

О ПОТЕПЛЕНИИ АРКТИКИ 20-40-Х ГОДОВ

В.Н. Малинин¹, П.А. Вайновский¹, Ю.В. Митина¹

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

ABOUT THE WARMING OF THE ARCTIC OF THE 20-40S

V.N. Malinin¹, P.A. Vaynovsky¹, Yu. V. Mitina¹

¹Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

Показано, что процесс потепления проходил неодинаково в Американском и Евразийском регионах Арктики, причем он был обусловлен разными факторами, совокупность которых действовала однонаправлено в сторону усиления процесса потепления.

It is shown that the process of warming was happening differently in American and Eurasian Arctic, it being caused by various factors which together acted unidirectionally to enhance the process of warming.

В историю климата 20-40-годы прошлого столетия вошли как «потепление Арктики». Действительно, именно в северных широтах потепление было максимально выражено. Несмотря на то, что прошло почти сто лет, причины данного потепления до сих пор не выяснены [1]. Более того, по мнению авторов работы [2] «арктическое потепление 1920-1940 гг. является одной из самой загадочной климатической аномалией 20-го века». Однако, не вызывает сомнений, что оно было обусловлено естественными причинами [3] и не связано с антропогенной деятельностью. Цель данной работы – оценка интенсивности первого потепления Арктики в ее различных районах и выявление факторов, его формирующих.

В настоящее время известно несколько десятков архивов характеристик климатической системы за продолжительные многолетние периоды времени. Однако количество их пока не перешло в качество. Расхождения в данных различных архивов для Арктики, как правило, являются максимальными по сравнению с другими регионами, причем меняются как по пространству, так и во времени. Наиболее привлекательным для Арктики является разработанный в NASA Goddard Institute of Space Science (NASA GISS) уникальный проект Berkeley Earth Surface Temperature (BEST). Уникальность его состоит в том, что был создан объединенный архив данных, объединяющий 1,6 миллиарда отчетов о температуре воздуха из 16 существующих архивов данных только для поверхности Земли. Методология и алгоритмы обработки данных и контроля их качества на всех этапах описана в [4].

Для выполнения расчетов в Арктике было отобрано 12 районов, расположенных севернее 60° с.ш., которые были сгруппированы на два региона по принципу их географической близости. Евразийский регион состоит из 7 районов: Шпицберген, Исландия, Норвегия, Таймыр, Ямал, Якутия, Чукотка. Американский регион состоит из 5 районов: Аляска, Юкон, Нунавут, Северные территории Канады, Гренландия. Из них 4 района относятся к России, 3 – 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.

На рис. 1 представлен межгодовой ход аномалий средней годовой температуры воздуха, осредненной для широтной зоны 64–90°с.ш. за период 1900–2014 гг. Нетрудно видеть, что на графике отчетливо проявляются два ярко выраженных потепления. Первое начинается в 1919 году, заканчивается в 1938 году, второе и более длительное начинается в 1979 году и заканчивается в 2011 году. В табл. 1 даны статистические характеристики этих потеплений. Градиент определялся как амплитуда потепления, деленная на его продолжительность, а вклад тренда в дисперсию – по коэффициенту детерминации. Как следует из таблицы 1 первое потепление даже несколько сильнее второго: градиент и величина тренда для него выше.

Таблица 1. Статистические характеристики потеплений средней годовой температуры воздуха в широтной зоне 64–90° с.ш. по данным архива BEST

Потепление	Начало	Конец	Амплитуда, °С	Градиент, °С/год	Тренд, °С/год	Вклад тренда в дисперсию, %
Первое	1919	1938	2.28	0.12	0.065	0.52
Второе	1979	2011	2.72	0.08	0.059	0.64

