

УДК 551.583:551.546.7(98)«451»

О ПРИЧИНАХ ПЕРВОГО ПОТЕПЛЕНИЯ АРКТИКИ В XX СТОЛЕТИИ

В.Н. Малинин, П.А. Вайновский

Российский государственный гидрометеорологический университет, malinin@rshu.ru

Рассматриваются возможные причины потепления Арктики 20—40-х годов прошлого столетия, которые до сих пор не выяснены. Исходными данными о температуре воздуха послужил уникальный проект Berkeley Earth Surface Temperature (BEST), в рамках которого создан архив, объединяющий 1,6 млрд отчетов температуры воздуха только для поверхности Земли. Сравнение первого потепления со вторым (начиная с 1979 г.) показало, что интенсивность их примерно одинакова. Выявлены очаги потепления и показано, что процесс потепления проходил неодинаково в Американском и Евразийском регионах Арктики. Установлен сложный характер формирования потепления в этих регионах. С помощью регрессионного анализа показано, что потепление в Евразии ($R^2 = 0,87$) описывают два океанических фактора (атлантическая мультидекадная осцилляция и температура воды на Кольском разрезе) и два атмосферных фактора (арктическое колебание и форма циркуляции E). В Американском регионе потепление описывается ($R^2 = 0,81$) тепловым состоянием воды (тихоокеанская мультидекадная осцилляция) и тремя атмосферными факторами (северотихоокеанская осцилляция, форма циркуляции M₁ и арктическое колебание).

Ключевые слова: потепление Арктики, атмосферная циркуляция, температура поверхности океана, климатические индексы, ледовитость, регрессионные модели.

ON THE CAUSES OF THE FIRST WARMING OF THE ARCTIC IN THE 20TH CENTURY

V.N. Malinin, P.A. Vainovsky

Russian State Hydrometeorological University

The possible causes of the warming of the Arctic in the 20–40s of the last century, which have not yet been clarified, are considered. A unique project Berkeley Earth Surface Temperature (BEST), within which a unified archive combining 1.6 billion air temperature reports for the Earth's surface only was created, has served as the initial data on air temperature. Comparison of the first and the second warmings (since 1979) shows their intensity being approximately the same. Centers of the warming are revealed and it is shown that the warming process took place unequally in the American and Eurasian regions of the Arctic. The complex nature of the formation of warming in these regions is established. Using regression analysis, it is shown that two oceanic factors (Atlantic multi-decade oscillation and water temperature on the Kola section) and two atmospheric factors (Arctic oscillation and E-form circulation) describe the warming in Eurasia with high accuracy ($R^2 = 0.87$). In the American region, the warming is best described ($R^2 = 0.81$) by the thermal state of water (Pacific multi-decade oscillation) and three atmospheric factors (North Pacific Oscillation, M1 and Arctic Oscillation).

Keywords: Arctic warming, warming genesis, atmospheric circulation, sea surface temperature, climate indices, ice coverage, regression models.

Введение

В историю климата 20—40-е годы прошлого столетия вошли как «потепление Арктики». Действительно, именно в высоких широтах Северного полушария

потепление было выражено максимально. Несмотря на то что прошло почти сто лет, причины данного потепления до сих пор не выяснены [21]. По мнению авторов работы [26], «арктическое потепление 1920—1940 гг. — одно из самых впечатляющих климатических явлений XX века». Однако не вызывает сомнений тот факт, что оно было обусловлено естественными причинами [16, 38] и не было связано с антропогенной деятельностью. Очевидно, что изучение генезиса потепления затруднено малым количеством и низким качеством данных наблюдений, которые имеют неравномерное пространственно-временное распределение с большими пробелами до 1950 г. [4].

Существует целый ряд работ ([4, 27, 33, 38, 39] и др.), в которых с той или иной степенью подробности рассматриваются различные аспекты потепления, но наиболее обстоятельно вопрос о его механизмах обсуждается в работе [26]. По мнению авторов [26], потепление было инициировано значительным усилением юго-западного ветра к северу от Норвегии, что привело к интенсификации переноса атмосферного и океанского тепла теплым Северо-Атлантическим течением через проход между Норвегией и Шпицбергом в Баренцево море. При этом потепление было обусловлено, прежде всего, переносом теплой океанской воды в верхнем 125-метровом слое, в результате чего произошло заметное уменьшение ледовитости в Баренцевом море. Однако причины усиления ветра остались невыясненными. Авторы предположили наличие положительной ветровой обратной связи, в результате чего в период положительной аномалии температуры поверхности океана повышается приводная температура воздуха и ускоряется таяние льда. При этом усиление передачи тепла нижней атмосфере вызывает локальное падение давления, увеличение сходимости ветра (циклоничности) и усиление западных ветров. В итоге приток теплых океанических вод возрастает, но из-за отсутствия необходимых данных доказать это не представлялось возможным.

После этого потепления наступил период относительного похолодания, который продлился до середины 70-х годов. В конце 70-х годов началось второе потепление Арктики: в 2011 г. был достигнут абсолютный максимум среднегодовой температуры воздуха в Арктике за период с 1891 г. Затем произошло кратковременное понижение температуры воздуха, после чего опять началось ее повышение. Что касается причин второго потепления, то здесь мнения исследователей кардинально расходятся. По мнению экспертов МГЭИК [29], «...в высшей степени вероятно (*extremely likely*, 95—100 %), что влияние человека является доминирующей причиной наблюдаемого потепления с середины XX столетия», и, таким образом, естественные факторы были полностью проигнорированы. Противоположная точка зрения высказывается в работах сотрудников ААНИИ [11, 12, 24], согласно которым глобального потепления как такового вообще не существует, а есть естественные циклы с фазами относительного потепления и похолодания. Возможно, истина находится где-то посередине.

Цель настоящей работы — оценка интенсивности первого потепления в разных районах Арктики и выявление факторов, его формирующих. При этом будем отличать сам *процесс потепления* (промежуток времени между температурными

экстремумами) от его *теплой фазы*, в течение которой температура воздуха (ТВ) остается выше нормы. Отметим, что для анализа процесса потепления использовались тщательно отобранные наиболее достоверные эмпирические данные.

Исходные данные

В качестве исходной информации использовались значения температуры воздуха у поверхности Земли (ТВ), синтезированные в NASA Goddard Institute of Space Science (NASA GISS) в рамках уникального проекта Berkeley Earth Surface Temperature (BEST). Указанные данные находятся в свободном доступе на сайте <http://berkeleyearth.org/data/>. Уникальность проекта состоит в том, что в его рамках был создан архив данных, объединяющий 1,6 миллиарда отсчетов температуры воздуха из 16 существующих архивов данных только для поверхности Земли. Наборы данных были разделены на три категории: выходные данные, исходные данные и промежуточные данные. В наборе исходных данных по возможности использовались необработанные данные вместо ранее отредактированных. После устранения дубликатов записей текущий архив содержит данные о температуре воздуха более 39 000 станций. Это примерно в пять раз больше, чем данные 7280 станций, найденных в ежемесячном наборе данных глобальной исторической климатологической сети (GHCN-M), который служил источником многих климатических исследований.

В архиве содержатся данные о средних, максимальных и минимальных значениях за период с 1880 г. по настоящее время. При этом в качестве временного осреднения используются сутки, месяц, год. Временные ряды аномалий температуры воздуха в архиве BEST генерируются в различном виде: для отдельных станций, как усредненные оценки по территориям различной площади вплоть до всей поверхности Земли, а также в формате NetCDF с сеткой. Предусмотрены два типа сеток: сетка, основанная на делении Земли на 15 984 ячейки равной площади, и сетка с шагом 1° по широте и долготе. В качестве базового периода осреднения для оценки аномалий температуры воздуха использовался период 1951—1980 гг. Более подробно методология и алгоритмы обработки данных и контроля их качества на всех этапах описаны в работах [35, 36]. Несомненно, авторы архива проделали грандиозную работу.

Рассмотрим методические аспекты использования архива BEST в нашей работе на примере межгодового хода аномалии средней годовой температуры воздуха, осредненной для широтной зоны $64\text{--}90^\circ$ с.ш. за период 1900—2014 гг. (рис. 1). На рисунке отчетливо проявляются два ярко выраженных потепления. Первое приходится на период 1919—1938 гг., второе, более длительное, — на период 1979—2011 гг. В табл. 1 приведены статистические характеристики этих потеплений. Градиент определялся как амплитуда потепления, деленная на его продолжительность, а вклад тренда в дисперсию — по коэффициенту детерминации. Как следует из табл. 1, первое потепление несколько сильнее второго: градиент и значение тренда для него выше.

