

Изменения температуры в области мезопаузы при изменениях климата в последние десятилетия (1960–2024 гг.)

И.И. Мохов,^{1,2,*} В.И. Перминов,² И.А. Фомина¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3
(Поступила в редакцию 17.05.2024; после доработки 05.07.2024; подписана в печать 22.07.2024)

Представлены результаты анализа вариаций температуры в области мезопаузы по данным многолетних измерений на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ЗНС ИФА РАН) в 1960–2024 гг. на фоне глобальных климатических изменений. Наряду с вариациями температуры в области мезопаузы по измерениям излучения гидроксидов, анализировались две версии вариаций температуры в области мезопаузы, приведенных к одному уровню солнечной активности. Получены количественные оценки сильного понижения температуры в области мезопаузы в течение последних десятилетий зимой на фоне глобального увеличения приповерхностной температуры. В том числе с использованием кросс-вейвлетного анализа данных для временного интервала 1960–2024 гг. отмечена значимая когерентность их наиболее долгопериодных вариаций, которая ранее не проявлялась по данным для более короткого временного интервала. Возможность проявления подобной когерентности прогнозировалась в (Мохов и др., 2017) при продолжении глобального потепления по результатам расчетов с глобальной климатической моделью для XX–XXI веков с учетом антропогенных воздействий, но ранее не проявлялась по данным наблюдений для более короткого временного интервала. Наряду с долгопериодными тенденциями отмечены особенности резкого понижения температуры в области мезопаузы в 1970-х гг. и его синхронность с известным сдвигом в климатических режимах у поверхности, связываемым с явлениями Эль-Ниньо. Результаты кросс-вейвлетного анализа с использованием данных, полученных на ЗНС ИФА РАН для временного интервала 1960–2024 гг., свидетельствуют о проявлении более значимой связи температурных вариаций в области мезопаузы с индексами Эль-Ниньо в последние десятилетия.

PACS: 92.00.00 УДК: 551.151:551.583.

Ключевые слова: климатические изменения, температура, мезопауза, нелинейность, климатический сдвиг, явления Эль-Ниньо, моделирование.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2450901](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2450901)

ВВЕДЕНИЕ

Проблема изменений климата — одна из ключевых современных проблем. Для адекватного понимания происходящих климатических изменений необходимо определение относительной роли естественных и антропогенных факторов. Особое значение при этом имеют результаты анализа вертикальных профилей температурных трендов в атмосфере не только в пределах приповерхностных пограничных слоев и тропосферы, но и в средней и верхней атмосфере (стратосфере, мезосфере и термосфере). При глобальном приповерхностном потеплении в последние десятилетия выявлено общее выхолаживание страто- и мезосферы. Отмеченное по результатам различных измерений общее выхолаживание средней и верхней атмосферы при общем потеплении у поверхности является важным индикатором происходящих изменений,

свидетельствующим о потенциальной роли антропогенных механизмов глобальных изменений климата. Результаты модельных исследований свидетельствуют о существенных различиях температурных изменений в разных слоях атмосферы, в частности в стратосфере и мезосфере, в зависимости от типа внешних воздействий на климатическую систему — естественных (включая солнечную и вулканическую активности) и антропогенных (в том числе изменение содержания в атмосфере парниковых газов и аэрозоля) [1–25]. Согласно модельным расчетам при увеличении содержания в атмосфере парниковых газов (углекислого газа и других) на фоне общего потепления у поверхности и в тропосфере следует ожидать продолжения выхолаживания атмосферных слоев выше тропопаузы (рис. 1). При этом из-за естественных вариаций инсоляции проявляется общая синфазность температурных вариаций в нижней и средней атмосфере (см., напр., [10, 26, 27]).

