного полушария оказались значимо отличными от 0 (с вероятностью >95%) для всех исследуемых 58 моделей СМІР6 (таблица 1, столбец 7). При этом для 28 из 58 рассмотренных моделей СМІР6 ONІ опережает среднюю ТВП Северного полушария примерно на 1 год.

Таким образом, можно заключить, что события Эль-Ниньо и Ла-Нинья оказывают значимое опережающее воздействие на среднюю ТВП Северного полушария. Это заключение подтверждается графиками средней взаимной корреляционной функции между ONI и средней ТВП Северного полушария (рис. 7, линия 1), а также ее максимальными и минимальными значениями (рис. 7, линии 2 и 3 соответственно) по результатам эксперимента "piControl" для 50 моделей СМІР6 за указанное в табл. 2 число модельных лет (столбец 2). В табл. 2 также приведены результаты взаимного спектрального и корреляционного анализа между ONI и средней ТВП Северного полушария, которые демонстрируют опережение ONI. Результаты эксперимента "piControl" луч-



Рис. 7. Взаимные корреляционные функции годовых значений индекса ЭНЮК ONI и средних аномалий температуры воздуха у поверхности Северного полушария со сдвигами от –10 до + 10 лет по результатам эксперимента "piControl" для 50 моделей СМІР6 за указанное в таблице 2 число модельных лет: 1 – средние, 2 – максимальные, 3 – минимальные значения.

ше подходят для исследования внутренней естественной изменчивости климатической системы, к которой и относится ЭНЮК, поскольку в нем нет радиационного форсинга от изменений концентрации парниковых газов в атмосфере и крупных извержений вулканов. Благодаря этому нет необходимости в удалении трендов из анализируемых рядов, поскольку эти тренды весьма малы для большинства из рассмотренных 50 моделей эксперимента "piControl" (табл. 2, столбец 3).

Название модели	Число лет в экспе- рименте piControl	Линейный тренд (°C за 100 лет)	Средняя когерент- ность для периодов 3-7 лет	Средние фазовые со- отношения для периодов 3–7 лет (°)	Корреляции при сдвиге ОNI на 1 год вперед. Полосовая филь- трация 3–30 лет	Корреляции без сдвига. Полосовая фильтрация 3–30 лет
ACCESS-CM2	500	0.04	0.74	-36.1	0.50	0.42
ACCESS-ESM1-5	900	0.01	0.73	-26.2	0.57	0.48
AWI-CM-1-1-MR	500	-0.01	0.84	-32.8	0.50	0.49
BCC-CSM2-MR	600	0.05	0.63	-22.0	0.37	0.33
BCC-ESM1	451	0.02	0.60	-12.9	0.36	0.26
CAMS-CSM1-0	500	0.03	0.83	-37.3	0.49	0.47
CanESM5	1000	-0.01	0.81	-32.8	0.66	0.53
CanESM5-CanOE	501	-0.03	0.80	-35.8	0.68	0.57
CAS-ESM2-0	550	0.03	0.95	-28.5	0.68	0.78
CESM2	1200	0.02	0.80	-26.5	0.59	0.61
CESM2-FV2	500	0.02	0.72	-27.4	0.55	0.65

Таблица 2. Продолжительность эксперимента "piControl" для 50 моделей СМІР6, значения линейных трендов изменений средней температуры воздуха у поверхности Северного полушария по результатам этого эксперимента и оценки ее связей с ONI на основе взаимного спектрального и корреляционного анализа