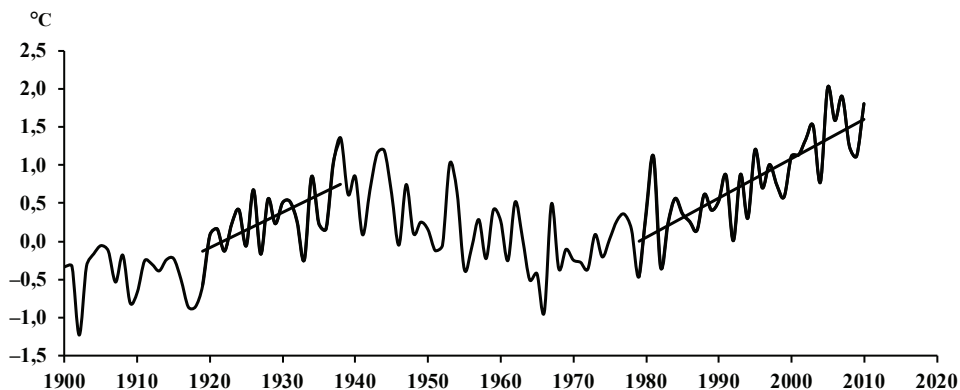


Рис. 1. Межгодовой ход аномалии средней годовой температуры воздуха (°C), осредненной для широтной зоны 64—90° с.ш. за период 1900—2014 гг.

Естественно, в разных районах сроки потепления, его продолжительность, амплитуда и интенсивность могут сильно различаться. Поэтому авторами выполнен подобный анализ характеристик потепления по среднегодовым, зимним (декабрь — февраль) и летним (июнь — август) значениям аномалии температуры воздуха для тех районов, данные по которым представлены в архиве BEST. При этом рассматривались районы с достаточно обширной территорией, ибо понятно, что оценка характеристик потепления в узлах сетки малоинформативна.

В результате было выбрано 12 районов, расположенных в основном севернее параллели 60° с.ш., которые были сгруппированы в два региона по принципу их географической близости: Евразийский регион, состоящий из семи районов (Шпицберген, Исландия, Норвегия, Таймыр, Ямал, Якутия, Чукотка) и Американский регион, состоящий из пяти районов (Аляска, Юкон, Нунавут, Северные территории Канады, Гренландия). Из этих районов четыре относятся к России, три — к Канаде. Самый маленький район — о. Шпицберген, самый крупный — Северные территории Канады. Для каждого из этих районов в архиве BEST выполнено усреднение температуры воздуха по имеющимся первичным данным. Естественно, что точность полученных оценок характеристик потепления полностью зависит от надежности используемого авторами архива BEST.

Таблица 1

Статистические характеристики
повышения средней годовой температуры воздуха
в широтной зоне 64—90° с.ш. по данным архива BEST

Потепление	Начало	Конец	Продолжительность	Амплитуда, °C	Градиент, °C/год	Тренд, °C/год	Вклад тренда в дисперсию, %
Первое	1919	1938	19	2,28	0,12	0,065	0,52
Второе	1979	2011	32	2,72	0,08	0,059	0,64

Результаты расчетов и их обсуждение

Прежде всего рассмотрим особенности интенсивности двух потеплений климата для широтных зон Северного полушария (рис. 2). Из рисунка следует исключительная роль Арктики в первом потеплении (1919—1938 гг.): интенсивность потепления в Арктике, определяемая по величине тренда, в три раза выше, чем в умеренных широтах. Второе потепление (1979—2011 гг.) развивалось практически на всем полушарии, хотя в Арктике его интенсивность также была существенно выше. Значительно более высокие темпы повышения температуры в Северной полярной зоне по сравнению с глобальным потеплением иногда называют арктическим усилением [1, 34].

Обратимся теперь к оценке двух потеплений для выделенных нами 12 северных районов (табл. 2). Продолжительность первого потепления заметно короче только для среднегодовых условий. Для лета и зимы продолжительность обоих потеплений близка. Это означает, что продолжительность второго потепления увеличилась в основном за счет переходных сезонов, т.е. весны и осени. Наиболее ярко оба потепления выражены зимой. Для первого потепления оценка тренда в три раза выше по сравнению с летом, для второго — в два раза выше.

Таблица 2

Статистические характеристики периодов повышения средней годовой температуры воздуха в Арктике, осредненные для 12 районов севернее параллели 60° с.ш.

Период	Начало	Конец	Продолжительность	Амплитуда, °С	Градиент, °С/год	Тренд, °С/год	Вклад тренда в дисперсию, %
<i>Первое потепление</i>							
Год	1916	1938	22,9	3,47	0,16	0,064	0,30
Лето	1916	1937	20,6	2,82	0,16	0,048	0,15
Зима	1917	1936	19,5	7,67	0,42	0,147	0,25
<i>Второе потепление</i>							
Год	1975	2005	29,9	3,69	0,13	0,077	0,24
Лето	1984	2005	18,6	3,10	0,16	0,050	0,20
Зима	1978	2004	23,3	7,93	0,33	0,105	0,19

Отметим, что максимальная амплитуда зимнего потепления в работе [26] отмечалась преимущественно в Карском море, где за период 1935—1944 гг. она составила 2 °С. По данным авторов, зона максимальной зимней интенсивности первого потепления была значительно больше и простиралась по всей территории Сибири — от Ямало-Ненецкого округа до Чукотки. Средний градиент температуры воздуха здесь составлял 0,55—0,59 °С/год, а максимальный тренд достигал 0,22 °С/год на Таймыре и 0,20 °С/год в Ямало-Ненецком округе. Следующим по значимости является интенсивность потепления на Шпицбергене, где градиент температуры и тренд составляли 0,41 и 0,18 °С/год. В северных провинциях Канады градиент был чуть меньше: 0,3—0,4 °С/год, причем тренд температуры оказался незначимым. Заметим, что потепление в Канаде было выражено и в более низких широтах. В провинции Квебек градиент температуры достигал 0,36 °С/год.

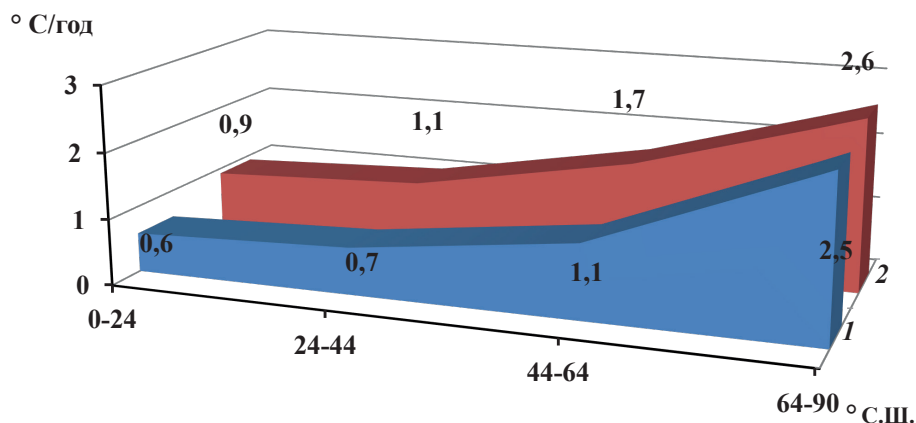


Рис. 2. Оценки величины тренда двух потеплений климата для широтных зон Северного полушария по средним годовым значениям температуры воздуха по данным архива BEST.
1) 1919—1938 гг., 2) 1979—2011 гг.

Что касается зимнего второго потепления, то можно выделить два очага наибольшей интенсивности — это Аляска с Северо-Западными территориями Канады и Ямал с Таймыром. Центром первого очага являются Северо-Западные территории Канады, где градиент температуры воздуха был равен $0,53\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а тренд — $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Центр второго очага отмечается на Таймыре, где градиент температуры воздуха и тренд составляют $0,42$ и $0,11\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ соответственно. Яркое выраженное зимнее потепление отмечалось в более южной провинции Канады Ньюфаундленд и Лабрадор, где градиент температуры достигал $0,54\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а тренд $0,21\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Таким образом, данные табл. 1 и 2 ясно показывают, что интенсивность первого и второго потепления была примерно одинаковой. При этом для годовых и летних промежутков времени интенсивность обоих потеплений очень близка, но в три (первое потепление) и в два (второе потепление) раза уступает интенсивности зимних потеплений.

Поскольку первое потепление происходило неодинаково в Северной Америке и Евразии, на рис. 3 представлен межгодовой ход трехлетней скользящей средней температуры воздуха, осредненной отдельно для Америки (пять районов) и Евразии (семь районов). Действительно, из рис. 3 видны существенные различия процесса повышения температуры в этих регионах. В Евразии потепление началось в 1917 г., т.е. на два года раньше, чем в Америке, и раньше закончилось (1936 г.). В Америке оно продолжалось до 1942 г.