В земной климатической системе выделяется особый температурный режим в области мезопаузы — границы между мезосферой и термосфе-

* E-mail: mokhov_ii@physics.msu.ru

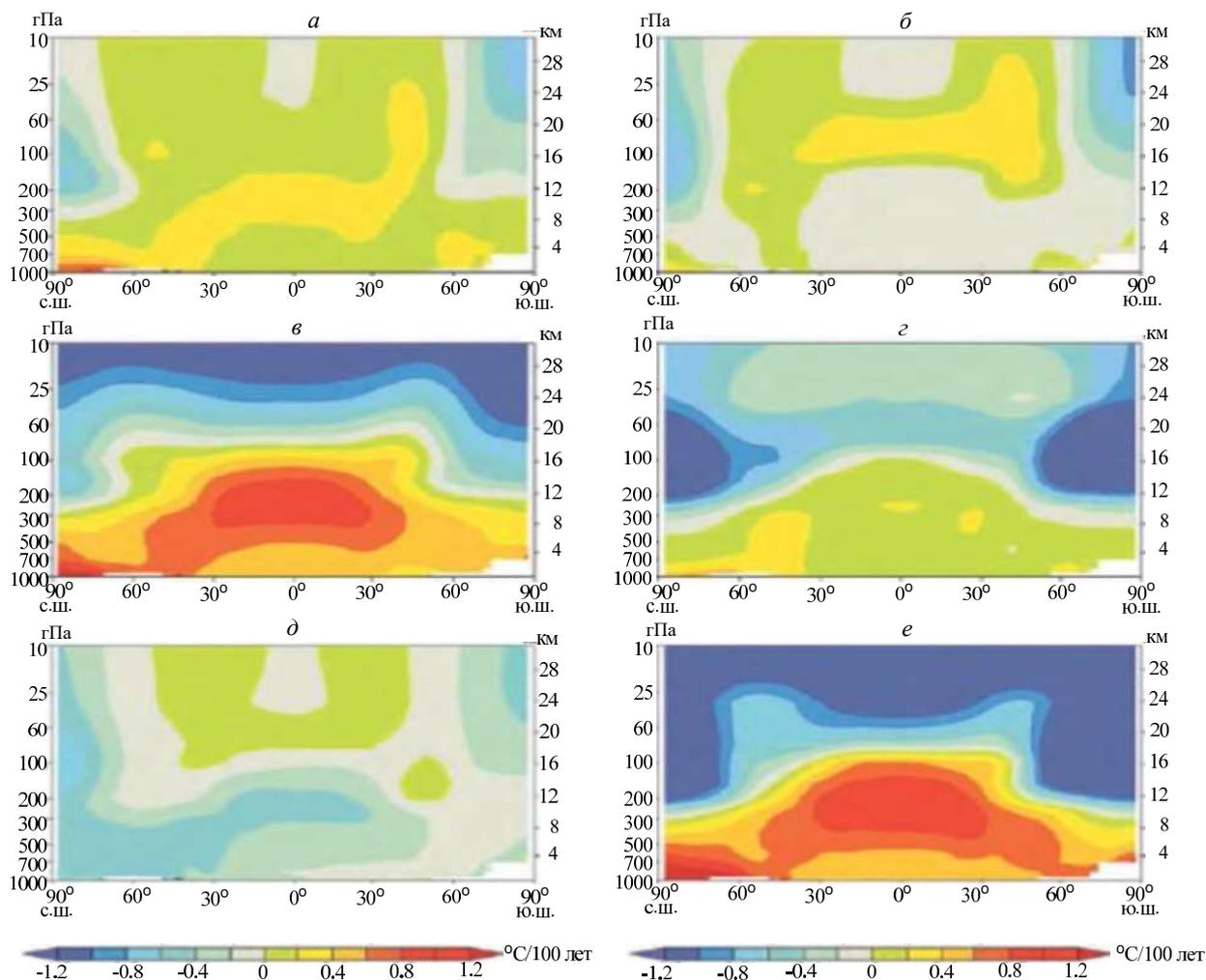


Рис. 1. Модельные оценки широтно-высотных изменений температуры атмосферы с 1890 г. по 1999 г. с учетом изменений (а) солнечного форсинга, (б) вулканической активности, (в) парниковых газов, (г) изменений тропосферного и стратосферного озона, (д) радиационного воздействия сульфатных аэрозолей и (е) суммарного форсинга [26] (см. также [10, 27])

рой (на высотах 80–100 км) с самыми низкими значениями температуры. Его формирование связано с особенностями радиационных, химических и динамических процессов в мезосфере и нижней термосфере [8]. Не случайно создана глобальная сеть станций, осуществляющих мониторинг изменений в области мезопаузы — NDMC (Network for the Detection of Mesopause Change, <http://wdc.dlr.de/ndmc/>). Ключевой аргумент создания международного проекта NDMC — возможность раннего распознавания глобальных изменений температурного режима атмосферы и ее состава по измерениям в верхней атмосфере, так как реакция разреженных слоев верхней атмосферы, в частности в области мезопаузы, более чувствительна как к воздействию солнечного излучения, так и к другим воздействиям, включая антропогенные, по сравнению с реакцией для нижних слоев атмосферы. Следует отметить, что нижние слои атмосферы существенно подвержены влиянию различных динамических процессов, возникающих при

взаимодействии с неоднородностями на поверхности Земли [22]. В рамках системы NDMC самый длинный временной ряд данных для температуры атмосферы в области мезопаузы — по измерениям на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (ЗНС ИФА РАН) с 1950-х гг. [9].