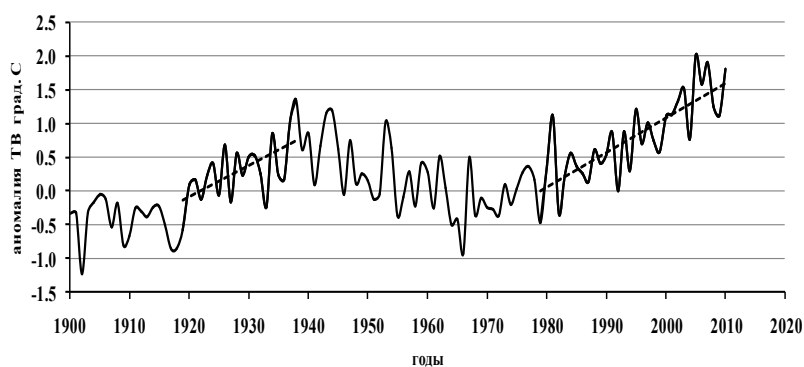


Рис. 1. Межгодовой ход аномалий средней годовой температуры воздуха осредненной для широтной зоны 64–90° с.ш. за период 1900–2014 гг.

Обратимся теперь к оценке первого потепления для Арктики (таблица 2). Начинается и заканчивается оно примерно в одно и то же время круглый год. Однако интенсивность его резко различается. Особенно ярко потепление проявляется зимой. Из табл. 2 видно, что оценка тренда зимой в 3 раза выше, чем летом. Зона максимальной зимней интенсивности потепления простиралась по всей территории Сибири от Ямало-Ненецкого округа до Чукотки. Средний градиент температуры 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. Очаги потепления для годовых интервалов времени в основном отражают зимние условия и значительно хуже летние. Корреляция годовых и зимних значений ТВ составляет $r=0,85$.

Таблица 2. Статистические характеристики средней годовой температуры воздуха Арктики, осредненные для 12 районов севернее 60 с.ш. за период потепления

Период	Начало	Конец	Амплитуда, °С	Градиент, °С/год	Тренд, °С/год	Вклад тренда в дисперсию, %
Год	1916	1938	3.47	0.16	0.064	0.30
Лето	1916	1937	2.82	0.16	0.048	0.15
Зима	1917	1936	7.67	0.42	0.147	0.25

На рис. 2 представлен межгодовой ход 3-летней скользящей средней осредненной температуры воздуха отдельно для Америки (5 районов) и Евразии (7 районов). На рис. 2 видно, что есть существенные различия в росте ТВ в Северной Америке и Евразии, то есть потепление в них проходило неодинаково. В Евразии потепление началось в 1917 г., т.е. на 2 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 проходило в 2 этапа. Очень ярко это проявилось в Америке, где первый этап отмечался в течение 1919–1928 гг., затем к 1934 г. произошло интенсивное падение температуры почти на 1 °С. После этого начался второй этап потепления с не менее интенсивным ростом ТВ. В Евразии наблюдалось существенно более слабое падение ТВ в течение 1922–1927 гг. на 0,4 °С. Такие существенные расхождения в ТВ между этими регионами заметно сказываются на величине статистической связи. Корреляция между ТВ в Америке и Евразии ($ТВ_{AM}$ и $ТВ_{ЕВ}$) составляет $r=0,33$, причем после удаления

линейного тренда она становится даже отрицательной $r=-0,57$. Это означает, что процесс потепления в указанных регионах в значительной степени вызван разными факторами.

Попытки объяснить данное потепление 60-летним циклом [5] не увенчались успехом, ибо в работе [6] было показано, что он является лишь случайным колебанием, которое может неожиданно возникнуть и также неожиданно исчезнуть. В работе [7] с помощью спектрального анализа данных температуры воздуха внетропической части северного полушария за последние две тысячи лет было установлено отсутствие значимого цикла в диапазоне 50–70 лет. Очевидно, потепление в Арктике вызвано в основном совокупностью региональных факторов, которые действовали однонаправленно в сторону усиления процесса потепления.