Наиболее важной особенностью потепления является то, что оно происходило в два этапа. Очень ярко это проявилось в Американском регионе, где первый этап приходится на период 1919—1928 гг., после чего к 1934 г. происходит интенсивное понижение температуры воздуха — почти на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем начался

второй этап потепления с не менее интенсивным повышением ТВ. В Евразии наблюдалось существенно более слабое понижение ТВ в период 1922—1927 гг. — на $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такие существенные расхождения значений ТВ между этими регионами заметно сказываются на величине статистической связи. Корреляция между ТВ в Америке и Евразии ($ТВ_{AP}$ и $ТВ_{EB}$) составляет $r = 0,33$, причем после удаления линейного тренда она становится даже отрицательной: $r = -0,57$. Отметим, что при использовании критерия Стьюдента при $\alpha = 0,05$ значимые коэффициенты корреляции соответствуют условию $r_{кр} > 0,43$ [6]. Совершенно очевидно, что процесс потепления в указанных регионах в значительной степени вызван разными факторами.

Одно из возможных объяснений первого потепления связано с 60-летним циклом изменения температуры воздуха, существование которого неоднократно отмечалось ранее [10, 12, 17, 18]. В качестве примера приведем на рис. 4 график вейвлет-разложения среднегодовых значений глобальной ТВ у подстилающей поверхности за 1855—2005 гг. по данным архива HadCRUT3 [17]. Нетрудно видеть, что наиболее мощным по амплитуде и мало изменяющимся в течение всего периода наблюдений является 60-летний цикл, вклад которого в общую дисперсию исходного процесса равен $R^2 = 0,12$. Максимумы этого цикла, согласно рис. 4, отмечаются в 1880, 1940 и 2000 гг.

Существенно более мощным по сравнению с глобальным циклом 60-летний цикл оказывается в Арктике [12, 24], где ярко проявляется в чередовании теплых и холодных эпох. Внешне это очень привлекательная гипотеза, которая довольно просто объясняет генезис обоих потеплений. Однако природа 60-летнего колебания до настоящего времени неизвестна. Очевидно, первое предположение было высказано в работе [18], в которой этот цикл объясняется взаимным расположением Солнца, Юпитера и Сатурна.

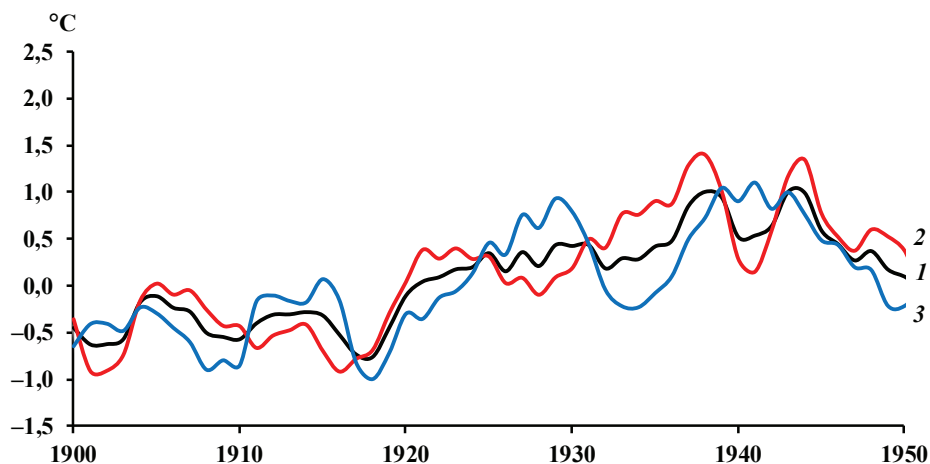


Рис. 3. Межгодовой ход трехлетней скользящей средней температуры воздуха, осредненной по 12 районам Арктического бассейна (1), для Евразии (2) и Америки (3).

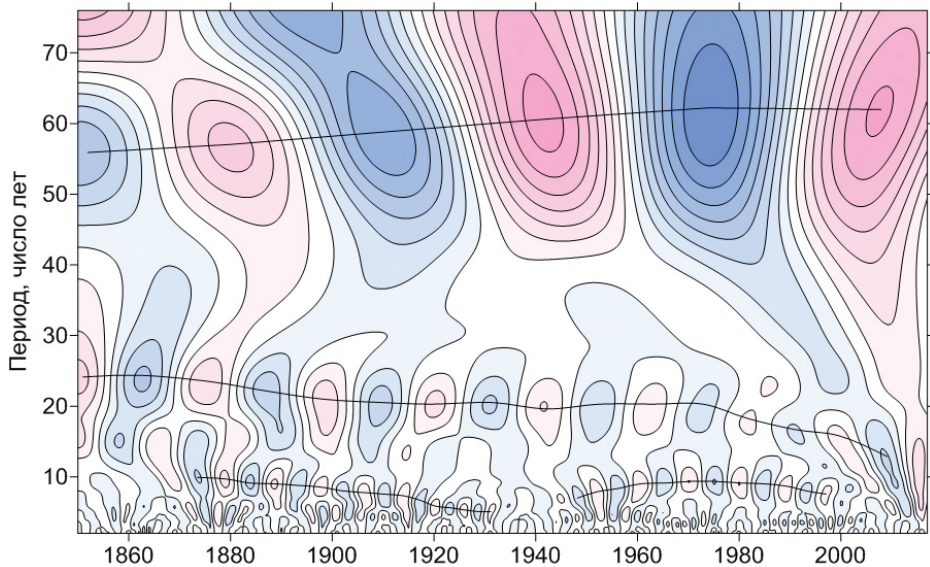


Рис. 4. Вейвлет-разложение ряда среднегодовых аномалий глобальной температуры воздуха по данным архива HadCRUT3 [17].

Более подробно причины возникновения 60-летнего цикла рассмотрены в работе [11]. По мнению авторов этой работы, он обусловлен влиянием «диссимметрии солнечной системы». Это понятие обозначает смещение центра Солнца относительно центра масс солнечной системы под влиянием планет (главным образом, Юпитера и Сатурна). Ее воздействие на земную атмосферу может осуществляться как посредством солнечной активности, так и вследствие изменений расстояния между Землей и Солнцем, связанных с явлением «диссимметрии». Воспользовавшись данными работы [28], авторы [11] обнаружили 60-летний цикл в изменениях общей энергии Солнца, амплитуда которого достигает $4,0 \text{ Вт/м}^2$, что, по их мнению, не только свидетельствует в пользу этой теории, но и дает основание для объяснения обнаруженного увеличения роли 60-летних циклов с широтой и оппозиции их влияния на климатические изменения в Арктике и Антарктике. Так, вклад тренда в дисперсию в широтной зоне $70\text{—}85^\circ \text{ с.ш.}$ составляет 13 %, а 60-летнего цикла — 39 %. Однако выполненный в работе [17] довольно подробный анализ изменений общей энергии Солнца, поступающей на верхнюю границу атмосферы (Total Solar Irradiance, TSI), показал отсутствие этого цикла в TSI.

Отметим, что спектральный анализ данных о температуре воздуха внетропической (выше 30° с.ш.) части Северного полушария за последние две тысячи лет [5], которые были получены шведским ученым Лундквистом [32] в результате тщательной реконструкции колец деревьев, показал отсутствие значимого цикла в диапазоне $50\text{—}70$ лет. Кроме того, если бы 60-летний цикл существовал, то после 2000 г. должно было бы происходить понижение температуры воздуха. Тем не

менее температура продолжает повышаться. Все это свидетельствует о том, что 60-летний цикл является лишь случайным колебанием, которое может как неожиданно возникнуть, так и неожиданно исчезнуть.

Поскольку в Антарктиде в 20—40-е годы аналогичного потепления не наблюдалось, то становится понятным, что потепление в Арктике вызвано в основном совокупностью региональных факторов, которые действовали однонаправленно в сторону усиления процесса потепления. Перечислим вначале основные факторы, которые могут влиять на потепление в Евразийском регионе Арктики.

1. *Арктическое колебание* (АК). Индекс АК отражает противоположно направленные изменения давления в Арктике и в умеренных широтах. Индекс АК определяется как первая мода разложения на естественные ортогональные функции давления на уровне моря в Северном полушарии (20—90° с.ш.) [37]. Соответственно один центр давления находится в Арктике, а другой — в умеренных широтах. Выделяют положительную (теплую) и отрицательную (холодную) фазы АК. При положительной фазе отмечается пониженное давление в Арктике и более высокое в умеренных широтах. При отрицательной фазе картина обратная. Пониженному давлению в Арктике соответствует интенсивный циркумполярный вихрь, который способствует усилению зональной циркуляции в тропосфере. При этом, как правило, отмечаются положительные аномалии ТВ в Арктике. При отрицательной фазе, наоборот, происходит усиление полярного антициклона и соответственно понижение ТВ. Отметим, что в индексе АК в соответствии с данными сайта https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/AO/ отмечается положительный тренд с 1916 по 1937 г., причем формирование тренда обусловлено резким увеличением индекса АК в период с 1916 г. (когда его значение было экстремально низким) до 1923 г. (рис. 5).