Таблица 2. Окончание

Название модели	Число лет в экспе- рименте piControl	Линейный тренд (°С за 100 лет)	Средняя когерент- ность для периодов 3–7 лет	Средние фазовые со- отношения для периодов 3–7 лет (°)	Корреляции при сдвиге ONI на 1 год вперед. Полосовая филь- трация 3–30 лет	Корреляции без сдвига. Полосовая фильтрация 3–30 лет
CESM2-WACCM	499	0.02	0.82	-31.2	0.64	0.59
CESM2-WACCM-FV2	500	0.02	0.84	-20.8	0.48	0.66
CIESM	500	0.02	0.82	-43.1	0.59	0.48
CMCC-CM2-SR5	500	-0.01	0.89	-31.6	0.74	0.70
CMCC-ESM2	500	-0.09	0.94	-34.1	0.74	0.72
CNRM-CM6-1	500	0.05	0.75	-41.4	0.50	0.38
CNRM-CM6-1-HR	300	0.13	0.78	-33.9	0.51	0.41
CNRM-ESM2-1	500	-0.06	0.76	-36.3	0.45	0.23
E3SM-1-0	500	0.00	0.73	-21.9	0.43	0.36
EC-Earth3	501	-0.09	0.68	-23.0	0.42	0.35
EC-Earth3-AerChem	311	-0.11	0.71	-20.2	0.29	0.37
EC-Earth3-Veg	500	0.05	0.74	-39.5	0.43	0.31
EC-Earth3-Veg-LR	501	0.02	0.65	-16.3	0.30	0.28
FGOALS-f3-L	561	0.03	0.77	-24.3	0.28	0.46
FGOALS-g3	700	-0.02	0.74	-20.6	0.31	0.37
FIO-ESM-2-0	575	0.01	0.76	-17.5	0.51	0.55
GFDL-CM4	500	0.03	0.82	-40.9	0.60	0.48
GFDL-ESM4	500	0.00	0.83	-28.6	0.57	0.57
GISS-E2-1-G	851	0.01	0.91	-39.3	0.70	0.62
GISS-E2-1-H	401	-0.01	0.84	-43.3	0.64	0.52
HadGEM3-GC31-LL	500	0.02	0.77	-26.1	0.51	0.52
HadGEM3-GC31-MM	500	0.09	0.82	-40.1	0.56	0.46
INM-CM4-8	531	-0.05	0.67	0.1	0.11	0.24
INM-CM5-0	1201	-0.01	0.63	-8.0	0.34	0.40
IPSL-CM6A-LR	800	-0.01	0.85	-27.8	0.54	0.58
KIOST-ESM	500	-0.08	0.76	-25.8	0.31	0.34
MCM-UA-1-0	500	0.01	0.74	-16.8	0.73	0.73
MIROC6	800	0.01	0.92	-42.3	0.81	0.68
MIROC-ES2L	500	0.00	0.93	-35.7	0.70	0.71
MPI-ESM-1-2-HAM	1000	0.00	0.75	-17.7	0.44	0.48
MPI-ESM1-2-HR	500	-0.01	0.72	-17.0	0.48	0.48
MPI-ESM1-2-LR	1000	0.01	0.82	-24.4	0.58	0.65
MRI-ESM2-0	701	0.01	0.71	-30.5	0.49	0.45
NESM3	500	-0.02	0.71	-14.9	0.42	0.48
NorCPM1	500	0.02	0.75	-39.7	0.59	0.45
NorESM2-LM	501	0.02	0.81	-34.6	0.68	0.64
NorESM2-MM	500	0.00	0.86	-49.4	0.74	0.63
SAM0-UNICON	700	-0.03	0.82	-20.9	0.63	0.67
TaiESM1	500	0.01	0.81	-22.8	0.49	0.59
Среднее		0.00	0.78	-28.4	0.52	0.50
Стандартное отклонение		0.04	0.08	10.2	0.15	0.14

Из результатов табл. 2 следует, что ONI опережает среднюю ТВП Северного полушария практически для всех рассмотренных 50 моделей СМІР6. Так, значения средних фазовых соотношений для периодов 3-7 лет, которые характерны для ЭНЮК, являются отрицательными для 49 из 50 моделей СМІР6 (табл. 2, столбец 5) и в среднем составляют -28.4° , что соответствует опережению ONI средней ТВП Северного полушария примерно на 1 год. При этом средние для периодов 3-7 лет значения когерентности между ONI и средней ТВП Северного полушария достаточно высоки и в среднем составляют 0.78 (табл. 2, столбец 4).