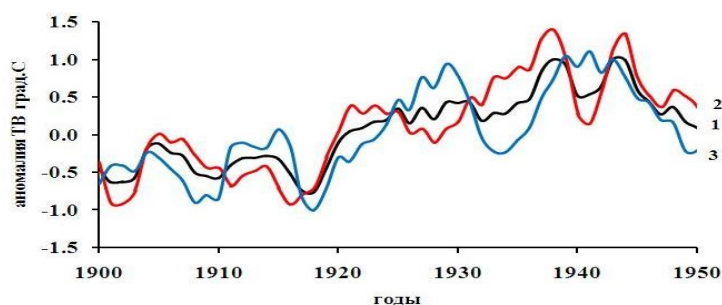


Рис. 2. Межгодовой ход 3-летней скользящей средней осредненной температуры воздуха по 12 районам Арктического бассейна (1), для Евразии (2) и Америки (3).

Перечислим вначале основные факторы, которые могут влиять на потепление в Евразийском регионе Арктики: Арктическое колебание (АК), атлантическая мультидекадная осцилляция (АМО), североатлантическое колебание (САК), атмосферная циркуляция в виде форм циркуляции W, E и C, характеристики Исландского минимума давления (давление в центре и пространственные миграции), ледовитость Баренцева моря (СБМ).

Детальный анализ указанных характеристик показал, что перед началом потепления (1916–1917 гг.) сложилась следующая гидрометеорологическая ситуация. Отмечалась ярко выраженная зональная циркуляция, о чем свидетельствуют положительные аномалии зональной формы циркуляции W и отрицательные аномалии 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 САК и отрицательные значения АМО, т.е. почти вся акватория СА была занята отрицательными аномалиями ТПО.

Корреляционный анализ среднегодовых аномалий температуры воздуха в Евразии ($ТВ_{ЕВ}$) с климатическими характеристиками показал, что наиболее высокая корреляция отмечается с СБМ ($r=-0,78$), с АМО ($r=0,61$) и с АК ($r=0,58$). Следует отметить сложный характер формирования потепления в Евразии. Возможно, он происходил следующим образом. Начиная с 1918 года, когда отмечался абсолютный минимум АК, начинается его резкий рост, который заметно сильнее роста ТВ. Этот рост заканчивается в 1923 году. Одновременно происходил стремительный рост САК и быстрое смещение к северо-востоку ИМД с 1918 г. до 1923 г., вследствие чего арктический антициклон значительно ослабевал, ТВ повышалась, а ледовитость в СЕБ и особенно в Баренцевом море уменьшалась. Именно АК, САК и ИМД «тащат» Арктику в потепление до 1923 г., причем главенствующую роль в этом играет ИМД. Далее в процесс потепления включается АМО, так как температура воды Северной Атлантики резко повышается с 1924 г. до 1933 г. и остается очень теплой минимум до 1945 г. Главным фактором такого влияния может служить адвекция теплой воды на север в системе теплого Североатлантического течения. Косвенным свидетельством этого является наличие высокой корреляции ТПО в Норвежском и Баренцевом морях с $ТВ_{ЕВ}$. Одновременно происходит перестройка атмосферной циркуляции. Зональная форма W начинает ослабевать с 1924 года до 1936 г., а меридиональная форма E, наоборот, растет. Индекс САК постепенно уменьшается с 1923 года до 1936 года, но переходит в отрицательную фазу только в 1932 году. Это означает то, что они совместно

уменьшают зональный перенос в умеренных широтах, вызывают интенсификацию циклонов в северо-восточном направлении и усиление адвекции теплых атлантических вод в Баренцево море, в котором вследствие этого уменьшается ледовитость и растет температура воды моря. При этом в Арктике происходит уменьшение давления, ослабевает полярный антициклон, что также способствует потеплению.