2. *Атлантическая мультideкадная осцилляция* (АМО) представляет собой долгопериодное изменение температуры поверхности в Северной части Атлантического океана (0—70° с.ш.), которое характеризуется большой продолжительностью холодных и теплых фаз в диапазоне от 20 до 50 лет. Характерный масштаб продолжительности фаз АМО, по-видимому, определяется интенсивностью меридиональной океанической циркуляции в Северной Атлантике. Для положительной (отрицательной) фазы АМО характерно сочетание отрицательных (положительных) значений индексов Северо-Атлантического колебания [22]. Главным механизмом влияния АМО на климатический режим является атмосферная реакция на термические аномалии в океане, приводящая к смещению центров действия атмосферы, изменению интенсивности и преобладающего направления распространения атмосферных циклонов и антициклонов [20]. Среднемесячные данные индекса АМО, которые имеют постоянную поддержку, представлены на сайте <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.KAPLAN/.EXTENDED/.v2/.sst/>. Помимо данных об интегральном индексе АМО, на этом же сайте представлены среднемесячные данные об аномалии температуры поверхности океана в Северной Атлантике (СА) с 1856 г. по настоящее время для пятиградусных квадратов. Экстремально низкое значение АМО отмечалось в 1914 г., а максимальное положительное значение — в 1933 г., причем наиболее интенсивный рост АМО

наблюдался с 1922 г. (см. рис. 5). За столь короткий срок ТПО в СА повысилась на $0,66^{\circ}\text{C}$, т.е. каждый год ТПО повышалась примерно на $0,04^{\circ}\text{C}$.

3. *Северо-Атлантическое колебание* (САК) представляет собой разность атмосферного давления между азорским максимумом и исландским минимумом. Как известно, положительная фаза САК означает усиление западного геострофического переноса воздушных масс в умеренных широтах, усиление южных ветров в восточной части Северной Атлантики, усиление северных ветров на море Лабрадор, смещение траекторий циклонов на север, что в конечном счете вызывает формирование отрицательных аномалий температуры воды в умеренных и субполярных широтах. Для отрицательной фазы САК характерна обратная ситуация: создаются благоприятные условия для повышения температурной аномалии ТПО вследствие преобладающих ветров юго-западных направлений над областью Северо-Атлантического течения [2, 19]. Естественно, это приводит к усилению притока теплой воды в Северо-Европейский бассейн (СЕБ) и в Баренцево море, что проявляется в уменьшении ледовитости и повышении температуры воды на разрезе по Кольскому меридиану. Это означает, что должна отмечаться отрицательная корреляция между АМО и САК и положительная корреляция между АК и САК. Как будет показано ниже (см. табл. 4), именно такие закономерности свойственны первому потеплению. В настоящее время известно несколько вариантов представления индекса САК. В данной работе использовался индекс САК в виде разности давления между Гибралтаром и Исландией [30]. Средние месячные значения индекса брались с сайта <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/>. Межгодовая изменчивость индекса САК во время потепления Арктики имела сложный характер. В 1918 г. он имел небольшое отрицательное значение. Но уже в 1923 г. отмечалось экстремально высокое значение индекса САК. Затем, до 1940 г., происходило его постепенное уменьшение. Результатом стал слабый отрицательный тренд (см. рис. 5).

4. *Атмосферная циркуляция*. В качестве характеристик атмосферной циркуляции обычно используются различные индексы. Широко известны формы циркуляции Вангейгейма — Гирса, Дзердзеевского, Вительса, Каца и др. С точки зрения изучения атмосферной циркуляции над Арктикой широкое распространение получили формы циркуляции Вангейгейма — Гирса, которые довольно успешно используются в ААНИИ в долгосрочных метеорологических прогнозах. Процессы западной формы (W) характеризуются развитием зональных составляющих циркуляции и быстрым смещением с запада на восток барических образований. При развитии меридиональных форм циркуляции, когда формируются стационарные волны большой амплитуды, наблюдаются процессы формы Е и С, причем пространственное расположение гребней (ложбин) при этих формах циркуляции является противоположным. При макропроцессах восточной (Е) формы циркуляции траектории барических образований приобретают меридиональную составляющую, исландский минимум углублен, азорский и сибирский максимумы ослаблены. При этом над Европой формируется обширный антициклон, гребень которого ориентирован в Арктику. Вследствие этого происходит усиление адвекции теплого воздуха по западной периферии гребня, в том числе циклонов из зоны

исландской депрессии в Арктику, что способствует повышению ТВ. Циркуляционная эпоха с преимущественным развитием формы Е отмечалась в 1928—1939 гг., в период интенсивного потепления Арктики. Повышение ее повторяемости началось в 1924 г. (97 дней) и продолжалось до 1937 г. (230 дней), т. е. средний градиент составил 10,2 дней в год. Практически одновременно происходило ослабление формы W: со 185 дней в 1923 г. до 67 дней в 1937 г. т. е. со средним градиентом 8,4 дней в год [3]. Для тихоокеано-американского сектора аналогами данных форм являются разработанные А.А. Гирсом [9] формы циркуляции 3, M_1 и M_2 .

5. *Характеристики исландского минимума давления (ИМД)*. Вследствие более высокой изменчивости давления в исландском минимуме по сравнению с азорским максимумом, он формирует более 60 % межгодовой изменчивости САК. Однако вследствие близости к Арктике его непосредственное влияние на тепловой режим Арктики, особенно ее европейской части, значительно. Давление в центре ИМД повышалось с 1922 г. (989 гПа) по 1941 г. (1002 гПа), т. е. выросло на 11 гПа (см. рис. 1.6.2 в [7]). С учетом противофазности колебаний ИМД и арктического антициклона (АА) должно наблюдаться ослабление АА, что приводит к повышению ТВ. В период потепления происходили пространственные миграции центра ИМД. Если в 1917 г. центр ИМД занимал экстремально южное положение (58,9° с.ш.), то уже в 1922 г. он сместился севернее (65,8° с.ш.), вследствие чего произошло существенное ослабление арктического антициклона. Одновременно ИМД смещался с запада на восток и в 1923 г. находился в экстремально восточном положении. Именно смещение ИМД к северо-востоку при низком давлении в его центре в значительной степени обеспечило экстремально низкую ледовитость в СЕБ, Баренцевом море и повышение ТВ в европейской части Арктики, а также на северо-западе России [13]. В дальнейшем, по мере пространственного смещения ИМД (по широте на юг, по долготе на запад), его влияние на процесс потепления уменьшалось.

6. *Ледовитость*. Понятно, что ледовитость (площадь морских льдов) тесно связана с ТВ. Однако сведения о площади распространения льда в начале XX века были весьма приближенными и отрывочными. Известно, что изменчивость ледовитости для различных районов Арктики сильно различается. Максимальная изменчивость характерна для приатлантической Арктики, минимальная — для северо-восточных морей России. По ледовитости в СЕБ можно с большой вероятностью судить об изменчивости ледовитости всей Арктики.

В работе [14] выполнена реконструкция ледового режима Арктики с начала XX века. Экстремально высокая ледовитость в СЕБ отмечалась в 1916 г. (1,86 млн км²), а минимальная — в 1936 г. (1,02 млн. км²), т. е. уменьшение площади ледового режима происходило со скоростью 0,04 млн км². В других районах оно происходило с гораздо меньшей скоростью. Благодаря отрицательной обратной связи лед оказывает некоторое влияние на ТВ. При увеличении площади чистой воды повышается теплоотдача в атмосферу, что способствует повышению ТВ. Кроме того, при сдвиге к северу кромки льда сдвигаются к северу арктический климатический фронт и циклоническая деятельность. В результате траектории циклонов проходят по более высокоширотным, чем обычно, траекториям [14].

