

Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 451—473.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(76):451—473.

КЛИМАТОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.524(98)

doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-451-473

Связь долговременных изменений температуры воздуха в Арктике с колебаниями гидрометеорологических и астрогеофизических факторов

***Леонид Александрович Тимохов¹, Валерий Николаевич Малинин²,
Владимир Васильевич Иванов¹***

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ltim@aari.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, malinin@rshu.ru

Аннотация. Статистическим методом установлена связь долговременных (межгодовых и внутривековых) колебаний температуры воздуха в Арктике с основными гидрометеорологическими и астрогеофизическими факторами. Определена их роль в изменениях температуры воздуха и построены статистические модели долговременных колебаний температуры воздуха. Прогностические оценки с использованием астрогеофизических предикторов показывают, что температура воздуха в арктической зоне 70—85° с.ш. к 2040 г. будет понижаться, сохраняя внутри декадные вариации. Характер изменения температуры воздуха в морской части морей российской Арктики в 2021—2043 гг. подобен колебаниям температуры воздуха в широтной зоне.

Ключевые слова: долговременные колебания температуры воздуха в Арктике, статистические модели, гидрометеорологические и астрогеофизические факторы, опытный прогноз.

Для цитирования: Тимохов Л. А., Малинин В. Н., Иванов В. В. Связь долговременных изменений температуры воздуха в Арктике с колебаниями гидрометеорологических и астрогеофизических факторов // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 451—473. doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-451-473.

The relationship of long-term changes in air temperature in the Arctic with fluctuations in hydrometeorological and astrophysical factors

Leonid A. Timokhov¹, Valery N. Malinin², Vladimir V. Ivanov¹

¹ Arctic and Antarctic Research Institute, Itim@aari.ru

² Russian State Hydrometeorological University, malinin@rshu.ru

Summary: A statistical method has been used to establish the relationship of long-term (interannual and intra — century) fluctuations in the average three-year sliding air temperature in the Arctic with the main hydrometeorological and astrophysical factors, and their role in changes in air temperature is determined. The statistical models of air temperature in the Arctic include variables such as the Arctic seas ice, the AMO index (an indicator of the thermal state of the North Atlantic) and the sum of the western and eastern forms of atmospheric circulation according to the Wangenheim classification. Hydrometeorological characteristics determine 80 % of the total air temperature dispersion in the latitude zone of 70–85° and 74 % of the total air temperature dispersion in the Arctic seas.

Statistical models of long-term fluctuations in air temperature, taking into account astrophysical factors, include the following predictors: the index of insolation contrast, the duration of the day, the moment of inertia of rotation of large planets relative to the center of mass of the Solar system and the difference in energy coming from the Sun in the 0th and 10th years. Astrophysical characteristics determine 77 % of the total air temperature dispersion in the latitude zone of 70–85° and 77 % of the total air temperature dispersion in the Arctic seas. According to preliminary estimates, the air temperature in the Arctic zone 70–85° to 2040 is likely to decrease slightly, maintaining interannual variations with a period of 10–12 years. The nature of changes in air temperature in the marine part of the Russian Arctic seas in 2021–2043 is assumed to be similar to fluctuations in air temperature in the latitudinal zone.

Keywords: long-term fluctuations of air temperature in the Arctic, regression analysis, statistical models, hydrometeorological predictors, astrophysical factors, experimental long-term forecast.

For citation: Timokhov L. A., Malinin V. N., Ivanov V. V. The relationship of long-term changes in air temperature in the Arctic with fluctuations in hydrometeorological and astrophysical factors. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):451–473. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-451-473.

Введение

Значительное потепление климата Арктики в конце XX и начале XXI столетий характеризуется повышением средней температуры воздуха в зимний и летний периоды [1], перестройкой крупномасштабных атмосферных процессов [2], уменьшением площади льдов в сентябре на акватории Северного Ледовитого океана и в российских арктических морях [3, 4], изменением характеристик гидрологического режима арктических морей и в целом Северного ледовитого океана [5, 6]. Однако причины этих изменений, возможности их описания, а тем более построения долгосрочного и сверхдолгосрочного прогноза, изучены недостаточно и не отвечают практическим потребностям [7]. Информация об изменениях климатических условий и такой важной характеристике как температура воздуха имеет

важное значение при принятии решений в управлении хозяйственной и морской деятельностью в Арктике, поэтому поиск причин и разработка методов описания долговременных изменений природных условий Арктики, включая температуру воздуха, являются важной научной и практической задачей гидрометеорологии.

Изменения климата Арктики, включая температуру воздуха, за последние столетия описаны во многих публикациях, но наиболее полный анализ дан в коллективной монографии «Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв.» под редакцией Б. А. Крутских [8]. В статье Г. В. Алексеева и др. [9] установлен ряд закономерностей изменчивости климата Арктики:

- выявлена решающая роль в поддержании теплового баланса Северной полярной области (СПО) переноса тепла по направлению к полюсу в результате циркуляции атмосферы и океана;

- выявлена сильная обратная связь между средней температурой воздуха в СПО и умеренных широтах и значительная неоднородность пространственного распределения температуры;

- показано, что аномалии среднеширотных и средних для всей СПО значений температуры связаны отрицательной корреляцией с аномалиями в умеренной зоне 45—55° с.ш., причем смена знака среднеширотных аномалий наиболее часто происходит в полосе 60—70° с.ш. [9].

А. И. Воскресенский и др. [10] в экспертных оценках возможных изменений климата атмосферы в Арктике исследовали ряд факторов, которые могут потенциально влиять на климат в Арктике. Показана связь изменения диссиметрии Солнечной системы и температуры воздуха в северном полушарии (средние пятилетние скользящие значения). Н. Д. Виноградов и др. [11] рассмотрели изменения в структуре общей циркуляции атмосферы (ОЦА) в Арктике и оценили влияние солнечной активности и приливообразующих сил планет Солнечной системы на циркуляцию атмосферы.

Особенности и причины межгодовых и вековых изменений температуры воздуха северного и южного полушарий и Земли в целом обсуждались во многих публикациях. Считается, что главной причиной современных изменений климата является парниковый эффект [12]. Его влияние на климат состоит, прежде всего, в формировании трендов. Характеристикой парникового эффекта (ПЭ) могут служить радиационные индексы G_a [13] и G_s [14]. Первый представляет длинноволновый баланс атмосферы, который характеризует ПЭ всей атмосферы, а второй — противоизлучение атмосферы, характеризующее ПЭ непосредственно у подстилающей поверхности. Оба индекса имеют максимальные значения в области внутритропической зоны конвергенции (ВЗК), а минимальные — в полярных широтах. Соответственно, наибольший ПЭ свойствен экваториальным широтам, в то время как в Арктике его влияние минимально.

В соответствии с работами [15, 16] основным фактором, одновременно определяющим межгодовую изменчивость индекса G_a , тренд и межгодовую изменчивость G_s , является влагосодержание атмосферы (ВА). При этом ВА имеет максимальный тренд в области ВЗК, минимальный — в северных широтах, а температура воздуха, наоборот, максимальный тренд — в Арктике и незначимый

тренд — в экваториальной зоне [17]. В области ВЗК рост ВА в результате влагообмена в системе океан-атмосфера приводит к повышению индекса G_s , который повышает температуру воздуха. Она, в свою очередь, за счет абсолютной влажности увеличивает концентрацию водяного пара в атмосфере. Эта положительная обратная связь вследствие максимальных значений ВА и Т в ВЗК ярко выражена.

В Арктике ПЭ и положительная обратная связь выражены очень слабо, поэтому основное влияние на тренд и межгодовую изменчивость Т должны оказывать другие внутренние факторы. Это океанический перенос тепла из Северной Атлантики [18] и атмосферный меридиональный перенос тепла и влаги [19].

В модели тропического потепления Арктики указывается на ведущую роль конвекции в тропической зоне [20, 21]. Конвекция возбуждает распространяющиеся к полюсам волновые цепочки Россби, переносящие водяной пар и тепло в атмосферу Арктики. При этом важным компонентом этого механизма является увеличение нисходящего инфракрасного излучения (ИК) в Арктике, которое предшествует арктическому потеплению [20]. Таким образом, основные физические механизмы, которые могут вызывать потепление в Арктике, включают как локальные обратные связи, так и изменения в переносе энергии к полюсу [20].

Описанные процессы и механизмы относятся к внутренним факторам формирования и изменения климата [23]. Но на изменчивость климата, включая температуру воздуха, могут также влиять внешние факторы: приходящая суммарная солнечная энергия [24], геомагнитное поле и скорость вращения Земли [25, 26, 27], суммарный момент инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы [28, 29], лунно-солнечные приливные силы [30, 31, 32].

Цель настоящей работы состоит в исследовании статистическими методами связи долговременных (межгодовых и внутривековых) колебаний температуры воздуха в Арктике с основными гидрометеорологическими и астрогеофизическими факторами, оценке их роли и построении статистических моделей долговременных колебаний температуры воздуха.