Значения кросс-корреляций между ONI и средней ТВП Северного полушария рассмотренных 50 моделей СМІР6 при нулевом сдвиге составляют в среднем 0.50 (табл. 2, столбец 7). а при сдвиге ONI на 1 год вправо увеличиваются и становятся равными 0.52 (табл. 2, столбец 6). Причем, частично благодаря достаточно длинным анализируемым временным рядам эксперимента "piControl" (табл. 2, столбец 2), кросс-корреляции между ONI и средней ТВП Северного полушария являются статистически значимыми с вероятностью >95% для всех исследуемых 50 моделей СМІР6. Это свидетельствует о лидировании ЭНЮК и его значимых связях с ТВП Северного полушария. Таким образом, результаты экспериментов "Historical" и "piControl" моделей СМІР6 подтверждают сделанное по анализу данных наблюдений заключение о возможности прогнозирования средней температуры Северного полушария на 1-4 года вперед на основе заблаговременного прогноза сильных событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

ДИСКУССИЯ

Полученные результаты показали, что события Эль-Ниньо, характеризующиеся преимущественно положительными аномалиями температуры поверхности на востоке и в центре экваториального Тихого океана, влияют на температуру всего Северного полушария. Можно предложить следующий физический механизм этого влияния. В период нагревания поверхности океана в регионе ЭНЮК за счет испарения в атмосферу также выбрасывается и водяной пар. Когда теплый и влажный воздух над тропиками Тихого океана поднимается в более высокие слои тропосферы, влага в воздухе конденсируется, выделяя дополнительное скрытое тепло, что приводит к увеличению прогрева воздуха. Теплый воздух прони-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 65 № 1 2025

кает в верхние слои тропической тропосферы, и в этих слоях он может свободно распространяться и легко распределять тепло, благодаря чему региональные температурные различия выравниваются во всем тропическом поясе. Таким образом, тепло над Тихим океаном от конвекции в регионе ЭНЮК распространяется по всем тропикам. Более того, затем это тепло благодаря ячейке Хэдли также распространяется за пределы тропиков и влияет на температуру атмосферы в средних широтах. Температура воздуха у поверхности континентов Северного полушария приходит в равновесие с более высокими температурами в верхних слоях тропосферы над ней, и, поскольку эта поверхность относительно сухая, она нагревается сразу без охлаждающего ее испарения.

В работе [36] опубликованы результаты модельных экспериментов, в ходе которых авторы повышали и понижали температуру поверхности океанов в тропиках и получили результаты, демонстрирующие, что температура воздуха над сушей варьируется сильнее, чем температура поверхности океана. При моделировании условий ЭНЮК, если температура поверхности тропиков Тихого океана увеличивалась или уменьшалась на 1°C, то глобальная температура суши повышалась или понижалась почти на 1.5°C. Таким образом, температура на континентах Северного полушария реагирует на ЭНЮК.

Именно тропические океаны обладают столь сильным влиянием на глобальную температуру из-за тропической конвекции — тенденции теплого воздуха и влаги подниматься высоко в тропосферу. Атмосферная конвекция в тропиках достигает высоты ~ 5-10 км над океаном, унося тепло в средние и верхние слои тропосферы. Этому способствует выделение тепла из конденсирующейся влаги в тропическом воздухе. Более холодные океаны в умеренных и высоких широтах не способны испарять столько водяного пара и, следовательно, генерировать конвекцию, достигающую такой высоты.