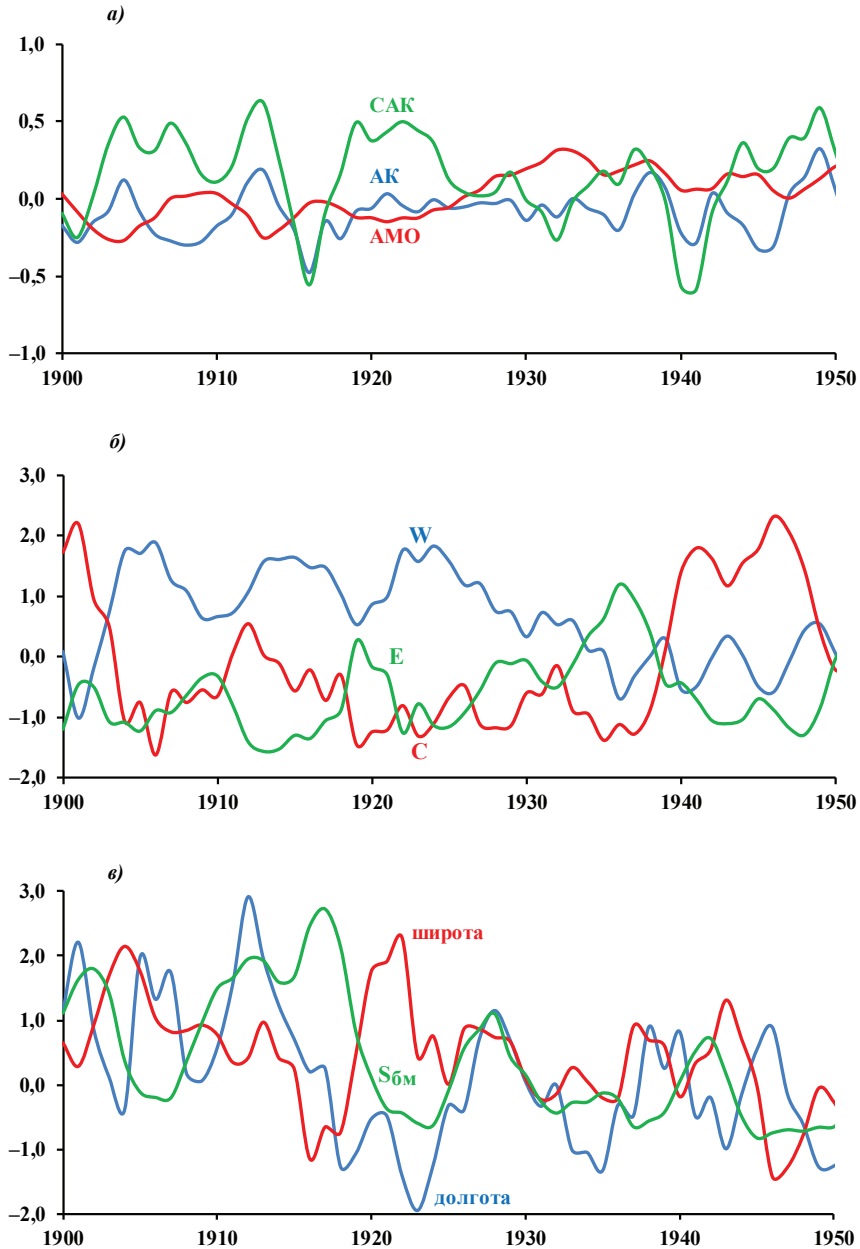


Рис. 5. Межгодовой ход стандартизованных и сглаженных по трехлетиям годовых значений различных климатических параметров за 1900—1950 гг.

а) АК, АМО, САК; б) формы циркуляции W, Е, С;
в) широта ИМД (положительные значения — севернее $61,4^\circ$ ш.), долгота ИМД (положительные значения — западнее $29,9^\circ$ з.д.), ледовитость Баренцева моря ($S_{\text{БМ}}$).

Итак, перед началом потепления (1916—1917 гг.) сложилась следующая гидрометеорологическая ситуация. Отмечалась ярко выраженная зональная циркуляция, о чем свидетельствуют положительные аномалии повторяемости зональной формы циркуляции W и отрицательные аномалии повторяемости формы E. Индекс АК имел экстремально отрицательное значение, что соответствует максимальному развитию арктического антициклона (АА), экстремально высокой ледовитости и экстремально низкой ТВ. Развитию АА также способствовало экстремально южное положение центра ИМД. Одновременно отмечались положительные значения индекса САК и отрицательные значения индекса АМО, т. е. отрицательные аномалии ТПО распространялись практически на всю акваторию СА.

В табл. 3 представлены выборочные коэффициенты корреляции для сглаженных по трехлетиям (верхний треугольник) и несглаженных (нижний треугольник) средних годовых значений гидрометеорологических параметров за период первого потепления (1917—1937 гг.). Процедуру сглаживания обычно используют с целью исключения ошибок и случайных колебаний во временных рядах. При этом происходит уменьшение дисперсии исходных рядов, которые становятся более гладкими. В результате корреляция, как правило, повышается. В то же время корреляция несглаженных (исходных) рядов может быть заниженной из-за случайных ошибок. Однако в некоторых случаях корреляция почти не изменяется. Так, между аномалиями температуры воздуха в Евразии и Америке (ΔT_{AP} и ΔT_{EB}) корреляция составляет $r = 0,84$ и $r = 0,81$ соответственно. Это означает, что данные выборочные коэффициенты корреляции близки к истинным оценкам. Поэтому при анализе табл. 3 будем обращать внимание прежде всего на значимую корреляцию исходных данных и наличие физической связи между параметрами.

Отметим, что представленные в табл. 3 значения коэффициента корреляции годовых параметров в основном характеризуют зимние условия и в значительно

Таблица 3

Оценки выборочных коэффициентов корреляции для средних годовых сглаженных по трехлетиям (верхний треугольник) и несглаженных (нижний треугольник) значений гидрометеорологических характеристик за период 1917—1937 гг.

	ΔT_{AP}	ΔT_{EB}	ΔT_{AM}	АК	АМО	САК	W	C	E	S_{BM}
ΔT_{AP}	1,00	0,84	0,81	0,55	0,59	-0,31	-0,46	0,16	0,44	-0,63
ΔT_{EB}	0,81	1,00	0,35	0,58	0,61	-0,06	-0,51	-0,05	0,58	-0,78
ΔT_{AM}	0,82	0,33	1,00	0,34	0,40	-0,43	-0,23	0,33	0,14	-0,22
АК	0,44	0,49	0,20	1,00	0,16	0,46	0,14	-0,34	0,05	-0,48
АМО	0,46	0,50	0,19	0,17	1,00	-0,58	-0,62	0,16	0,56	-0,22
САК	0,01	0,05	-0,03	0,43	-0,45	1,00	0,55	-0,78	0,00	-0,09
W	-0,09	-0,16	0,01	-0,10	-0,48	0,49	1,00	-0,26	-0,84	0,12
C	-0,02	-0,27	0,23	-0,27	0,14	-0,50	-0,07	1,00	-0,47	0,05
E	0,29	0,45	-0,13	-0,13	0,40	-0,13	-0,84	-0,48	1,00	-0,15
S_{BM}	-0,47	-0,56	-0,16	-0,10	-0,12	0,01	0,07	-0,06	-0,01	1,00

Примечание. Курсивом отмечены значимые коэффициенты корреляции.

меньшей степени — летние. Нетрудно видеть, что максимальная корреляция отмечается между $T_{ВБ}$ и $S_{БМ}$, т.е. ледовитостью Баренцева моря, которая зависит главным образом от адвекции тепла течениями с юга. $S_{БМ}$ можно рассматривать как главный индикатор процесса потепления в Евразийском регионе. Кроме того, значимая положительная корреляция отмечается между $T_{ВБ}$ и индексами АМО и АК, т.е. при повышении температуры воды в СА и усилении арктического колебания температура воздуха в Арктике повышается. Первый фактор — океанический, второй — атмосферный. Отметим также, что определенное влияние на повышение $T_{ВБ}$ может оказывать усиление восточной (по существу меридиональной) формы циркуляции Е. По сути, приходим к известному высказыванию знаменитого метеоролога В.Ю. Визе, который в 1937 г. причинами потепления назвал «одновременное усиление притока атлантической воды и атмосферных переносов в Арктику» [8].

В принципе, корреляция в табл. 3 в целом правильно описывает физические связи между климатическими переменными. Значимая положительная статистическая связь отмечается между АК и САК, между САК и формой W, между АМО и формой Е. Значимая отрицательная связь имеет место между АМО и САК, АМО и формой W.

Очевидно, АМО, характеризующая тепловое состояние почти всей Северной Атлантики, вряд ли может оказывать непосредственное влияние на потепление в Арктике. Как видно из табл. 3, преимущественное влияние АМО сказывается на тепловом режиме Евразии. Главным фактором такого влияния может служить адвекция теплой воды на север в системе теплого Северо-Атлантического течения. Поскольку прямую оценку межгодовой изменчивости адвекции тепла получить нереально, то ограничимся косвенной оценкой колебаний теплового состояния вод в Северо-Европейском бассейне (СЕБ). С этой целью использовались аномалии средней годовой температуры поверхности океана по данным [31] за период 1917—1937 гг. для следующих районов:

— 5-градусный квадрат 208 (координаты центра $62,5^\circ$ с.ш. и $12,5^\circ$ з.д.), расположенный перед Фареро-Шетландским проливом ($\Delta T_{ПО_{208}}$);

— акватория Норвежского моря (осреднение восемнадцати 5-градусных квадратов) ($\Delta T_{ПО_{НМ}}$).