Данные и методы исследования

В работе используются два временных ряда аномалий среднегодовой приповерхностной температуры воздуха. Первый из них (T_z) составлен в отделе долгосрочных метеорологических прогнозов ААНИИ для широтной зоны 70—85° с.ш. по данным более чем за 120-летний период [2]. Второй ряд среднегодовой температуры воздуха (T_s) на акватории арктических морей составлен в отделе взаимодействия океана и атмосферы ААНИИ за период с 1901 г. по 2022 г. [1].

Для исследования связи долговременных колебаний температуры воздуха в Арктике с гидрометеорологическими предикторами были использованы средние годовые значения следующих переменных:

1. Индексы атмосферной циркуляции: Арктическое колебание (Arctic Oscillation, AO); Североатлантическое колебание (North Atlantic Oscillation, NAO); тихоокеанский/североамериканский индекс (Pacific/North American Pattern, PNA), которые заимствованы с сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

2. Индексы теплового состояния океана: Атлантическая мультидекадная осцилляция (Atlantic multidecadal oscillation, AMO), отражающая долгопериодную изменчивость ТПО Северной Атлантики; Тихоокеанское декадное колебание (Pacific Decadal Oscillation, PDO), характеризующее долгопериодную изменчивость ТПО в северной части Тихого океана <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

3. Аномалии относительно периода 1900—2023 гг. числа форм циркуляции в году по классификации Вангенгейма (западной формы W, меридиональной S, восточной E и суммы W+E) [2].

4. Суммарная ледовитость (Ice) западных и восточных морей российской Арктики [33].

Дополнительно в качестве астрогеофизических факторов в работе использованы ряды следующих астрономических показателей:

1. Годовой приход солнечной радиации Q на верхнюю границу атмосферы Земли в полярной зоне, связанный с небесно-механическими процессами. Эти переменные рассчитаны по данным Костина и Федорова <http://www.solar-climate.com/en/ensc/basard.htm/>, где авторы учитывали изменения расстояния между Землей и Солнцем, изменения наклона оси вращения Земли в результате прецессии и нутации и др. [24].

2. Градиент инсоляции dQ (инсоляционная контрастность [34]), в качестве которой нами использована разность инсоляции в широтных зонах 45° — 65° и 65° — 85° с.ш., обозначенная индексом $dQ = Q_{45-65} - Q_{65-85}$. В работе [24] показана статистическая связь глобальной приповерхностной температуры воздуха с величиной инсоляционной контрастности. По мнению Davis and Brewer [31], контрастность температуры между севером и югом управляет атмосферной циркуляцией Земли и ветровой циркуляцией океана.

3. Изменения среднегодовых значений солнечной радиации, связанные с изменением активности Солнца (индекс Ws , среднегодовые значения чисел Вольфа https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/SN_m_tot_V2.0.txt).

4. Разность $dWs = Ws(0) - Ws(-10)$, которая означает поступление от Солнца энергии в 0-й и 10-й годы. Этот индекс в первом приближении воспроизводит структуру квазидвадцатилетнего цикла вариации инсоляции [24].

5. Для характеристики скорости вращения Земли взяты средние годовые вариации продолжительности суток, индекс lod (length of day), заимствованный с сайта <ftp://ftp.nga.mil/pub2/gps/eopp/uuuueopp/EOPPyddd.TXT>. Уменьшение продолжительности суток lod соответствует увеличению скорости вращения Земли и наоборот.

6. Среднегодовой суммарный момент инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы Js , временной ряд которого был предоставлен Б. Г. Шерстюковым [29].

Предварительно для всех вышеперечисленных переменных Tz , Ts , гидрометеорологических и астрогеофизических параметров с целью уменьшения случайных ошибок рассчитывались средние трехлетние скользящие аномалии, полученные путем сглаживания средних годовых значений трехлетним фильтром, которые затем были нормированы на среднеквадратическое отклонение. Именно

такие значения параметров использовались в последующих расчетах. С учетом того, что предикторы задавались с временными лагами (сдвигами) от 0 до (–16) лет, общее число временных рядов составило более 90.

Связь температуры воздуха с гидрометеорологическими характеристиками

В работах [2, 11, 35] было показано, что приземная температура воздуха в Арктике связана с режимом атмосферной циркуляции, температурой океана в Северной Атлантике и ледовитостью восточных и западных арктических морей. Теснота связи нормированных аномалий температуры воздуха T_z и T_s между собой и с отдельными гидрометеорологическими переменными приведена в табл. 1. Из оценок в табл. 1 следует, что наиболее тесная корреляция аномалий температуры воздуха наблюдается с индексом АМО и площадью льдов в морях российской Арктики Ice , а синхронная корреляционная связь аномалий температуры воздуха с индексами атмосферной циркуляции и PDO слабая.

Таблица 1

Парные коэффициенты корреляции аномалий температуры воздуха T_z и T_s с выборочными аномалиями трехлетних скользящих значений гидрометеорологических переменных

Paired correlation coefficients of air temperature anomalies T_z and T_s with sample anomalies of three-year sliding values of hydrometeorological variables

	T_z	T_s	Ice	АМО	С	(W + E)	АО	PNA	NAO	PDO
T_z	1,00	0,85	–0,87	0,62	–0,04	0,05	0,19	0,14	–0,14	–0,12
T_s	0,85	1,00	–0,73	0,78	0,06	–0,07	0,05	0,13	–0,25	–0,08

Слабая связь температуры воздуха с PDO и PNA может быть объяснена тем, что эти индексы сильнее влияют на температуру воздуха восточного (канадского) сектора Арктики [35]. Температура воздуха T_z является средней температурой во всей широтной зоне 70–85° с.ш., а значение T_s включает температуру воздуха как восточной, так и западной частей Арктики. В тоже время отмечается [32], что Северная Атлантика оказывает доминирующее влияние на метеорологические процессы в Арктике. Этот тезис находит подтверждение в больших коэффициентах корреляции температуры воздуха с индексом АМО.

Однако следует отметить, что парные коэффициенты корреляции служат только первым указанием на возможную связь того или иного индекса с изменчивостью температуры воздуха. Температура воздуха подвержена влиянию множества факторов, и реальная роль каждого индекса (предиктора) может быть установлена в результате выделения доли его вклада из суммарного влияния нескольких факторов, поэтому нами была поставлена задача получения уравнения связи средней трехлетней скользящей температуры воздуха с множеством гидрометеорологических факторов.

Разработка статистических уравнений связи температуры воздуха для широтной зоны 70–85° с.ш. и акватории арктических морей с гидрометеорологическими характеристиками выполнялась по программам «Статистика» (<http://statistica>).

ru/theory). С помощью пошаговой процедуры множественной линейной регрессии методом последовательного включения переменных [36] с использованием результатов табл. 1 были построены оптимальные модели долговременных колебаний Tz и Ts за 1902—2020 гг. Чтобы отметить зависимость температуры воздуха от гидрометеорологических предикторов, в обозначения температуры воздуха Tz и Ts введены символы hy в скобках: $Tz(hy)$ и $Ts(hy)$. В табл. 2 для примера приведена пошаговая процедура получения статистического уравнения для $Tz(hy)$. Как видно из таблицы, с каждым шагом увеличивается коэффициент детерминации и уменьшается стандартная ошибка модели, но на четвертом шаге уровень значимости $p\text{-level}$ оказался больше критического $p\text{-level} = 0,05$. Из этого следует, что оптимальная модель для $Tz(hy)$ содержит три переменные Ice , АМО и C .

Таблица 2

Статистические оценки параметров пошаговых моделей температуры воздуха Tz на каждом шаге включения в регрессионный анализ гидрометеорологических характеристик за 1902—2020 гг.

Statistical estimates of the parameters of step-by-step models of air temperature at each step of inclusion in the multi-regression analysis of additional hydrometeorological characteristics for 1902—2020

Шаг модели j , параметр включения	$R_{(j)}^2$	Стандартная ошибка модели, °C	Критерий Фишера, $F^{(j)}$	$p\text{-level}^{(j)}_{\max}$
1-й, $Ice(0)$	0,758	0,49	370,9	0,00
2-й, АМО(0)	0,779	0,47	206,0	0,00
3-й, $C(0)$	0,800	0,45	231,6	0,00
4-й, $E(0)$	0,804	0,45	118,1	0,11

Аналогичная процедура для $Ts(hy)$ позволила выявить оптимальную зависимость от трех переменных Ice , АМО, $(W + E)$. В результате в стандартизированном виде уравнения регрессии имеют вид:

$$Tz(hy) = -0,745Ice + 0,232АМО - 0,152C; \quad (1)$$

$$Ts(hy) = -0,407Ice + 0,575АМО + 0,152(W + E). \quad (2)$$

В уравнения (1) и (2) вошли одни и те же характеристики Ice и АМО. Эти предикторы правильно описывают физический характер их связи с температурой воздуха: при уменьшении ледовитости и повышении притока теплых вод из Атлантики (АМО) температура увеличивается. Влияние форм циркуляции на температуру носит разнонаправленный характер, но примерно одинаково.