Температура Северного полушария колеблется около среднего значения, которое увеличивается в результате глобального потепления. Вместе с этим, в настоящее время (2023–2024 гг.) в Тихом океане происходит событие Эль-Ниньо, которое, как ожидается, закончится летом 2024 года. Поскольку нынешнее Эль-Ниньо сочетается с фоновым потеплением, вызванным изменением климата, то можно ожидать, что температура Северного полушария в 2024 году потенциально превысит или будет на уровне рекордного значения 2023 года. Причем эти рекордные за все время исторических наблюдений положительные аномалии температуры Северного полушария в 2023 и 2024 гг. можно было спрогнозировать заранее (в конце 2022 г.) благодаря заблаговременному прогнозу текущего события Эль-Ниньо на основе западно-восточного распространения пространственной структуры ГАО [34].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована динамика средних температур Северного полушария для нижней тропосферы, 2-метрового слоя воздуха и верхнего 100-метрового слоя океана. Найдено сходство между динамикой всех этих рядов в том, что они состоят из двух компонент: общего тренда потепления и колебания температур квазидесятилетнего масштаба.

Высказана гипотеза, что современное потепление температуры приповерхностного слоя воздуха, в силу его малой теплоемкости, не вызвано непосредственно нарушением радиационного баланса Земли как планеты за счет роста концентрации парниковых газов в атмосфере. Скорее оно является результатом теплового взаимодействия приповерхностного слоя воздуха с вышележащим слоем нижней тропосферы и нижележащими слоями океана. А уже эти слои непосредственно подвержены влиянию нарушения радиационного баланса Земли как планеты.

Особенности автокорреляционных функций квазидесятилетних колебаний температур Северного полушария оказались таковы, что их можно предсказывать с заблаговременностью 1–4 года. Это главный практический результат данной работы.

Выполненная оценка энергетического спектра с максимальным разрешением нормированных временных рядов средних аномалий годовых температур воздуха у поверхности Северного полушария по результатам эксперимента "Historical" для 58 моделей СМІР6 за 1851–2014 гг. выявила спектральные пики на следующих периодах: 5.7, 7.2, 8.9, 10.1, 15.6, 21.8 и 26.7 лет, которые можно отнести как к внутренней динамике климатической системы, так и к ее отклику на внешние воздействия.

Показано, что важным фактором в изменениях средней температуры Северного полушария, помимо глобального потепления и квазидесятилетней внутренней естественной изменчивости климатической системы, являются крупные извержения вулканов. Это добавляет существенную неопределенность в прогнозы изменений средней температуры Северного полушария. При этом результаты экспериментов "Historical" и "piControl" для моделей СМІР6 продемонстрировали возможность прогноза изменений средней температуры Северного полушария на несколько лет вперед на основе естественной межгодовой климатической изменчивости, главной компонентой которой является Эль-Ниньо – Южное колебание.

Источники финансирования. И.В. Ceрых выполнил данное исследование в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по теме № FMWE-2024-0017 "Долгопериодная эволюция океанской циркуляции и потоков на границе океан-атмосфера и роль океана в формировании климата". Вакуленко Н.В. выполнила данную работу в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по теме № FMWE-2024-0015 "Гидрофизические процессы, формирующие экологическое состояние внутренних и окраинных морей и прибрежной зоны океана".

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арушанов М.Л. Причины изменения климата Земли как результат космического воздействия, развеивающее миф об антропогенном глобальном потеплении // German International J. Modern Sci. 2023. № 53. С. 4–14.

https://doi.org/ 10.5281/zenodo.7795979

- 2. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. и др. О статистической значимости и климатической роли Глобальной атмосферной осцилляции // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 179–185. https://doi.org/10.7868/S0030157416020039
- 3. Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Монин А.С., Сонечкин Д.М. Особенности календаря ледниковых циклов позднего плейстоцена // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 6. С. 773–782.
- 4. Вакуленко Н.В., Нигматулин Р.И., Сонечкин Д.М. К вопросу о глобальном изменении климата // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 89–97.
- 5. Вакуленко Н.В., Сонечкин Д.М. Свидетельство скорого окончания современного межледни-ковья // Докл. АН. 2013. Т. 452. № 1. С. 92–95. https://doi.org/10.7868/S0869565213260198
- 6. Володин Е.М. О механизме колебания климата в Арктике с периодом около 15 лет по данным модели климата ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 139–149. https://doi.org/10.31857/S0002351520020145
- Логинов В.Ф. Космические факторы климатических изменений // ГНУ "Институт природопользования НАН Беларуси". Минск: 2020. 168 с.