Кроме того, использовались данные об аномалиях температуры воды в слое 0—200 м на станциях 3—7 по Кольскому разрезу ($\Delta T_{W_{КР}}$) [15]. Отметим, что в квадрате 208 потепление наблюдалось с 1918 по 1939 г., а в Норвежском море — с 1920 по 1934 г. Еще раньше началось потепление акватории Баренцева моря (с 1916 г.), которое закончилось в 1937 г.

В табл. 4 приводятся оценки выборочных коэффициентов корреляции для средних годовых значений температуры воды в указанных выше районах и температуры воздуха в арктических регионах. Из таблицы видно, что высокая корреляция в указанных районах отмечается не только между сглаженными данными о температуре воды, но и между не сглаженными данными. Кроме того, отмечается существенно более высокая корреляция с температурой воздуха в Евразийском регионе по сравнению с Американским регионом. Можно достаточно уверенно утверждать, что адвекция тепла в СЕБ оказывает сильное влияние на потепление в Арктике.

Таблица 4

Оценки выборочных коэффициентов корреляции для средних годовых сглаженных по трехлетиям (верхний треугольник) и не сглаженных (нижний треугольник) значений температуры поверхности океана в различных регионах и температуры воздуха в регионах Арктики за период 1917—1937 гг.

	ΔTPO_{HM}	ΔTPO_{208}	$\Delta TW_{(KP)}$	ΔTB_{EB}	ΔTB_{AM}	ΔTB_{AP}
ΔTPO_{HM}	1	0,82	0,81	0,84	0,61	0,87
ΔTPO_{208}	0,82	1	0,56	0,72	0,55	0,82
$\Delta TW_{(KP)}$	0,43	0,33	1	0,86	0,22	0,66
ΔTB_{EB}	0,49	0,48	0,67	1	0,35	0,84
ΔTB_{AM}	0,18	0,33	0,02	0,33	1	0,82
ΔTB_{AP}	0,41	0,47	0,45	0,82	0,81	1

Примечание. $r_{kp} = 0,43$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Возможно процесс потепления в Евразийском регионе Арктики (TB_{EB}) проходил следующим образом. Из рис. 5 видно, что абсолютный максимум индекса АК приходится на 1913 г. Затем происходит его быстрое уменьшение до абсолютного минимума в 1918 г. Начиная с 1918 г. отмечается резкий рост индекса АК, заметно более существенный, чем повышение ТВ. Этот рост заканчивается в 1923 г. Одновременно (с 1918 по 1923 г.) происходило стремительное возрастание индекса САК и быстрое смещение к северо-востоку ИМД, вследствие чего наблюдались значительное ослабление арктического антициклона, повышение ТВ, уменьшение ледовитости в СЕБ и, особенно, в Баренцевом море.

Именно АК, САК и ИМД «тащат» Арктику в потепление до 1923 г., причем главенствующую роль в этом играет ИМД. По сути, 1923 г. стал переломным, когда процесс потепления принял устойчивый характер. Далее в процесс потепления включается АМО, так как температура воды в Северной Атлантике в период с 1924 до 1933 г. резко повышается и вода остается очень теплой по меньшей мере до 1945 г. При этом происходит перестройка атмосферной циркуляции. В период с 1924 по 1936 г. наблюдается ослабление циркуляции зональной формы W, а повторяемость циркуляции меридиональной формы E, наоборот, возрастает. В период с 1923 по 1936 г. индекс САК постепенно уменьшается, но переходит в отрицательную фазу только в 1932 г. Это означает, что САК и форма E совместно уменьшают зональный перенос в умеренных широтах, вызывают интенсификацию перемещения циклонов в северо-восточном направлении и усиление адвекции теплых атлантических вод в Баренцево море, в котором вследствие этого уменьшается ледовитость и повышается температура воды. Одновременно в Арктике происходит падение давления и ослабевает полярный антициклон, что также способствует потеплению.

Что касается потепления в Американском регионе Арктики, то, как следует из табл. 3, TB_{AM} не имеет значимой статистической связи со всеми климатическими индексами. Очевидно, это обусловлено тем, что изменчивость TB_{AM} определяется преимущественно тихоокеанскими факторами. По мнению авторов настоящей работы, к таким факторам относятся следующие:

— *тихоокеанский/североамериканский индекс* (Pacific/North American Pattern, PNA), который представляет собой разность давления между алеутским минимумом и областью высокого давления над Скалистыми горами;

— *тихоокеанское декадное колебание* (Pacific Decadal Oscillation, PDO), характеризующее долгопериодную изменчивость ТПО в северной части Тихого океана;

— *северотихоокеанское колебание* (North Pacific Oscillation, NPO) которое отражает в основном изменчивость характеристик (давление в центре и пространственные миграции) алеутского минимума [23].

Во время положительной фазы PNA по данным сайта (https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/20thC_Rean/timeseries/monthly/PNA/) алеутский минимум в заливе Аляска углубляется, а гребень высокого давления над Скалистыми горами усиливается, т. е. пространственный градиент давления увеличивается. Положительная фаза PNA приводит к повышению температуры воздуха в западной части Северной Америки и к похолоданию на юге США [25]. Что касается PDO, то это практически аналог АМО, однако корреляция между ними незначимая. PDO рассчитывается как первая мода разложения аномалий ТПО Тихого океана севернее параллели 20° с.ш. на эмпирические ортогональные функции и приводится на сайте https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/PDO/. Теплая фаза PDO характеризуется аномально холодной водой в западной части океана и аномально теплой водой в его восточной части. Это соответствует пониженному атмосферному давлению в северной части океана и углублению алеутского минимума, вследствие чего более теплый воздух проникает вдоль западного побережья Северной Америки вплоть до Аляски. Противоположная картина характерна для холодной фазы PDO.

Индекс NPO рассчитывается как разность давления между точками регулярной сетки с координатами 35° с.ш., 160° з.д. и 55° с.ш., 160° з.д. в зимний период [23]. Из рис. 6 следует, что в период 1919—1939 гг. данный индекс имеет высокую отрицательную корреляцию с индексами PDO ($r = -0,81$) и PNA ($r = -0,88$). Максимальный положительный экстремум NPO и отрицательные экстремумы PDO и PNA отмечались в 1917 г. перед началом потепления в Американском регионе. Именно их совместное действие обуславливает процесс потепления на Аляске и севере Канады.

В табл. 5 представлено распределение выборочных коэффициентов корреляции между различными климатическими факторами и TB_{AM} . Из таблицы видно, что наибольшее влияние на TB_{AM} оказывают индексы NPO, PNA, PDO и меридиональная форма циркуляции M_1 [9]. Чем больше теплой воды доходит до северных районов Тихого океана, чем больше значение индекса PNA, чем слабее NPO и меридиональная форма циркуляции M_1 , тем больше повышение ТВ в американском секторе Арктики. Некоторое воздействие на TB_{AM} оказывает и САК. Как указывалось ранее, при высоких положительных значениях САК происходит вынос холодных северных масс воздуха на акваторию моря Лабрадор, что сказывается на ТВ восточных регионов Канады. Особенно сильно данный эффект проявлялся в начале 1920-х годов.

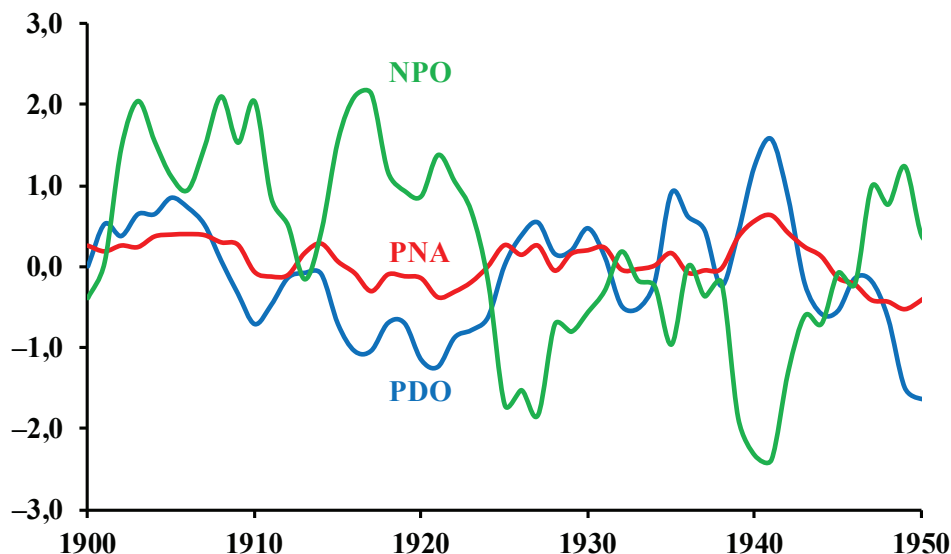


Рис. 6. Межгодовой ход стандартизованных климатических индексов NPO, PDO и PNA за 1900—1950 гг.