В процедуре регрессионного анализа важно проверить коллинеарность предикторов. Для этого были рассчитаны взаимные коэффициенты корреляции предикторов, приведенные в табл. 3. Как видно из табл. 3, коэффициенты корреляции между переменными в правых частях уравнений (1) и (2) изменяются от 0,04 до 0,22, за исключением коэффициента корреляции между Ice и АМО ($R = 0,58$). Оценки свидетельствуют о практической независимости предикторов, так как значения коэффициентов корреляции меньше коэффициента корреляции 0,8, считающегося границей при определении коллинеарности [36].

Таблица 3

Коэффициенты взаимной корреляции нормализованных средних трехлетних скользящих значений предиктантов и предикторов за период 1902—2020 гг.

The coefficients of mutual correlation of normalized three-year moving averages of predicates and predictors for the period 1902—2020

Характеристики	<i>Tz</i>	<i>Ts</i>	<i>Ice</i>	АМО	<i>C</i>	(<i>W</i> + <i>E</i>)
<i>Tz</i>	1,00	0,85	−0,87	0,62	−0,04	0,05
<i>Ts</i>	0,85	1,00	−0,73	0,78	0,06	−0,00
<i>Ice</i>	−0,87	−0,73	1,00	−0,58	−0,06	0,07
АМО	0,62	0,78	−0,58	1,00	0,28	−0,22
<i>C</i>	−0,04	0,06	−0,06	0,28	1,00	−0,95
(<i>W</i> + <i>E</i>)	0,05	−0,00	0,07	−0,22	−0,95	1,00

Статистические характеристики уравнений (1) и (2) приведены в табл. 4. Коэффициенты детерминации уравнений (1) и (2) равны $R^2 = 0,80$ и $R^2 = 0,74$, соответственно, т.е. больше требуемого значения — $> 0,6$. Уровень значимости p -level для предикторов обоих уравнений меньше 0,01 и указывает на то, что надежность расчета коэффициентов регрессии считается достаточной [36]. Критерий Фишера F намного больше критического значения $F_{кр}$, то есть полученные уравнения являются адекватными, результаты расчета удовлетворительно соответствуют исходным данным температуры воздуха.

Квадрат коэффициента корреляции, который отражает суммарный вклад предикторов в общую дисперсию многолетних колебаний температуры, свидетельствует, что гидрометеорологические характеристики определяют 80 % дисперсии $Tz(hy)$ в широтной зоне 70—85° с.ш. и 74 % дисперсии $Ts(hy)$ на акватории арктических морей. Стандартная ошибка расчетов составляет $\Delta Tz(hy) = 0,54$ °C и $\Delta Ts(hy) = 0,44$ °C при стандартном отклонении температуры $\sigma_T = 1,00$ °C для уравнений (1) и (2) соответственно (табл. 4).

Таблица 4

Статистические характеристики уравнений (1) и (2)

Statistical characteristics of equations (1) and (2)

$Tz(hy)$: $R = 0,89$; $R^2 = 0,80$; $F = 154,5$; $F_{кр} = 3,0$; $\Delta Tz(hy) = 0,54$ °C; $\sigma_T = 1,00$ °C			$Ts(hy)$: $R = 0,86$; $R^2 = 0,74$; $F = 113,5$; $F_{кр} = 3,0$; $\Delta Ts(hy) = 0,44$ °C; $\sigma_T = 1,00$ °C		
Параметры уравнения (1)	p -level	Вклад, %	Параметры уравнения (2)	p -level	Вклад, %
Ice	0,00	68	Ice	0,00	21
АМО	0,00	8	АМО	0,00	50
C	0,00	4	W+E	0,00	3

Приведенные оценки критериев позволяют сделать вывод, что описание долговременной изменчивости температуры воздуха в Арктике уравнениями (1) и (2) является статистически значимым и достоверно характеризует долговременные колебания температуры воздуха с точностью 74—80 %.

Произведение коэффициента корреляции между предиктантом (температура воздуха) и фактором X_j на стандартизированный коэффициент регрессии в моделях (1), (2) показывает относительный вклад каждого фактора в описание изменчивости температуры воздуха. Эти вклады рассчитаны для каждой переменной в уравнениях (1) и (2) и приведены в табл. 4. Нетрудно увидеть, что дисперсия $Tz(hy)$ на 68 % определяется колебаниями ледовитости арктических морей и на 8 % влиянием тепла Северной Атлантики (индекс АМО). Однако механизм синхронной связи долговременных изменений ледовитости и температуры воздуха нуждается еще в изучении. Вклад формы циркуляции атмосферы C оказался малым.

Слабая связь температуры воздуха в широтной зоне Арктики с АМО может быть объяснена тем, что Северная Атлантика преимущественно влияет на приатлантическую часть полярной зоны $70\text{--}85^\circ$ с.ш. На температуру воздуха в тихоокеанской части зоны $70\text{--}85^\circ$ с.ш. влияет Северная часть Тихого океана [35], но, вероятно, в меньшей степени.

Что касается уравнения (2), то дисперсия температуры воздуха на акватории арктических морей $Ts(hy)$ определяется, главным образом, индексом АМО (50 %) и только на 21 % ледовитостью арктических морей. Данный результат представляется интересным, но требует дополнительного анализа механизма влияния индекса АМО на температуру воздуха на акватории арктических морей. Вклад форм циркуляции атмосферы ($W + E$) оказался малым.

Сопоставление рассчитанных и фактических значений температуры воздуха в Арктике приводится на рис. 1. Из рис. 1 видно, что изменчивость средней трехлетней скользящей температуры воздуха в Арктике хорошо воспроизводится

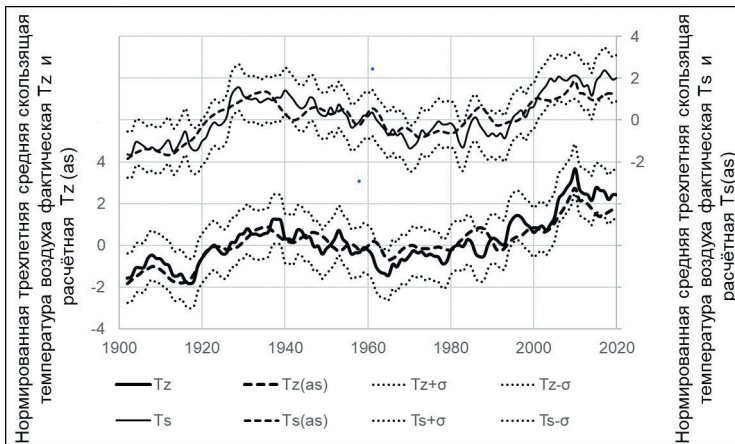


Рис. 1. Сравнение трехлетних скользящих средних значений аномалий температуры воздуха: фактических (Tz , Ts) и вычисленных $Tz(hy)$, $Ts(hy)$ по уравнениям (1) и (2).

Fig. 1. Comparison of actual (Tz , Ts) and calculated by equations (1) and (2) three-year moving averages of air temperature anomalies $Tz(hy)$, $Ts(hy)$.

моделями (1) и (2), в которых в качестве предикторов используются гидрометеорологические параметры.

Полученные статистические модели могут быть использованы не только для диагностических расчетов температуры воздуха, но и для ее прогноза. Но в этом случае возникает необходимость прогноза предикторов, что представляет собой отдельную достаточно сложную проблему.

Связь температуры воздуха с астрогеофизическими параметрами

Для оценки тесноты связи температуры воздуха с астрогеофизическими индексами методом кросскорреляционного анализа были рассчитаны наибольшие коэффициенты корреляции и величины временного лага, приведенные в табл. 5. Величина временного сдвига в годах со знаком минус указывает на опережение предиктором температуры воздуха.

Таблица 5

Парные значимые коэффициенты корреляции аномалий температуры воздуха Tz и Ts с выборочными аномалиями средних трехлетних скользящих значений астрогеофизических индексов. В скобках приведена величина временного сдвига в годах, характеризующего опережение значений предикторов за период 1902—2020 гг.

Paired significant coefficients of correlation of air temperature anomalies Tz and Ts with sample anomalies of the average three-year moving values of astrogeophysical indices.

The value of the time lag in years is shown in parentheses for the period 1902—2020

Характеристики	$Js(-19)$	$Js(-27)$	$lod(0)$	$dWs(-7)$	$dWs(-9)$	$dQ(0)$
Tz	---	0,41	-0,55	-0,34	-0,27	0,66
Ts	0,23	---	-0,78	---	-0,24	0,51

Коэффициенты корреляции температуры воздуха с индексами $dQ(0)$ и $lod(0)$ являются значимыми на уровне $\alpha = 0,05$ и превышают величину $R = 0,50$, что свидетельствует о достаточно тесной статистической связи температуры воздуха с указанными индексами. Это означает возможность установления зависимостей Tz и Ts от астрогеофизических факторов. Далее в обозначения Tz и Ts добавлены в скобках символы «as».