В [19] представлены результаты совместного анализа вариаций температуры в области мезопаузы по данным многолетних измерений на ЗНС ИФА РАН в 1960–2015 гг. и вариаций приповерхностной температуры, характеризующих глобальные климатические изменения. Наряду с вариациями температуры в области мезопаузы T_{ms} , по измерениям излучения гидроксила анализировались вариации температуры в области мезопаузы T_m , приведенные к одному уровню солнечной активности. Сильное понижение температуры в области мезопаузы в течение последних десятилетий, в частности зимой, с тенденцией замедления с 1980-х гг. проявляется на фоне общего увеличения приповерхностной

температуры для Северного полушария (СП) T_{NHs} и Земли в целом. При этом отмечена синхронность выявленного резкого понижения температуры в области мезопаузы в 1970-х гг. и с известным сдвигом в климатических особенностях у поверхности, связываемым с явлениями Эль-Ниньо. При значимой отрицательной корреляции вариаций температуры в области мезопаузы и T_{NHs} по 56-летним данным наблюдений кросс-вейвлетный анализ не выявил значимой когерентности соответствующих наиболее долгопериодных температурных вариаций. Для оценки возможности проявления такой когерентности использовались результаты модельных расчетов и сделан вывод, что для XX–XXI веков с учетом антропогенных воздействий для получения значимой когерентности многолетних вариаций T_m и T_{NHs} необходимы более продолжительные наблюдения температуры в области мезопаузы.

Цель данной работы — анализ связи температурных изменений в области мезопаузы с изменениями приповерхностной температуры по многолетним данным наблюдений — более продолжительным, чем в [17, 22], в сравнении с результатами модельных расчетов [22].

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

При анализе использовались данные для температуры T_{ms} в области мезопаузы по измерениям на ЗНС ИФА РАН (56°N, 37°E) в 1959–2024 гг. Значения T_{ms} определялись (с точностью 2 К) по измерениям дифракционным спектрографом по спектрам эмиссии гидроксидов с максимумом эмиссионного слоя (с полушириной около 10 км) на высоте около 87 км [9] (см. также [17, 19, 22]).

В 2015 г. проведено сравнение серии спектрофотометрических измерений температуры на уровне мезопаузы на ЗНС ИФА РАН совместно с измерениями вертикальных распределений температуры и содержания озона в атмосфере с помощью многофункционального лидара высотного зондирования, проводившихся Институтом прикладной геофизики им. Е. К. Федорова Росгидромета с 2011 г. [28]. В ходе лидарных зондирований были определены высотные распределения температуры атмосферы до высоты около 100 км. Наряду с этим, профили температуры, полученные по данным лидарных измерений, сравнивались со спутниковыми данными (AURA, TIMED/SABER) и моделью CIRA. Полученные результаты сравнения свидетельствуют о достаточно хорошем согласии различных данных, в частности для температуры в области мезопаузы.

Наряду с вариациями T_{ms} , анализировались два варианта вариаций температуры в области мезопаузы T_m , полученные редуциацией значений T_{ms} к постоянному уровню солнечной активности, характеризуемой индексом плотности потока радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$ (<http://www.wdcb.ru/stp/data/>

solar.act/flux10.7/daily/). При этом

$$T_{ms} = T_m + \delta T_{ms},$$

где вклад вариаций потока солнечной радиации в вариации температуры в области мезопаузы δT_{ms} оценивался аналогично [9].