Таблица 5

Оценки выборочных коэффициентов корреляции для средних годовых сглаженных по трехлетиям (верхний треугольник) и не сглаженных (нижний треугольник) значений тихоокеанских индексов и температуры воздуха в Американском регионе за период 1918—1939 гг.

	$\Delta T_{B_{AM}}$	CAK	AK	PDO	PNA	З	M_1	M_2	NPO
$\Delta T_{B_{AM}}$	1,00	-0,47	0,34	0,68	0,69	0,04	-0,60	0,22	-0,77
CAK	-0,22	1,00	0,33	-0,64	-0,75	-0,15	0,58	-0,12	0,32
AK	0,00	0,52	1,00	-0,20	-0,14	0,01	-0,35	0,13	-0,25
PDO	0,55	-0,23	-0,34	1,00	0,80	-0,29	-0,48	0,48	-0,81
PNA	0,70	-0,21	-0,18	0,71	1,00	0,04	-0,60	0,22	-0,88
З	0,04	-0,16	0,10	-0,10	0,13	1,00	-0,06	-0,90	-0,08
M_1	-0,51	0,22	-0,08	-0,40	-0,57	-0,29	1,00	-0,38	0,54
M_2	0,29	0,00	-0,05	0,37	0,27	-0,76	-0,40	1,00	-0,12
NPO	-0,72	-0,05	-0,18	-0,75	-0,85	-0,15	0,43	-0,15	1,00

Примечание. $r_{кр} = 0,43$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Для сглаженных годовых значений $T_{B_{EB}}$ и $T_{B_{AM}}$ были построены модели множественной линейной регрессии (МЛР) с определяющими факторами. В первом случае исходными данными послужили переменные из табл. 3, во втором — из табл. 5. С помощью пошаговой процедуры МЛР методом включения переменных была построена оптимальная модель межгодовых колебаний $T_{B_{EB}}$ за

1917—1937 гг., содержащая четыре переменные. В стандартизированном виде ее можно представить следующим образом:

$$Z_{\Delta T_{BEB}} = -0,680Z_S + 0,098Z_E + 0,238Z_{AMO} + 0,471Z_{AK}. \quad (1)$$

Здесь Z_S — стандартизированная переменная ледовитости Баренцева моря (S_{BM}). Коэффициент детерминации данной модели $R^2 = 0,87$, стандартная ошибка ΔT_{BEB} составляет $0,17^\circ\text{C}$ при стандартном отклонении $\sigma = 0,48^\circ\text{C}$. Модель значима по критерию Фишера, а все предикторы значимы по критерию Стьюдента. Сопоставление вычисленных и фактических значений ΔT_{BEB} приводится на рис. 7. Наименее точно значения ΔT_{BEB} воспроизводятся за 1928, 1929, 1933 гг. Коэффициенты регрессии показывают относительный вклад каждого фактора в изменчивость ΔT_{BEB} . Несмотря на чисто формальное определение знаков коэффициентов

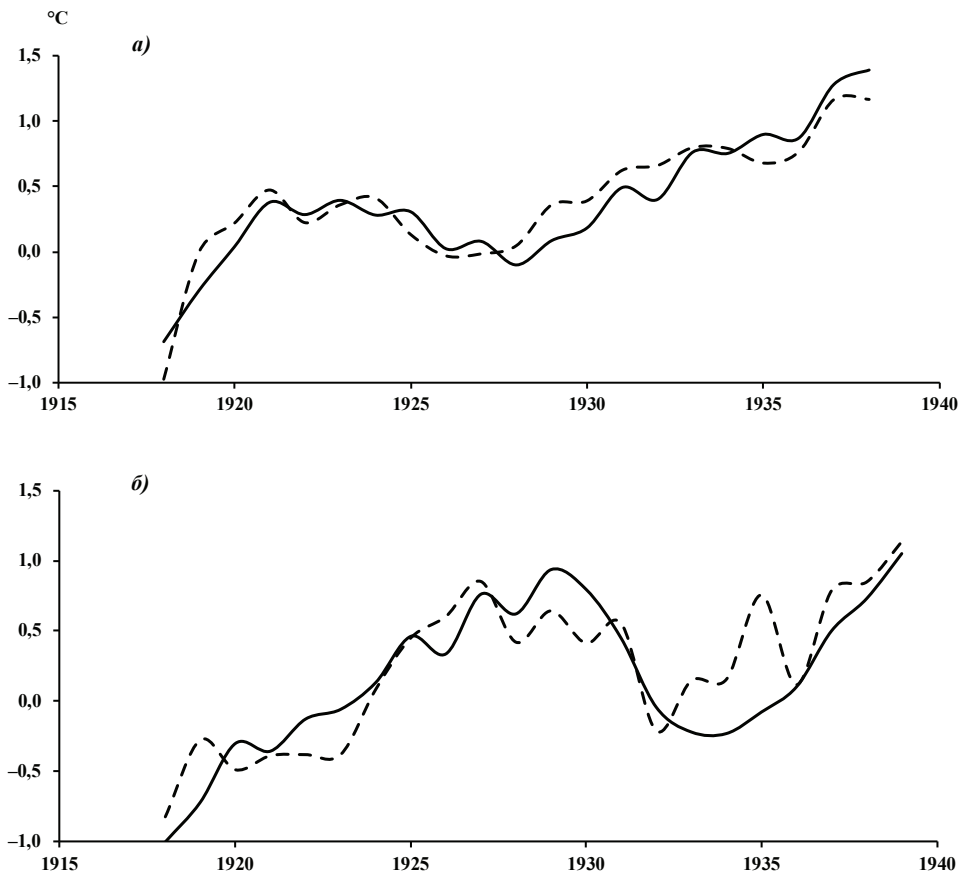


Рис. 7. Сопоставление фактических (сплошная кривая) и вычисленных (штриховая кривая) по регрессионным моделям значений температуры воздуха в Евразии (а) и Северной Америке (б).

регрессии методом наименьших квадратов, все они правильно отражают суть их физической связи с $\Delta T_{\text{ЕВ}}$. Зная коэффициенты корреляции $\Delta T_{\text{ЕВ}}$ с переменными в уравнении (1) (см. табл. 3), нетрудно оценить непосредственный вклад разных факторов в коэффициент детерминации:

$$R^2 = 0,43 + 0,04 + 0,14 + 0,26 = 0,87.$$

Итак, половина дисперсии рассчитываемых значений $\Delta T_{\text{ЕВ}}$ зависит от ледовитости в Баренцевом море, другая половина — от АК, АМО и Е. Но поскольку ледовитость с высокой точностью определяется температурой воды на Кольском разрезе и арктическим колебанием, то получаем совокупность четырех факторов, наилучшим образом описывающих первое потепление в Евразии: два океанических фактора (АМО и $TW_{\text{КР}}$) и два атмосферных фактора (АК и форма Е).

В оптимальную регрессионную модель для $\Delta T_{\text{АМ}}$ вошли четыре переменные из табл. 5 (NPO, PDO, M_1 и АК). Коэффициент детерминации этой модели $R^2 = 0,81$, стандартная ошибка $\Delta T_{\text{АМ}}$ составляет $0,27^\circ\text{C}$ при стандартном отклонении $\sigma = 0,55^\circ\text{C}$. Хотя эта модель несколько хуже по сравнению с моделью для $\Delta T_{\text{ЕВ}}$, тем не менее она хорошо описывает межгодовую изменчивость $\Delta T_{\text{ЕВ}}$ (рис. 7). В стандартизированной форме она описывается выражением

$$Z_{\Delta T_{\text{АМ}}} = -0,25Z_{\text{NPO}} + 0,38Z_{\text{АК}} + 0,59Z_{\text{PDO}} - 0,15Z_{\text{М1}}. \quad (2)$$

Отсюда получаем следующий вклад разных факторов в коэффициент детерминации:

$$R^2 = 0,19 + 0,13 + 0,40 + 0,09 = 0,81.$$

Нетрудно видеть, что половина вычисленной дисперсии $\Delta T_{\text{АМ}}$ описывается тепловым состоянием воды в северной части Тихого океана, а другая половина — атмосферными факторами.