С использованием аппарата пошаговой процедуры множественной линейной регрессии были построены стандартизированные оптимальные модели долговременных колебаний нормированных средних трехлетних скользящих значений аномалий температуры воздуха $Tz(as)$, $Ts(as)$ за период 1902—2020 гг.:

$$Tz(as) = 0,420dQ(0) - 0,552lod(0) + 0,395Js(-27) - 0,152dWs(-6); \quad (3)$$

$$Ts(as) = 0,240dQ(0) - 0,771lod(0) + 0,203Js(-27) - 0,134dWs(-9). \quad (4)$$

В уравнения (3) и (4) вошли одни и те же предикторы, но с различными коэффициентами пропорциональности при предикторах, что связано, прежде всего, с географией осреднения температур воздуха, а также с особенностями реакции температуры воздуха на воздействие внешних факторов $dQ(0)$; $lod(0)$; $Js(-27)$, $dWs(-6)$ и $dWs(-9)$.

Для проверки коллинеарности предикторов рассчитаны значения взаимных коэффициентов корреляции предикторов и временные сдвиги (табл. 6). Как видно из таблицы, коэффициенты корреляции между переменными в правых частях уравнений (3) и (4) изменяются от 0,03 до 0,28, что свидетельствует о практической независимости предикторов.

Таблица 6

Коэффициенты взаимной корреляции средних трехлетних стандартизированных скользящих значений предиктантов и предикторов.

В скобках указана величина временного сдвига в годах, знак минус указывает опережение предиктором температуры воздуха

Coefficients of mutual correlation of normalized three-year moving averages of predicates and predictors. The value of the time shift in years is indicated in parentheses, and the minus sign indicates that the predictor of air temperature is ahead of schedule

Характеристики уравнения (3)	$Tz(as)$	$Js(-27)$	$lod(0)$	$dWs(-6)$	$dQ(0)$
$Tz(as)$	1,00	0,41	-0,55	-0,32	0,66
$Js(-27)$	0,41	1,00	0,20	-0,28	0,19
$Lod(0)$	-0,55	0,20	1,00	-0,10	-0,22
$dWs(-6)$	-0,32	-0,28	-0,10	1,00	-0,28
$dQ(0)$	0,66	0,19	-0,22	-0,28	1,00
Характеристики уравнения (4)	$Ts(as)$	$Js(-27)$	$lod(0)$	$dWs(-9)$	$dQ(0)$
$Ts(as)$	1,00	0,13	-0,78	-0,23	0,49
$Js(-27)$	0,13	1,00	0,20	-0,27	0,19
$lod(0)$	-0,78	0,20	1,00	-0,03	-0,22
$dWs(-9)$	-0,23	-0,27	-0,03	1,00	-0,28
$dQ(0)$	0,49	0,19	-0,22	-0,28	1,00

Статистические характеристики уравнений (3) и (4) приведены в табл. 7. Коэффициенты детерминации уравнений (3) и (4) равны 0,80 и 0,78. Стандартная ошибка расчетов по уравнениям составляет $\Delta Tz(as) = 0,46^\circ\text{C}$ и $\Delta Ts(as) = 0,48^\circ\text{C}$ при стандартном отклонении температуры $\sigma_t = 1,00^\circ\text{C}$. Для предикторов уровень значимости $p\text{-level}$ меньше 0,01, кроме предиктора $dWs(-1)$ в уравнении (3), для которого $p\text{-level} = 0,02$, но меньше 0,05. Критерий Фишера F намного больше критического значения $F_{кр}$. Из оценок статистических критериев следует, что уравнения (3) и (4) статистически значимы и адекватно описывают долговременную изменчивость температуры воздуха $Tz(as)$ и $Ts(as)$.

В табл. 7 приведены оценки вклада разных факторов в дисперсию предиктантов. Как видно, дисперсия $Tz(as)$ в равной пропорции определяется колебаниями инсоляционной контрастности (индекс dQ) и скоростью вращения Земли (индекс $lod(0)$). В меньшей степени она зависит от изменчивости диссиметрии Солнечной системы (параметр $Js(-27)$) и флуктуаций разности поступающей от Солнца энергии в 10-й и 0-й годы (индекс $dWs = Ws(0) - W(-10)$).

Таблица 7

Статистические характеристики уравнений (3) и (4) за период 1902—2020 гг.

Statistical characteristics of equations (3) and (4) for the period 1902—2020

$Tz(as)$: $R = 0,891$; $R^2 = 0,80$; $F = 110,6$; $F_{кр} = 4,1$; $\Delta Tz(as) = 0,46\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\sigma_T = 1,00\text{ }^{\circ}\text{C}$			$Ts(as)$: $R = 0,88$; $R^2 = 0,78$; $F = 101,3$; $F_{кр} = 4,1$; $\Delta Ts(as) = 0,48\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\sigma_T = 1,00\text{ }^{\circ}\text{C}$		
Параметры уравнения (3)	$p\text{-level}$	Вклад, %	Параметры уравнения (4)	$p\text{-level}$	Вклад, %
$dQ(0)$	0,00	28	$dQ(0)$	0,00	12
$lod(0)$	0,00	30	$lod(0)$	0,00	60
$Js(-27)$	0,00	17	$Js(-27)$	0,00	3
$dWs(-6)$	0,02	5	$dWs(-9)$	0,00	3

В дисперсию $Ts(as)$ доминирующий вклад вносят колебания скорости вращения Земли (индекс $lod(0)$). В пять раз меньше вклад колебаний инсоляционной контрастности (индекс dQ) и совсем малый вклад приходится на индексы $Js(-27)$ и $dWs(-1)$.

На рис. 2 приведены графики рассчитанных по уравнениям (3) и (4) фактических и вычисленных значений температуры воздуха в Арктике в широтной зоне 70—85° с.ш. и на акватории арктических морей. Из рис. 2 видно, что изменчивость

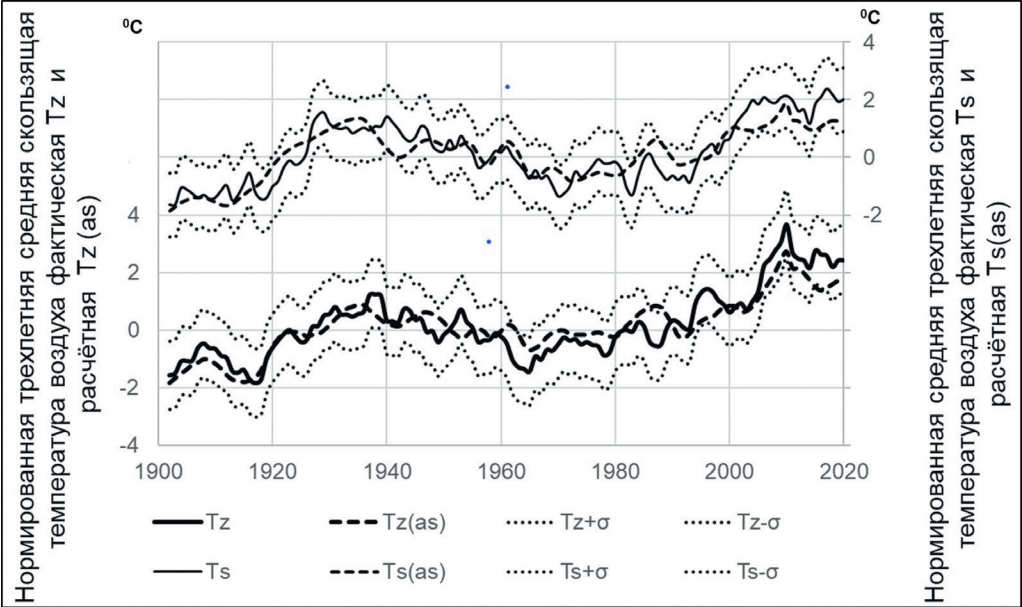


Рис. 2. Сравнение трехлетних скользящих средних значений аномалий температуры воздуха: фактических (Tz , Ts) и вычисленных $Tz(as)$, $Ts(as)$ по уравнениям (3) и (4).

Fig. 2. Comparison of the actual (Tz , Ts) and calculated by equations (3) and (4) three-year moving averages of air temperature anomalies ($Tz(as)$, $Ts(as)$).