В Американском регионе Арктики на потепление могут влиять следующие факторы: тихоокеанский/североамериканский индекс (Pacific/North American Pattern, PNA), Северотихоокеанское колебание (North Pacific oscillation, NPO), тихоокеанское декадное колебание (Pacific decadal oscillation, PDO), Арктическое колебание, формы атмосферной циркуляции Z , M_1 и M_2 и даже САК, при положительной фазе которого происходит усиление северных ветров на море Лабрадор, что вызывает похолодание в северо-восточной Канаде. Корреляционный анализ среднегодовых аномалий температуры воздуха в Американском регионе ($T_{ВАМ}$) с климатическими характеристиками показал, что наиболее высокая корреляция отмечается с NPO ($r=-0,77$), с PNA ($r=0,69$), с PDO ($r=0,68$) и с M_1 ($r=-0,60$). Совокупное действие этих разнонаправленных факторов привело к потеплению на севере Американского континента. При этом, как будет показано ниже, наибольший вклад в процесс потепления вносит тепловое состояние северной части Тихого океана, которое характеризуется индексом PDO.

Для сглаженных по трехлетиям годовых значений $T_{ВЕВ}$ и $T_{ВАМ}$ были построены модели множественной линейной регрессии с определяющими факторами. С помощью пошаговой процедуры методом включения переменных была построена оптимальная модель межгодовых колебаний $T_{ВЕВ}$ за 1917-1937 гг., содержащая 4 переменных. В стандартизированном виде ее можно представить как

$$Z_{\Delta T_{ВЕВ}} = -0,680Z_{S(ВМ)} + 0,098Z_E + 0,238Z_{АМО} + 0,471Z_{АК} \quad (1)$$

Коэффициент детерминации данной модели $R^2=0,87$, стандартная ошибка $\Delta T_{ВЕВ}$ 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. Наименее точно значения $\Delta T_{ВЕВ}$ воспроизводятся за 1928, 1929, 1933 гг. Зная коэффициенты корреляции $\Delta T_{ВЕВ}$ с переменными в формуле (1), нетрудно оценить непосредственный вклад разных факторов в коэффициент детерминации:

$$R^2 = 0,43 + 0,04 + 0,14 + 0,26 = 0,87 \quad (2)$$

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

В оптимальную регрессионную модель для $\Delta T_{ВАМ}$ вошли 4 переменные (NPO, PDO, M_1 и АК). Коэффициент детерминации этой модели $R^2=0,81$, стандартная ошибка $\Delta T_{ВАМ}$ 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 $\Delta T_{ВЕВ}$, тем не менее, она хорошо описывает межгодовую изменчивость $\Delta T_{ВЕВ}$. В стандартизированной форме она имеет вид:

$$Z_{\Delta T_{ВАМ}} = -0,25Z_{NPO} + 0,38Z_{АК} + 0,59Z_{PDO} - 0,15Z_{M_1} \quad (3)$$

Отсюда получаем следующий вклад разных факторов в коэффициент детерминации:

$$R^2 = 0,19 + 0,13 + 0,40 + 0,09 = 0,81 \quad (4)$$

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

Литература

1. Семенов В.А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера-арктические льды-океан // Фундаментальная и прикладная климатология, 2015, №1, С.231-248.
2. Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M., 2004: The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic – a Possible Mechanism. J. Climate, 17, 4045-4057.
3. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. №2 (6), 2012. С.66-79.
4. Robert Rohde, Richard A. Muller, et al. (2013) *Berkeley Earth Temperature Averaging Process*. Geoinfor Geostat: An Overview 1:2. doi:10.4172/gigs.1000103.

5. 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.
6. Малинин В.Н., Гордеева С.М. О современных изменениях глобальной температуры воздуха // *Общество. Среда. Развитие*. 2011. № 2. С. 215–221.
7. Вайновский П.А., Малинин В.Н., Митина Ю.В. Статистический анализ температуры воздуха северного полушария за последние две тысячи лет // *Ученые записки РГГМУ*. 2015. №45, С. 169-179.