Заключение

Как было отмечено выше, причины потепления 20—40-х годов прошлого столетия не выявлены в значительной степени вследствие низкого качества и недостаточного количества данных наблюдений. В настоящей работе для анализа процесса потепления в Арктике использовался уникальный архив BEST (Berkeley Earth Surface Temperature), объединяющий 1,6 миллиарда отсчетов температуры воздуха из 16 существующих архивов данных только для поверхности Земли. С целью повышения точности оценок данные о ТВ брались не в узлах сеточной области, а по довольно крупным районам. Всего было выбрано 12 районов, в том числе в Евроазиатском регионе Арктики семь районов, в Американском регионе пять районов. По мнению авторов, это значительно повышает степень надежности оценок изменений ТВ.

Показано, что первое потепление, которое, очевидно, обусловлено естественными причинами, наиболее ярко выражено в зимний сезон. Оценка тренда ТВ для него в три раза выше по сравнению с летом. Характеристики потепления по средним годовым данным в основном отражают зимние условия. Зона максимальной зимней интенсивности первого потепления простиралась на всю территорию

Сибири — от Ямало-Ненецкого округа до Чукотки. Средний градиент температуры воздуха здесь составил $0,55\text{--}0,59\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а максимальный тренд достигал $0,22\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ на Таймыре и $0,20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в Ямало-Ненецком округе. В северных провинциях Канады градиент был чуть меньше: $0,3\text{--}0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, причем тренд температуры оказался незначимым. Сравнительный анализ характеристик первого и второго (конец XX — начало XXI столетия) потеплений показал, что они примерно одинаковы. Поэтому маловероятно, чтобы антропогенная деятельность играла главенствующую роль в процессе второго потепления.

Выявлены существенные различия в процессе повышения ТВ в Евразии и Америке. Это означает, что процесс потепления в указанных регионах в значительной степени развивался под действием разных факторов, совокупность которых действует однонаправлено в сторону усиления процесса потепления. Показано, что на первом этапе потепления в Евразии (1917—1923 гг.) основными факторами его формирования являются АК, САК и ИМД, причем главная роль принадлежит ИМД, смещение которого к северо-востоку при низких значениях давления в его центре в значительной степени обеспечило быстрое повышение ТВ.

Далее в процесс потепления активно включается АМО. Основным фактором такого влияния может служить адвекция теплой воды на север в системе тепло-го Северо-Атлантического течения. Косвенным подтверждением этого является наличие высокой корреляции ТПО в Норвежском и Баренцевом морях с $\text{ТВ}_{\text{ЕВ}}$. Одновременно происходит перестройка атмосферной циркуляции: возрастает повторяемость циркуляции формы Е, что также способствует повышению $\text{ТВ}_{\text{ЕВ}}$. С помощью регрессионного анализа показано, что наилучшим образом первое потепление в Евразии описывают два океанических фактора (АМО и $\Delta\text{TW}_{\text{кр}}$) и два атмосферных фактора (АК и форма Е).

Основными действующими факторами в Американском регионе являются индексы NPO, PDO и PNA, которые довольно точно описывают процесс формирования потепления (исключение составляет период 1933—1936 гг.). В результате регрессионного анализа установлено, что половина вычисленной дисперсии $\Delta\text{ТВ}_{\text{АМ}}$ описывается тепловым состоянием воды в северной части Тихого океана, в другая половина — атмосферными факторами (NPO, M_1 и АК).

Список литературы

1. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 1. С. 11—26.
2. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И. Влияние аномалий температуры океана в низких широтах на атмосферный перенос тепла в Арктику // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. № 1. С. 106—123.
3. Боков В.Н., Воробьев В.Н. Изменчивость атмосферной циркуляции и изменение климата // *Ученые записки РГГМУ*. 2010. № 13. С. 83—88.
4. Бокучава Д.Д., Семенов В.А. Анализ аномалий приземной температуры воздуха в Северном полушарии в течение XX века по данным наблюдений и реанализов // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. № 1. С. 29—50.
5. Вайновский П.А., Малинин В.Н. Об изменениях температуры воздуха за последние 2000 лет // *Общество. Среда. Развитие*. 2015. № 4. С. 161—170.

6. Вайновский П.А., Малинин В.Н. Методы обработки и анализа океанологической информации. Ч.1. Одномерный анализ. Л.: изд-во ЛГМИ, 1991. 136 с.
7. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: изд-во Росгидромета, 2014. 1003 с.
8. Визе В.Ю. Причины потепления Арктики // Советская Арктика. 1937. Т. 1. С. 1—7.
9. Гирс А.А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. Л., 1971. 280 с.
10. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Ожидаемые и наблюдаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: изд-во ВНИИГМИ — МЦД, 2012. 194 с.
11. Гудкович З.М., Карклин В.П., Фролов И.Е. Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова, евразийских арктических морей и их возможные причины // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 5—14.
12. Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. О характере и причинах изменений климата Земли // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1(81). С. 15—23.
13. Ефимова Ю.В., Угрюмов А.И., Яровикова К.А. Исландская депрессия, арктический антициклон и колебания климата в Санкт-Петербурге // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 42. С. 117—123.
14. Захаров В.Ф., Малинин В.Н. Морские льды и климат. СПб: Гидрометеиздат, 2000. 91 с.
15. Карсаков А.Л. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900—2008 гг. Мурманск: изд-во ПИНРО, 2009. 139 с.
16. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2 (6). С. 66—79.
17. Малинин В.Н., Гордеева С.М. О современных изменениях глобальной температуры воздуха // Общество. Среда. Развитие. 2011. № 2. С. 215—221.
18. Монин А.С., Сонечкин Д.М. Колебания климата по данным наблюдений. М.: Наука, 2005. 192 с.
19. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада, 2013. 144 с.
20. Полонский А.Б. Атлантическая мультидекадная осцилляция и ее проявления в Атлантико-Европейском регионе // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 4. С. 69—79.
21. Семенов В.А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера-арктические льды-океан // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 231—248.
22. Семенов В.А., Черенкова Е.А. Оценка влияния атлантической мультидекадной осцилляции на крупномасштабную атмосферную циркуляцию в Атлантическом секторе в летний сезон // Доклады РАН. 2018. Т. 478, № 6. С. 697—701.
23. Смирнов Н.П., Воробьев В.Н. Северо-Тихоокеанское колебание и динамика климата в северной части Тихого океана. СПб: изд-во РГГМУ, 2002. 122 с.
24. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб: Наука, 2007. 136 с.
25. Barnston, A.G., R.E. Livezey. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Mon. Wea. Rev. 1987. V. 115. P. 1083—1126.
26. Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M. The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic — a Possible Mechanism // J. Climate. 2004. V. 17. P. 4045—4057.
27. Delworth T.L., Knutson T.R. Simulation of early 20th century global warming // Science. 2000. V. 287 (5461). P. 2246—2250.
28. Hoyt D.V., Schatten K.H. A discussion of plausible solar irradiance variations, 1700—1992 // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 18895—18906.
29. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
30. Jones, P.D., Jónsson, T. and Wheeler, D. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland // Int. J. Climatol. 1997. V. 17. P. 1433—1450. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(19971115)17:13<1433::AID-JOC203>3.0.CO;2-P

31. *Kaplan A., Cane M. A., Kushnir Y., Clement A. C., Blumenthal M. B., Rajagopalan B.* Analyses of global sea surface temperature 1856-1991 // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, No. C9/ P. 18,567-18,589 doi: [10.1029/97JC01736](https://doi.org/10.1029/97JC01736)
32. *Ljungqvist F.C.* A new reconstruction of temperature variability in the extratropical northern hemisphere during the last two millennia // *Geograf. Annal.* 2010. No. 92. P. 339—351.
33. *Overland J.E., Spillane M.C., Percival D.B., Wang M., Moffeld H.O.* Seasonal and regional variation of Pan-Arctic air temperature over the instrumental record // *J. Climate.* 2004. V. 17. P. 3263—3282.
34. *Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U., Colony R.L., Johnson M.A., Karklin V.P., Makshinas A.P., Walsh D., Yulin A.V.* Observationally based assessment of polar amplification of global warming // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29 (18).
35. *Robert Rohde, Richard A. Muller,* et al. Berkeley Earth Temperature Averaging Process // *Geoinfor Geostat: An Overview 1:2.* 2013. doi:10.4172/gigs.1000103
36. *Robert Rohde, Richard A. Muller,* et al. A New Estimate of the Average Earth Surface Land Temperature Spanning 1753 to 2011 // *Geoinfor Geostat: An Overview 1:1.* 2013. doi:10.4172/gigs.1000101
37. *Thompson, D. W. J. and Wallace, J. M.,* Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability // *J. Climate.* 2000. V. 13. P. 1000—1016.
38. *Wood, K. R. and Overland, J. E.* Early 20th century Arctic warming in retrospect // *Int. J. Climatol.* V. 30. 2010. P. 1269—1279. doi:10.1002/joc.1973
39. *Yamanouchi T.* Early 20th century warming in the Arctic: A review // *Polar Science.* 2011. V. 5 (1). P. 53—71.