средней трехлетней скользящей температуры воздуха в Арктике хорошо воспроизводится моделями (3) и (4), в которых в качестве предикторов используются астрогеофизические параметры. Расчетные кривые на рис. 2 не выходят за пределы границ от $Tz - \sigma$ до $Tz + \sigma$ и от $Ts - \sigma$ до $Ts + \sigma$ за исключением двух годов. В 2015 г. и 2016 г. расчетная температура $Tz(as)$ выходит за пределы $Tz - \sigma$ на $0,07$ — $0,10$ °С, а расчетная температура $Ts(as)$ в 2017 г. выходит за пределы $Ts - \sigma$ на $0,08$ °С. По результатам оценок, можно говорить о возможности прогнозирования температуры воздуха, по крайней мере, на 2—3 года.

Обсудим возможный механизм влияния астрогеофизических факторов на температуру. Согласно работе [24], увеличение широтного градиента глобальной температуры воздуха при увеличении межширотного градиента инсоляции индуцирует усиление переноса энергии (тепла) из экваториальной области к полярным районам, т. е. при положительных аномалиях dQ будет увеличиваться температура воздуха в арктической зоне и наоборот. Выше также было указано, что широтный градиент глобальной температуры воздуха коррелирует с инсоляционной контрастностью, а контрастность температуры между севером и югом управляет атмосферной циркуляцией Земли и ветровой циркуляцией океана [31].

Влияние угловой скорости вращения Земли на поверхностную температуру воздуха рассматривалось во многих работах [24, 25, 26, 28, 29]. По Б. А. Слепцову-Шевлевицу и А. М. Бояринову [25], влияние скорости вращения Земли на температуру воздуха происходит следующим образом. При замедлении скорости вращения Земли (увеличение индекса lod) на полюсах наблюдается вспучивание поверхности океана и атмосферы, а на экваторе, наоборот, проседание. Уровень океана и атмосферы, возникший вследствие замедления вращения Земли, уменьшается от полюса к экватору, вследствие чего геострофический поток водных и воздушных масс направлен на юго-запад, уменьшая температуру воздуха полярной области, как это и следует из уравнений (3) и (4) при положительной аномалии индекса lod . При уменьшении индекса lod (ускорение вращения Земли) вспучивание океана наблюдается на экваторе, и уменьшение высоты «ротационного прилива» от экватора к полюсу сопряжено с формированием геострофического переноса масс в северо-восточном направлении, которое способствует увеличению температуры воздуха на севере. Б. Г. Шерстюков [28, 29] полагает, что механизм влияния астрогеофизического индекса lod таков: «замедление вращения (увеличение lod) сопровождается в Северном полушарии ослаблением выноса тепла из низких широт в высокие (температура понижается) и наоборот».

Более подробно механизм влияния вращения Земли на климат рассмотрен в работе Н. С. Сидоренкова [26]. Отметим, что его результаты полностью соответствуют результатам указанных выше авторов: при ускорении скорости Земли температура повышается, при замедлении — понижается. При этом показано, что корреляция между угловой скоростью и аномалиями ТВ северного полушария при десятилетнем осреднении равна $0,81$, а для зоны 85 — 30° с.ш. она возрастает до $0,91$.

Влияние изменений суммарного момента инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы J_s , по Б. Г. Шерстюкову [29],

происходит следующим образом. За счет гравитационного влияния больших планет возникает диссиметрия Солнечной системы, которая индуцирует неучтенные составляющие в движении Земли. Воздействие неучтенных движений Земли и, как следствие, неучтенных сил могут регулировать циркуляцию вод океана, теплообмен в системе океан – атмосфера и межширотный теплообмен. Увеличение суммарного момента инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы (индекс J_s) сопровождается увеличением температуры воздуха в Арктике. Тем не менее, механизм влияния индекса J_s на температуру воздуха еще нуждается в раскрытии.

Влияние изменений разности поступающей от Солнца радиации в 0-й и 10-й годы dWs может осуществляться как прямым воздействием радиации, так и через изменение атмосферной циркуляции [37]. Возможно, в первом приближении, этот индекс воспроизводит структуру квазидвадцатилетнего цикла вариации инсоляции [24]. С увеличением разности поступающей от Солнца энергии dWs (при увеличении $Ws(0)$ или уменьшении $Ws(-10)$), где Ws — трехлетние скользящие числа Вольфа, происходит увеличение температуры воздуха, что и следует из уравнений (3) и (4).

Сравнивая статистические модели (1), (2) с уравнениями (3), (4), видим, что достоверность описания Tz несколько лучше при использовании гидрометеорологических характеристик ($R^2 = 0,80$), чем с использованием астрогеофизических параметров ($R^2 = 0,77$). Достоверность описания Ts лучше при использовании в качестве предикторов астрогеофизических факторов ($R^2 = 0,77$), чем гидрометеорологических ($R^2 = 0,74$). Но преимущество статистических уравнений (3), (4) перед гидрометеорологическими факторами состоит в том, что такие астрогеофизические параметры, как dQ и J_s , рассчитаны на многие десятилетия вперед [24, 29], а индексы dWs и lod на 20—50 лет [38, 39]. Это обстоятельство служит основанием возможности использования статистических моделей (3) и (4) для прогноза температуры воздуха с использованием в качестве предикторов астрогеофизических факторов на длительный срок.

К оценке возможных изменений температуры воздуха в Арктике в ближайшие десятилетия

Недостаток знаний о механизмах долговременных изменений природных процессов, климата, внутривековых колебаний состояния атмосферы, океана и ледяного покрова является определенным препятствием для разработки сверхдолгосрочного прогноза состояния атмосферы, океана и ледяного покрова. Одним из направлений решения этой проблемы может служить аппарат множественной линейной и нелинейной регрессии для разработки адекватных статистических моделей изменений гидрометеорологических характеристик. Для построения статистических моделей долговременных колебаний температуры воздуха в Арктике в качестве предикторов могут быть использованы внешние по отношению к Земным сферам астрогеофизические факторы, которые обладают перед гидрометеорологическим параметрами серьезным преимуществом. Оно состоит в том, что

их прогноз на длительный срок крайне сложен. К близкому выводу ранее пришли авторы А. И. Воскресенский и др. [10]. Повторим их тезис: «...В ближайшее время преобладать в флуктуациях климата будут все же естественные его изменения. Поэтому для оценки возможных изменений приземной температуры воздуха надо полагаться на факторы, вызывающие естественную изменчивость климата. Наиболее приемлемыми из них являются внешние по отношению к климатической системе Земли факторы».

Отметим, что при построении метода сверхдолгосрочного предвычисления температуры воздуха на основе статистических моделей важно проверить, насколько модели теряют точность при переходе к расчетам по независимым данным, т. е. исследовать устойчивость статистических уравнений по значениям предикторов, которые не использовались в обучающей выборке. В качестве обучающей выборки был определен период 1902—2010 гг., для которого были получены следующие статистические уравнения:

$$exTz = 0,366dQ - 0,736lod(-1) + 0,478Js(-27) - 0,136dWs(-1); \quad (5)$$

$$exTs = 0,157dQ - 0,882lod(0) + 0,190Js(-27) - 0,146dWs(-1). \quad (6)$$

По структуре уравнения (5) и (6), полученные по более коротким рядам, мало отличаются от уравнений (3) и (4). Величины коэффициентов детерминации незначительно меньше: для $exTz$ на 0,02 меньше, а для $exTs$ на 0,03 по сравнению с $Tz(as)$ и $Ts(as)$ соответственно (табл. 6). Отношение стандартной ошибки расчетов в интервале 2010—2020 гг. к стандартному отклонению ряда 1902—2010 гг. составили 0,29 и 0,30 для уравнений (5) и (6) соответственно, что свидетельствует о высокой точности расчета значений температуры воздуха по обучающей выборке.

По уравнениям (5) и (6) были выполнены расчеты температуры воздуха по зависимым предикторам (1902—2010 гг.) и по независимым (2011—2020 гг.). Результаты расчетов приведены на рис. 3, на котором штрихпунктирными вертикальными линиями показан интервал расчетов по независимым предикторам. На рис. 3 видно, что расчетные кривые неплохо воспроизводят фактические колебания температуры, но в отдельных случаях ошибки расчета достигают 1 °C и более. Например, для Tz в 2016 г. абсолютная величина ошибки достигала 1,26 °C при среднеквадратическом отклонении для всего ряда 1,22 °C, а для Ts в 2018 г. абсолютная величина ошибки расчета равнялась 1,14 °C при среднеквадратическом отклонении для всего ряда 0,82 °C.

Устойчивость статистических уравнений (5) и (6), по крайней мере на период 10 лет вперед, позволяет надеяться на определенную устойчивость уравнений (3) и (4). Основываясь на выполнении этого условия, по этим уравнениям было сделано предвычисление температуры воздуха с 2021 г. по 2043 г.