Анализировались значения температуры в области мезопаузы $T_m(1)$, приведенные к уровню солнечной активности $F_{10.7} = 130$ с учетом

$$\delta T_{ms} = 25 \lg [F_{10.7}(t - 0.42)/150], \quad (1)$$

где t — годы. Формула (1) была получена на основе данных без учета сезонности (см. [9]). В частности, аппроксимация (1) использовалась в [22]. Отмечено, что зимняя температура и летняя температура в области мезопаузы имеют различный отклик на изменения солнечной активности [29]. При этом для зимнего сезона отклик является линейным и без временного запаздывания:

$$\delta T_{ms}/\delta F_{10.7} = 0.054 \text{ K/sfu}, \quad (2)$$

sfu — единица измерения $F_{10.7}$ -солнечного потока. Наряду с $T_m(1)$, анализировались значения температуры в области мезопаузы $T_m(2)$, приведенные к уровню солнечной активности $F_{10.7} = 130$ с учетом (2).

Следует отметить, что в связи с наличием пропусков в измерениях из-за облачности на временном интервале 1960–2024 гг. анализировались средние для зимней (с декабря по февраль) значения температуры в области мезопаузы с использованием аппроксимаций для годовых временных интервалов с 1 июля предыдущего года (по 30 июня) с учетом годовой и полугодовой гармоник.

Наряду с оценками тренда температуры в области мезопаузы $dT_m(1)/dt$, $dT_m(2)/dt$ и $dT_{ms}(1)/dt$, с использованием соответствующих линейных регрессий определялись параметры чувствительности температуры в области мезопаузы к изменению приповерхностной температуры СП: dT_{ms}/dT_{NHs} , $dT_m(1)/dT_{NHs}$, $dT_m(2)/dT_{NHs}$. При этом использовались среднемесячные аномалии приповерхностной температуры для СП T_{NHs} и для Земли в целом T_{gs} относительно базового режима для периода 1961–1990 гг. (https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis_nh.txt). Значение T_{NHs} для зимы 2023–2024 гг. определялось средним значением для декабря 2023 г. и января 2024 г.

При анализе также использовался кросс-вейвлетный анализ [30], в частности анализировалась локальная когерентность температуры в области мезопаузы с приповерхностной температурой, с индексами солнечной активности (рис. 2) и индексами явлений Эль-Ниньо, в том числе индексами Niño3, Niño3.4, Niño4 (<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/>).

Проводилось сравнение с данными наблюдений результатов численных расчетов с глобальной климатической моделью для XX–XXI веков с учетом

антропогенных воздействий [22]. Рис. 3 характеризует кросс-вейвлетную когерентность зимних вариаций полушарной приповерхностной температуры T_{NHs} и температуры в области мезопаузы (на уровне 0.003 гПа) на широте $56^\circ N$ по расчетам с климатической моделью ИВМ РАН с учетом антропогенных воздействий [22].

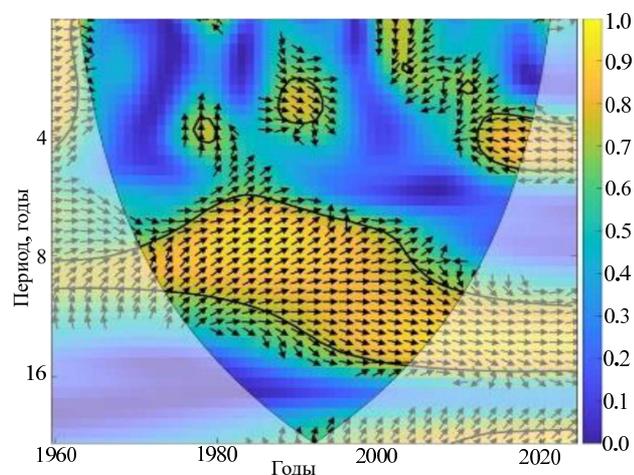


Рис. 2. Кросс-вейвлетная когерентность зимних вариаций температуры в области мезопаузы T_{ms} по данным для периода 1960–2024 гг. с индексом солнечной активности $F_{10.7}$. Сплошные линии отделяют области краевых эффектов, а жирные линии ограничивают области значимой когерентности (с когерентностью, отличной от нуля на уровне значимости $p = 0.05$). Стрелки характеризуют фазовый сдвиг: стрелки направо — синфазность, налево — противофазность