- Нигматулин Р.И., Вакуленко Н.В., Сонечкин Д.М. Глобальное потепление в реальности и в климатических моделях // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Труды междунар. конф. памяти А.М. Обухова. 13–16 мая 2013 / Ред. Голицын Г.С. и др., М.: ГЕОС, 2014. С. 255–263.
- Полонский А.Б. Изменения климата: мифы и реальность // Министерство науки и высшего образования РФ РАН. Севастополь: Институт природно-технических систем, 2020. 229 с. https://doi.org/10.33075/978-5-6044196-5-6
- Семенов В.А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера – арктические льды – океан // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т. 1. С. 232–248.
- 11. Семенов В.А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 21–33. https://doi.org/10.31857/S0002351521010119
- 12. Сонечкин Д.М., Даценко Н.М., Иващенко Н.Н. Оценка тренда глобального потепления с помощью вейвлетного анализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1997. Т. 33. № 2. С. 184–194.
- Шерстюков Б.Г. Асинхронные связи колебаний климата атмосферы и океана с солнечной активностью // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62. № 5. С. 671–680.
 - https://doi.org/10.31857/S0016794022050121
- Шерстюков Б.Г. Глобальное потепление и его возможные причины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 7–37. https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37
- Bast J.L. Seven Theories of Climate Change // SPPI Reprint Series. Chicago: The Heartland Institute, 2010. 29 p.
- Enfield D.B., Mestas-Nuñez A.M. Multiscale variabilities in global sea surface temperatures and their relationships with tropospheric // J. Climate. 1999. V. 12. P. 2719–2733. https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2719: MVIGSS>2.0.CO;2
- Eyring V., Bony S., Meehl G.A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geosci. Model Dev. 2016. V. 9. P. 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016
- Gregory J.M., Andrews T., Ceppi P. et al. How accurately can the climate sensitivity to CO₂ be estimated from historical climate change? // Clim. Dyn. 2020. V. 54. P. 129–157.

https://doi.org/10.1007/s00382-019-04991-y

- Gregory J.M., Andrews T., Good P. et al. Small global-mean cooling due to volcanic radiative forcing // Clim. Dyn. 2016. V. 47. P. 3979–3991. https://doi.org/10.1007/s00382-016-3055-1
- 20. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2013: The Physical Science Basis. Con-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 65 № 1 2025

tribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, et al. (eds.). Cambridge Univ. Press. 2013. 1535 p.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Masson-Delmotte et al. (eds.) Cambridge Univ. Press. 2021. In press. https://doi.org/10.1017/9781009157896
- 22. *Kalicinsky C., Koppmann R.* Multi-decadal oscillations of surface temperatures and the impact on temperature increases. // Sci. Rep. 2022. V. 12. 19895. https://doi.org/10.1038/s41598-022-24448-3
- Latif M. Chapter 25 The Ocean's role in modeling and predicting decadal climate variations // International Geophysics. 2013. V. 103. P. 645–665. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391851-2.00025-8
- 24. Locarnini R.A., Mishonov A.V, Baranova O.K. et al. World Ocean Atlas 2018, V. 1: Temperature // A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS81. 2018. 52 p.
- Mazza D., Canuto E. Evidence of solar 11-year cycle from Sea Surface Temperature (SST) // Academia Letters. 2021. 3023. https://doi.org/10.20935/AL3023.
- Mears C.A., Wentz F.J. A satellite-derived lower tropospheric atmospheric temperature dataset using an optimized adjustment for diurnal effects // J. Clim. 2017. V. 30. № 19. P. 7695–7718. https://doi.org/10.1175/jcli-d-16–0768.1
- Meehl G.A., Goddard L., Murphy J. Decadal prediction: Can it be skillful? // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2009. V. 90. № 10. P. 1467–1485. https://doi.org/10.1175/2009BAMS2778.1
- Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A. et al. An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 dataset // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2020. https://doi.org/10.1029/2019JD032361
- Nnamchi H.C., Farneti R., Keenlyside N.S. et al. Pan-Atlantic decadal climate oscillation linked to ocean circulation // Commun. Earth Environ. 2023. V. 4(121). https://doi.org/10.1038/s43247-023-00781-x
- Ogurtsov M. Decadal and bi-decadal periodicities in temperature of Southern Scandinavia: Manifestations of natural variability or climatic response to solar cycles? // Atmosphere. 2021. V. 12. P. 676. https://doi.org/10.3390/atmos12060676
- Scafetta N. Empirical analysis of the solar contribution to global mean air surface temperature change // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2009. V. 71. P. 1916–1923. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.07.007
- Scafetta. N. Climate change and its causes: A discussion about some key issues // La Chimica e l'Industria 1. 2010. P. 70–75.