При расчетах для периода 1902—2020 гг. и предвычислении на период 2021—2045 гг. были использованы рассчитанные значения предикторов dQ , $Js(-27)$. Для периода 1902—2020 гг. использовались фактические данные индексов $lod(-1)$ и $dWs(-8)$, а для периода 2021—2045 гг. использовались данные прогнозов [38, 39]. На рис. 4 приведены фактические и расчетные для временного

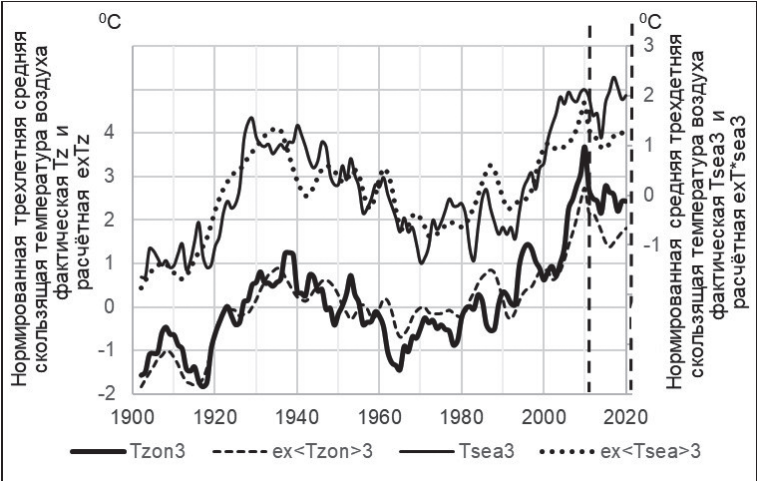


Рис. 3. Сравнение трехлетних скользящих средних аномалий температуры воздуха: фактических T_z , T_s и рассчитанных $exT_z(as)$, $exT_s(as)$ по уравнениям (5) и (6) за период 1902—2010 гг.

Fig. 3. Actual T_z , T_s and calculated according to equations (5) and (6) for a number of years 1902—2010 average three-year sliding air temperatures $exT_z(as)$, $exT_s(as)$.

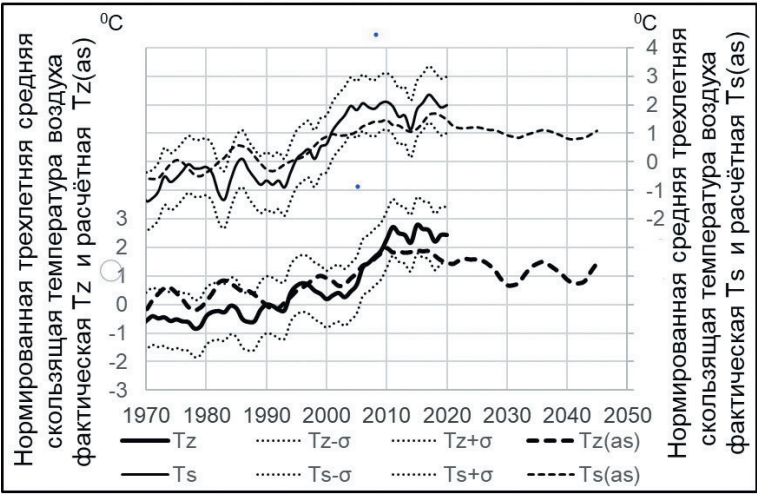


Рис. 4. Сравнение трехлетних средних скользящих значений температуры воздуха: фактических T_z , T_s и рассчитанных exT_z , exT_s по уравнениям (3) и (4) за период 1902—2020 гг.; а также прогностические значения температуры на период 2021—2043 гг.

Fig. 4. The actual T_z , T_s and calculated by equations (3) and (4) for the period 1902—2020 the average three-year sliding values of air temperature exT_z , exT_s ; as well as the calculated temperature values for the period 2021—2043.

интервала 1970—2020 гг. по зависимой выборке средние трехлетние скользящие температуры воздуха в широтной зоне 70—85° с.ш. и в морской части морей российской Арктики, а также предвычисленные значения температуры на период 2021—2043 гг.

Расчетные аномалии температуры воздуха в широтной зоне 70—85° с.ш. в общем согласуются с многолетней изменчивостью фактической температуры T_z . Но в 1975 г. и 1984 г. расчетные аномалии температуры были намного выше фактических, а в 2011 г. и 2015 г. расчетные аномалии температуры оказались намного ниже фактических. Расчетные значения аномалий температуры воздуха в арктических морях также оказались выше фактических в 1983 г. и намного ниже фактических аномалий в 2005 г. Эти отдельные факты расхождения расчетных и фактических аномалий температуры требуют дальнейшего анализа причин больших различий.

Вместе с тем отмечаем, что средняя квадратическая ошибка расчета Δ за период 1902—2020 гг. меньше среднеквадратического отклонения фактических значений и составляет 50 % для температуры T_z и 54 % для температуры T_s . На рис. 4, где пунктирными линиями обозначены области $T_z - \sigma$, $T_z + \sigma$ и $T_s - \sigma$, $T_s + \sigma$, расчетные кривые exT_z , exT_s не выходят за пределы указанных областей, за исключением единичных случаев. Следовательно, значения температуры воздуха, рассчитанные по астрогеофизическим параметрам, удовлетворительно описывают тенденции долговременных изменений температуры воздуха в Арктике в интервале 1902—2020 гг.

Результаты расчетов на период 2021—2043 гг. демонстрируют слабый отрицательный тренд температуры, на фоне которого наблюдаются циклические колебания с периодом 10—15 лет с максимумом около 2024 г. и 2036 г. и минимумом около 2030 г. и 2041 г. (рис. 4). Но пределы изменения температуры предполагаются аналогичными периоду 2000—2020 гг. с амплитудой около 1,0 °C.

Характер изменения температуры воздуха в морской части морей российской Арктики по расчетным оценкам в 2021—2043 гг. подобен колебаниям температуры воздуха в широтной зоне, но амплитуда межгодовых колебаний меньше, около 0,5 °C (рис. 4).

Полученные нами результаты изменений температуры воздуха в Арктике близки к оценкам, опубликованным в работах [24, 29, 40]. А. А. Дмитриев и др. [40] разработали климатический сценарий по умеренным и высоким широтам Северного полушария на весь XXI век, составленный на основании полученных связей по трем главным составляющим планетных циклов колебаний температуры. По расчетам авторов, до 2105 г. тренд температуры воздуха будет отрицательным, на фоне которого будут наблюдаться циклические колебания. Так, минимум температуры воздуха будет приходиться на 2025 г. и 2045 г., а максимумы — на 2020 г. и 2035 г. В работе [29] на основе авторской статистической модели приводятся прогностические расчеты аномалий температуры воздуха по Северному полушарию. Ожидается, что к 2040 г. температура вернется к состоянию 2000—2015 гг., и наступит временная стабилизация климата.

Заключение

В результате использования статистического анализа подтверждена связь долговременных колебаний температуры воздуха с аналогичными изменениями гидрометеорологических характеристик. В статистических моделях для температуры воздуха в Арктике предикторами являлись ледовитость арктических морей, индекс АМО (показатель теплового состояния Северной Атлантики) и сумма западной и восточной форм циркуляции атмосферы по классификации Вангенгейма. Гидрометеорологические характеристики определяют 80 % общей дисперсии температуры воздуха в широтной зоне 70—85° с.ш. и 74 % общей дисперсии температуры воздуха на акватории арктических морей.

Установлена связь долговременных колебаний температуры воздуха в Арктике с изменениями ряда астрогеофизических факторов. В статистические модели долговременных колебаний температуры воздуха вошли следующие предикторы: индекс инсоляционной контрастности (или широтный градиент инсоляции), продолжительность суток (индекс вращения Земли), момент инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы и разность поступающей от Солнца энергии в 0-й и 10-й годы. Астрогеофизические характеристики определяют 77 % общей дисперсии температуры воздуха в широтной зоне 70—85° с.ш. и 77 % общей дисперсии температуры воздуха на акватории арктических морей.

С использованием астрогеофизических факторов по статистическим моделям были выполнены расчеты температуры воздуха до 2043 г. Исходя из полученных оценок, вероятно, температура воздуха в арктической зоне 70—85° с.ш. к 2040 г., будет понижаться, сохраняя межгодовые вариации. Но пределы изменения температуры предполагаются аналогичными периоду 2000—2020 гг. с амплитудой около 1,0 °C. По расчетам в морской части морей российской Арктики характер изменения температуры воздуха в 2021—2043 гг. будет подобен колебаниям температуры воздуха в широтной зоне, но амплитуда межгодовых колебаний меньше, около 0,5 °C.

Разработанные статистические модели долговременных изменений температуры воздуха в Арктике, включающие астрогеофизические переменные в качестве предикторов, удовлетворительно описывают тенденции долговременных изменений температуры воздуха в Арктике. Но расхождения расчетных и фактических аномалий температуры в период 2015—2020 гг. являются предметом дискуссии и требуют дальнейшего анализа причин этих различий. Расхождения могли возникнуть из-за неучета дополнительных астрогеофизических факторов, вследствие неучета парникового эффекта, влияющего прежде всего на формирование трендов [12], но также как результат вычислительных особенностей линейного метода множественной регрессии. Так, если принять тренд в температуре воздуха Арктики неизменным в ближайшие десятилетия, то T_z увеличится на 0,6 °C к 2030 г. по сравнению с 2020 г., а к 2040 г. — на 1,2 °C. Учет тренда приводит к заметному росту значений T_z , рассчитанных по уравнению (3). Однако насколько реально постоянство тренда, судить сложно.