Согласно рис. 3 по модельным расчетам с учетом антропогенных воздействий с конца XX века отмечается смещение границы значимой когерентности (ограниченной жирной кривой) в сторону более короткопериодных вариаций — до периодов около 20 лет во второй половине XXI века, а к концу века до периодов менее 10 лет. Согласно модельным оценкам при продолжении приповерхностного (и тропосферного) глобального потепления с выхолаживанием стратомезосферы можно ожидать проявление значимой долгопериодной когерентности вариаций температуры на уровне мезопаузы и T_{NHs} по данным наблюдений к середине XXI века.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 представлены межгодовые вариации T_{ms} (а) для зимнего сезона (с декабря по февраль) по измерениям на ЗНС ИФА РАН в 1960–2024 гг. (точнее, с декабря 1959 г.), а также соответствующие вариации $T_m(1)$ (б) и $T_m(2)$ (в), в которых отфильтрованы вариации δT_{ms} , связанные с временными вариациями потока солнечной радиации $I_s(t)$, характеризуемого индексом $F_{10.7}$ (см. [9]). Это было сделано с помощью редукции измеренных значений температуры T_{ms} (1960–2024 гг.) к одному

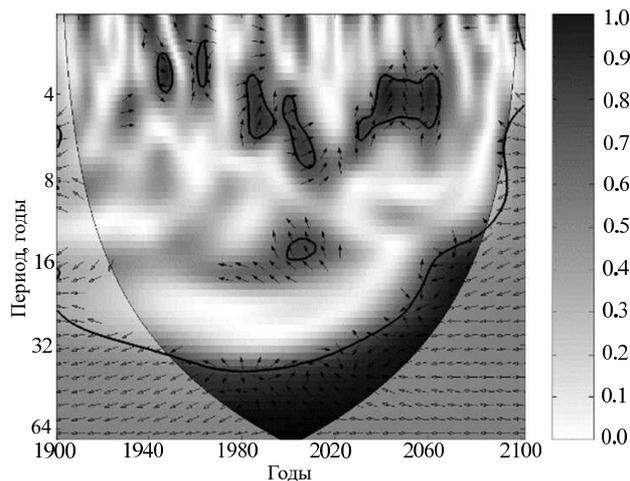


Рис. 3. Кросс-вейвлетная когерентность зимних вариаций полушарной приповерхностной температуры T_{NHs} и температуры в области мезопаузы (на уровне 0.003 гПа) на широте $56^\circ N$ по расчетам с климатической моделью с учетом антропогенных воздействий [19]. Сплошные линии отделяют области краевых эффектов, а жирные линии ограничивают области значимой когерентности (с когерентностью, отличной от нуля на уровне значимости $p = 0.05$). Стрелки характеризуют фазовый сдвиг: стрелки направо — синфазность, налево — противофазность

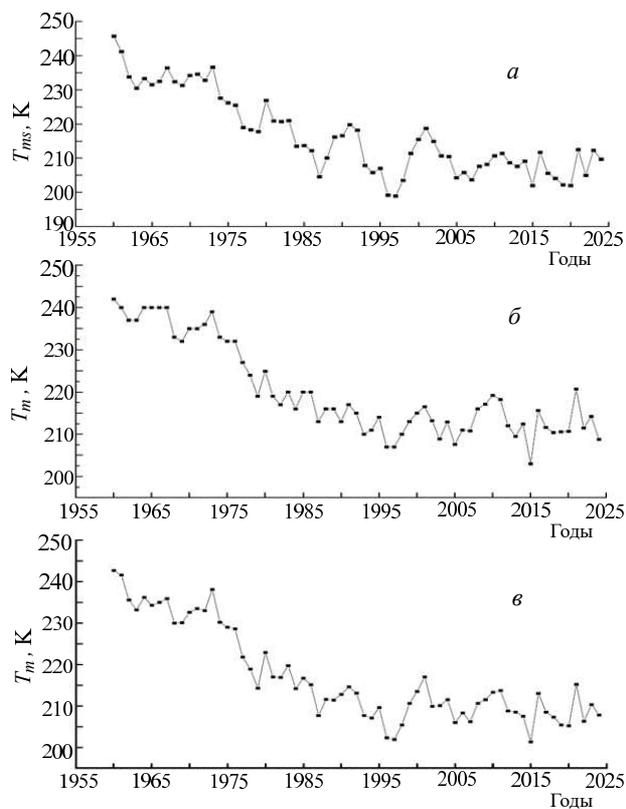


Рис. 4. Межгодовые вариации зимней температуры в области мезопаузы T_{ms} (а), $T_m(1)$ (б) и $T_m(2)$ (в) по измерениям на ЗНС ИФА РАН в 1960–2024 гг

и тому же уровню солнечной активности в соответствии с (1) и (2).