ВАКУЛЕНКО и др.

- Serykh I.V., Sonechkin D.M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin // Theoretical and Applied Climatology. 2019. V. 137. № 3–4. P. 2639–2656. https://doi.org/10.1007/s00704-018-02761-0
- Serykh I.V., Sonechkin D.M. El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation // Int. J. Climatol. 2021. V. 41. P. 3781–3792. https://doi.org/10.1002/joc.6488
- 35. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Global El Niño–Southern Oscillation Teleconnections in CMIP6 Models // Atmosphere. 2024. V. 15 № 4 (500). P. 500. https://doi.org/10.3390/atmos15040500
- Tyrrell N.L., Dommenget D., Frauen C. et al. The influence of global sea surface temperature variability on the large-scale land surface temperature // Clim. Dyn. 2015. V. 44. P. 2159–2176. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2332-0
- Welch P.D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. 1967. AU-15 (2). P. 70–73.
- Zhoua W., Li J., Yan Z. Progress and future prospects of decadal prediction and data assimilation: A review // Atmospheric and Oceanic Sci. Lett. 2024. V. 17 (100441). https://doi.org/10.1016/j.aosl.2023.100441

DECADAL OSCILLATIONS OF THE NORTHERN HEMISPHERE AVERAGE TEMPERATURE WITHIN CURRENT GLOBAL WARMING

N. V. Vakulenko, I. V. Serykh*, D. M. Sonechkin

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia *e-mail: iserykh@ocean.ru

The average temperatures of the Northern Hemisphere for surface air, the lower troposphere and the upper layer of the ocean from 0 to 100 meters are considered. It turned out that all these time-series are similar to each other in that they consist of two components: a warming trend and fluctuations on an approximately ten-year scale superimposed on this trend. It is hypothesized that this quasi-decadal temperature variability is associated with the El Niño–Southern Oscillation. After removing trends from the series under study, their autocorrelation functions demonstrate an exponential decrease and subsequent fluctuations near zero with shifts of approximately 5 years or more, which theoretically makes it possible to predict their changes with a lead-time of 1–4 years. An analysis of the results of the "Historical" experiment of 58 CMIP6 models confirmed the conclusions drawn and showed that the quasi-decadal variability of the average surface air temperature of the Northern Hemisphere is significantly influenced by large volcanic eruptions. Results from the "piControl" experiment of 50 CMIP6 models demonstrated the ability to predict changes in average Northern Hemisphere temperatures several years into the future based on natural interannual climate variability, the main component of which is the El Niño–Southern Oscillation.

Keywords: temperature, global warming, quasi-decadal oscillations, lower troposphere, upper ocean, El Niño–Southern Oscillation, CMIP6 models, volcanic eruptions

22