Выполненное исследование подтверждает сопряженность долговременных колебаний температуры воздуха в Арктике и астрогеофизических факторов. Применение физико-статистического подхода к моделированию долговременных

колебаний характеристик состояния Арктики с включением в предикторы астро-геофизических параметров может служить хорошим основанием для развития методов долгосрочного расчета и прогноза характеристик климатического состояния Арктики.

Список литературы

1. Алексеев Г. В. Современное состояние климатической системы морской Арктики // Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика, СПб: ААНИИ, 2021. С. 10—19.
2. Иванов В. В., Алексеев Г. А. Атмосферная циркуляция и развитие атмосферных процессов в морской Арктике // Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика, СПб: ААНИИ, 2021. С. 20—34.
3. 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.
4. Юлин А. В. Климатическая изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане и российских арктических морях // Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика, СПб: ААНИИ, 2021. С. 132—141.
5. Аксенов П. В., Иванов В. В. «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Том 64. № 1. С. 42—54. DOI: 10.20758/0555-2648-2018-64-1-42-54.
6. Тимохов Л. А., Блошкина Е. В. Термохалинная структура арктических морей в 1986-2015 гг. // Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика, СПб: ААНИИ, 2021. С. 204—250.
7. Scafetta N. Climate Change and Its causes: A Discussion about Some Key Issues La Chimica e l'Industria 1, 2010. P. 70—75.
8. Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. / Под ред. Б. А. Крутских. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1991. 200 с.
9. Алексеев Г. В., Подгорный И. П., Священников П. Н. и др. Особенности формирования климата и его изменчивости в полярной климатической системе атмосфера-морской лед-океан // Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. / Под ред. Б. А. Крутских. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1991. С. 4—29.
10. Воскресенский А. И., Баранов Г. И., Долгин М. И. и др. Оценка возможных изменений климата атмосферы в Арктике до 2005 г. с учетом антропогенных факторов // Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. / Под ред. Б. А. Крутских. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1991. С. 30—61.
11. Виноградов Н. Д., Дмитриев А. А., Болотинская М. С. и др. Влияние изменения циркуляции атмосферы на климат // Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. / Под ред. Б. А. Крутских. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1991. С. 62—94.
12. AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. IPCC Report. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller, Cambridge; N. Y.: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
13. Raval A., Ramanathan V. Observational determination of the greenhouse effect // Nature. 1989. V. 342. No. 6251. P. 758—761. DOI: 10.1038/342758a0.
14. Boer G. J. Climate change and the regulation of the surface moisture and energy budgets // Climate Dynamics. 1993. V. 8. No. 5. P. 225—239. DOI: 10.1007/BF00198617.
15. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Меридиональная изменчивость параметров климатической системы Атлантического океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 269—291.
16. Малинин В. Н., Вайновский П. А., Гордеева С. М. О взаимосвязи межгодовой изменчивости параметров тепло- и влагообмена системы «океан – атмосфера» во внутритропической зоне

- конвергенции зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20 №4, С. 281—296. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-281-296.
17. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Тренды компонент влагообмена в системе «океан – атмосфера» в условиях глобального потепления по данным архива Reanalysis-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 9—25. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-3-9-25.
18. Иванов В. В. Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова // Гидрометеорология и экология. 2021. №64. С.407—434. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-407—434.
19. Алексеев Г. В. Роль циркуляции атмосферы и других факторов в формировании климата Арктики // Формирование и динамика современного климата Арктики / Под ред. проф. Г. В. Алексеева. СПб.: Гидрометеоздат, 2004. С. 27—46.
20. Flournoy M. D., Feldstein S. B., Lee S., Clothiaux E. E. Exploring the tropically excited Arctic warming mechanism with station data: Links between tropical convection and Arctic downward infrared radiation // Journal of the Atmospheric Sciences. 2016. Vol. 73. No. 3 P.1143—1158.
21. O'Brien Ch., Foster G. L., Martnez-Botn M. A. et al. High sea surface temperatures in tropical warm pools during the Pliocene // Nature Geoscience. 2014. No. 7. P. 606—611. DOI: 10.1038/NCEO2194.
22. Previdi M., Smith K. L., Polvani L. M. Arctic amplification of climate change: a review of underlying Mechanisms // Environ. Res. Lett. 2021. Vol. 16. P. 1—25. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>.
23. Матвеев Л. Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 295 с.
24. Федоров В. М. Солнечная радиация и климат Земли. М.: ФИЗМАТГИЗ, 2018. 232 с.
25. Слепцов-Шевлевич Б. А., Бояринов А. М. Солнечный ветер, вращение Земли и климат. Санкт-Петербург: 2002. 159 с.
26. Сидоренков Н. С. Физика неустойчивости вращения Земли. М.: Физматлит, 2002. 380 с.
27. Сидоренков Н. С. Небесно-механические причины изменения погоды и климата // Геофизические процессы и биосфера, 2015. Т. 15. №3. С. 5—26.
28. Шерстюков Б. Г., Салугашвили Р. С. Новые тенденции в изменениях климата Северного полушария Земли в последнее десятилетие // Труды Всероссийского научно-иссл. института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных. 2010. Вып. 175. С. 43—51.
29. Шерстюков Б. Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. Обнинск. 2021. 221 с.
30. Максимов И. В. Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 447 с.
31. Davis B. A. S., Brewer S. A unified approach to orbital, solar, and lunar forcing based on the Earth's latitudinal insolation/temperature gradient // Quaternary Science Reviews. 2011. Vol. 30. P. 1861—1874. DOI 10.1016/j.quascirev.2011.04.016
32. Логинов В. Ф. Космические факторы климатических изменений. Минск, 2020. 168 с.
33. Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П. и др. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова Евразийского шельфа. СПб: Наука. 2007. 135 с.
34. Федоров В. М., Гребенников П. Б. Инсоляционная контрастность Земли и изменение площади морских льдов в Северном полушарии // Арктика: экология и экономика. 2018, №4(32). С. 86—94. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-86-94.
35. Малинин В. Н., Вайновский П. А. О причинах первого потепления Арктики в XX столетии // Ученые записки РГТМУ. 2018. № 53. 35—54.
36. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). Мурманск. Изд-во ПИНРО. 2003. 129 с.
37. Егоров А. Г. Солнечный цикл и два режима многолетнего изменения приземного давления в высоких и умеренных широтах северного полушария Земли в зимний период // Доклады Академии Наук. 2007. Т. 414. № 3. С. 402—407.
38. Solar cycle progression. Space weather prediction center, NOAA, 2022. <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>.
39. Earth Rotation — the Change in the Length of Day and Delta T.pdf. HM Nautical Almanac Office, <https://astro.ukho.gov.uk/>.

40. Дмитриев А. А., Беязо В. А., Гудошников Ю. П. Ритмические колебания земных природных процессов и их гравитационная обусловленность. СПб: Издательство Политехнического университета. 2011. 231 с.

References

1. Alekseev G. V. Current state of the climate system of the marine Arctic. In: *Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions* / Ed. I. M. Ashik. St. Petersburg: AARI. 2021: (10—19). (In Russ.).
2. Ivanov V. V., Alekseenkov G. A. Atmospheric circulation and development of atmospheric processes in the marine Arctic. *Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions* / Ed. I. M. Ashik. St. Petersburg: AARI. 2021: (20—34). (In Russ.).
3. Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Frolov I. E. Intra-century changes in climate, ice cover area, Eurasian Arctic seas and their possible causes. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 2005; (6): (5—14). (In Russ.).
4. Yulin A. V. Climatic variability of ice area in the Arctic Ocean and Russian Arctic seas. *Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions* / Ed. I. M. Ashik. St. Petersburg: AARI. 2021; (132—141). (In Russ.).
5. Aksenov P. V., Ivanov V. V. “Atlantification” as a probable reason for the reduction of sea ice in the Nansen basin in the winter season. *Problems of the Arctic and Antarctic*. 2018; 64(1): 42—54. DOI: 10.20758/0555-2648-2018-64-1-42-54 (In Russ.).
6. Timokhov L. A., Bloshkina E. V. Thermohaline structure of the Arctic seas in 1986—2015. *Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions*. Ed. I.M. Ashik. St. Petersburg: AARI. 2021; (204—250). (In Russ.).
7. Scafetta N., Climate Change and Its Causes, a Discussion about Some Key Issues, SPPI Original Paper, Science and Public Policy Institute, Haymarket, 2010; 1—56.
8. *Klimaticheskij rezhim Arktiki na rubezhe XX i XXI vv = Climatic regime of the Arctic at the turn of the 20th and 21st centuries* / Ed. B. A. Krutskikh. St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 1991: 200 p. (In Russ.).
9. Alekseev G. V., Podgorniy I. P., Priestnikov P. N. et al. Features of climate formation and its variability in the polar climate system atmosphere-sea ice-ocean. *Climatic regime of the Arctic at the turn of the 20th and 21st centuries*. Ed. B. A. Krutskikh. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991; (4—29). (In Russ.).
10. Voskresensky A. I., Baranov G. I., Dolgin M. I. et al. Assessment of possible changes in the Arctic atmospheric climate up to 2005 taking into account anthropogenic factors. *Climatic regime of the Arctic at the turn of the 20th and 21st centuries*. Ed. B. A. Krutskikh. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991; (30—61). (In Russ.).
11. Vinogradov N. D., Dmitriev A. A., Bolotinskaya M. S. et al. The influence of atmospheric circulation changes on climate. *Climatic regime of the Arctic at the turn of the 20th and 21st centuries*. Ed. B. A. Krutskikh. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991; (62—94). (In Russ.).
12. AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. IPCC Report. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller, Cambridge; N. Y.: Cambridge University Press. 2007: 996 p.
13. Raval A., Ramanathan V. Observational determination of the greenhouse effect. *Nature*. 1989. 342(6251):758—761. DOI: 10.1038/342758a0.
14. Boer G. J. Climate change and the regulation of the surface moisture and energy budgets. *Climate Dynamics*. 1993; 8(5): 225—239. DOI: 10.1007/BF00198617.
15. Malinin V. N., Vainovsky P. A. Meridional variability of the parameters of the Atlantic Ocean climate system. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the earth from space*. 2024; 21(3): (269—291). DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-269-291. (In Russ.).
16. Malinin V. N., Vainovsky P. A., Gordeeva S. M. On the relationship between the interannual variability of heat and moisture exchange parameters of the “ocean-atmosphere” system in the intertropical convergence zone. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current*

- problems in remote sensing of the earth from space. 2023; 20(4): (281—296). DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-281-296. (In Russ.).
17. Malinin V. N., Vainovsky P. A. Trends of moisture exchange components in the ocean-atmosphere system under conditions of global warming according to the Reanalysis-2 archive. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = *Current problems in remote sensing of the earth from space*. 2021; 18(3): (9—25). DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-3-9-25. (In Russ.).
18. Ivanov V. V. Present changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with reduction of the sea ice cover. *Gidrometeorologiya i Ekologiya* = *Гидрометеорология и экология*. 2021; (64): 407—434. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-407—434. (In Russ.).
19. Alekseev G., Kuzmina S., Bobylev L. et al. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming. *Int. J. Climatol.* 2019; (39):3582—3592. DOI: 10.1002/joc.6040.
20. Fournoy M. D., Feldstein S. B., Lee S., Clothiaux E. E. Exploring the tropically excited Arctic warming mechanism with station data: Links between tropical convection and Arctic downward infrared radiation. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2016;73 (3): 1143—1158.
21. O'Brien Ch. L., Foster G. L., Martinez-Boti M. A. et. al. High sea surface temperatures in tropical warm pools during the Pliocene. *Nature Geoscience*. 2014;(7):606—611. DOI: 10.1038/NGEO2194.
22. Previdi M., Smith K. L., Polvani L. M. Arctic amplification of climate change: a review of underlying Mechanisms. *Environ. Res. Lett.* 2021; (16): 1—25. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>.
23. Matveev L. T. *Teoriya obshchey tsirkulyatsii atmosfery i klimata Zemli* = *Theory of General Circulation of the Atmosphere and Climate of the Earth*. L.: Gidrometeoizdat, 1991: 295 p.
24. Fedorov V. M. *Solnechnaya radiatsiya i klimat Zemli* = *Solar radiation and the Earth's climate*. Moscow: Fizmatgiz, 2018: 232 p. (In Russ.).
25. Sleptsov-Shevlevich B. A., Boyarinov A. M. *Solnechnyy veter, vrashcheniye Zemli i klimat* = *Solar wind, Earth rotation and climate*. St. Petersburg: 2002:159 p. (In Russ.).
26. Sidorenkov N. S. *Fizika nestabil'nosti vrashcheniya Zemli* = *Physics of instability of the Earth's rotation*. Moscow: Fizmatlit. 2002: 380 p. (In Russ.).
27. Sidorenkov N. S. Celestial-mechanical causes of weather and climate change. *Geofizicheskiye protsessy i biosfera* = *Geophysical processes and the biosphere*. 2015; 15(3): (5—26) (In Russ.).
28. Sherstyukov B. G., Salugashvili R. S. New trends in climate change in the Northern Hemisphere of the Earth in the last decade. *Trudy Vserossiyskogo nauchno-issl. instituta gidrometeorologicheskoy informatsii – Mirovogo tsentra dannykh.* = *Proceedings of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center*. 2010; (175): (43—51). (In Russ.).
29. Sherstyukov B. G. *Kolebatel'naya sistema klimata, rezonansy, dal'niye svyazi, prognozy* = *Vibrational climate system, resonances, long-distance communications, forecasts*. Obninsk: RIHMI-WDC. 2021:222 p. (In Russ.).
30. Maksimov I. V. *Geofizicheskiye sily i vody okeana* = *Geophysical forces and waters of the ocean*. L.: Gidrometeoizdat, 1970: 447 p. (In Russ.).
31. Davis B. A. S., Brewer S. A unified approach to orbital, solar, and lunar forcing based on the Earth's latitudinal insolation/temperature gradient. *Quaternary Science Reviews*. 2011; 30:1861—1874. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.04.016>.
32. Loginov V. F. *Kosmicheskiye faktory klimaticheskikh izmeneniy* = *Space factors of climate change*. Minsk. 2020:168 p. (In Russ.).
33. Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Karklin V. P. et al. *Nauchnyye issledovaniya v Arktike. T. 2. Klimaticheskkiye izmeneniya ledyanogo pokrova Yevraziyskogo shel'fa* = *Scientific research in the Arctic. Vol. 2. Climatic changes in the ice cover of the Eurasian shelf*. St. Petersburg: Nauka. 2007: 135 p. (In Russ.).
34. Fedorov V. M., Grebennikov P. B. Insolation contrast of the Earth and changes in the area of sea ice in the Northern Hemisphere. *Arctic: ecology and economics*. 2018; 4(32): (86—94). DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-86-94. (In Russ.).
35. Malinin V. N., Vainovsky P. A. On the causes of the first warming of the Arctic in the twentieth century. *Uchenyye zapiski RSHU*, = *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2018; (53):(35—54). (In Russ.).
36. Malinin V. N., Gordeeva S. M. *Fiziko-statisticheskiy metod prognoza okeanologicheskikh kharakteristik (na primere Severo-Yevropeyskogo basseyna)* = *Physical-statistical method of forecasting*

- oceanographic characteristics (on the example of the North European basin)*. Murmansk, PINRO Publishing House. 2003: 129 p. (In Russ.).
37. Egorov A. G. Solar cycle and two regimes of long-term changes in surface pressure in high and temperate latitudes of the Earth's northern hemisphere in winter. *Doklady Akademii Nauk. = Reports of the Academy of Sciences*. 2007; 414(3): (402—407). (In Russ.).
38. Solar cycle progression. Space weather prediction center. NOAA. 2022. <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
39. Earth Rotation — the Change in the Length of Day and Delta T.pdf. HM Nautical Almanac Office. <https://astro.ukho.gov.uk/>.
40. Dmitriev A. A., Belyazo V. A., Gudoshnikov Yu. P. *Ritmicheskiye kolebaniya zemnykh prirodnykh protsessov i ikh gravitatsionnaya obuslovlennost' = Rhythmic oscillations of natural processes on Earth and their gravitational determinacy*. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University. 2011:231 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Тимохов Леонид Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник отдела океанологии, Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, ltim@aari.ru.

Малинин Валерий Николаевич, д-р геогр. наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами, Институт гидрологии и океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, malinin@rshu.ru.

Иванов Владимир Васильевич, к-т геогр. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией долгосрочных метеорологических прогнозов отдела ледового режима и прогнозов, Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, v_ivanov@aari.ru.

Informations about authors

Timokhov Leonid A., Doctor of Physical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Department of Oceanology, Arctic and Antarctic Research Institute, ltim@aari.ru.

Malinin Valery N., Doctor of Geological Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Institute of Hydrology and Oceanology, Russian State Hydrometeorological University, malinin@rshu.ru.

Ivanov Vladimir V., Candidate of Geography Sciences, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Long-term Meteorological Forecasts of the Department of Ice Regime and Forecasts, Arctic and Antarctic Research Institute, v_ivanov@aari.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 14.03.2024

Принята в печать 14.06.2024

The article was received on 14.03.2024

The article was accepted 14.06.2024