Согласно рис. 4 понижение зимней температуры на уровне мезопаузы за последние 65 лет составило около 3 десятков градусов. Средние оценки линейного тренда $dT_m(1)/dt$ и $dT_m(2)/dt$ (при $I_s = \text{const}$) для всего анализируемого периода измерений (1960–2024 гг.) около $-5 \text{ K}/(10 \text{ лет})$ со статистической значимостью более 99% (табл. 1) близки к величине соответствующего тренда dT_{ms}/dt с учетом вариаций потока солнечной радиации $I_s(t)$. Измерения на ЗНС ИФА РАН выявили для 65 зим сильную нелинейность изменений температуры в области мезопаузы — с тенденцией общего замедления уменьшения в последние десятилетия. При этом для первой половины этого временного интервала (1960–1992 гг.) получены статистически значимые тренды около $-10 \text{ K}/(10 \text{ лет})$: $dT_m(1)/dt = -9.6 \text{ K}/(10 \text{ лет})$, $dT_m(2)/dt = -9.9 \text{ K}/(10 \text{ лет})$, а также $dT_{ms}(1)/dt = -8.9 \text{ K}/(10 \text{ лет})$. Для второй половины (1992–2024 гг.) оценки тренда статистически незначимы (табл. 1). Резкое понижение температуры в области мезопаузы отмечено в 1970-х гг.

При более детальном анализе для четырех 16-летних подынтервалов статистически значимые оценки тренда получены только для первых двух подынтервалов: $dT_m(1)/dt = -4.9 \text{ K}/(10 \text{ лет})$, $dT_m(2)/dt = -5.8 \text{ K}/(10 \text{ лет})$, $dT_{ms}(1)/dt = -6.6 \text{ K}/(10 \text{ лет})$ для 1960–1976 гг. и $dT_m(1)/dt = -8.2 \text{ K}/(10 \text{ лет})$, $dT_m(2)/dt = -7.5 \text{ K}/(10 \text{ лет})$, $dT_{ms}(1)/dt = -5.2 \text{ K}/(10 \text{ лет})$ для 1976–1992 гг. (табл. 2).

Аналогично [22], наряду с трендами, проводился анализ связи изменений температуры на уровне мезопаузы с изменениями приповерхностной температуры, в частности для СП в целом — T_{NHs} по данным для временного интервала 1960–2024 гг. (рис. 5, табл. 1, 2). При этом оценивались параметры dT_{ms}/dT_{NHs} , $dT_m(1)/dT_{NHs}$, $dT_m(2)/dT_{NHs}$, характеризующие связь вариаций T_{ms} , $T_m(1)$, $T_m(2)$ с вариациями T_{NHs} с использованием соответствующих линейных регрессий. Коэффициенты линейных регрессий T_{ms} , $T_m(1)$, $T_m(2)$ на T_{NHs} можно использовать для оценки параметров чувствительности dT_{ms}/dT_{NHs} , $dT_m(1)/dT_{NHs}$, $dT_m(2)/dT_{NHs}$ изменений dT_{ms} , $T_m(1)$, $T_m(2)$ к изменениям T_{NHs} . Количественные оценки параметров взаимосвязи dT_{ms}/dT_{NHs} , $dT_m(1)/dT_{NHs}$, $dT_m(2)/dT_{NHs}$ представлены в табл. 1 для всего анализируемого временного интервала 1960–2024 гг. и для двух 32-летних подынтервалов: 1960–1992 гг. и 1992–2024 гг., а в табл. 2 — для более коротких 16-летних подынтервалов.

Согласно табл. 1 для всего анализируемого временного интервала оценки параметров связи $dT_m(1)/dT_{NHs}$, $dT_m(2)/dT_{NHs}$ и dT_{ms}/dT_{NHs} , при учете и без учета вклада вариаций потока солнечной радиации, близки — в диапазоне $-(15 \div 16)$. Это свидетельствует, что влияние изменчивости солнечной радиации значимо не сказывалось в характеристиках трендов на временах порядка 6–7 десятков лет. Соответствующие оценки для двух подынтервалов в табл. 1, а, б, в существенно различаются —

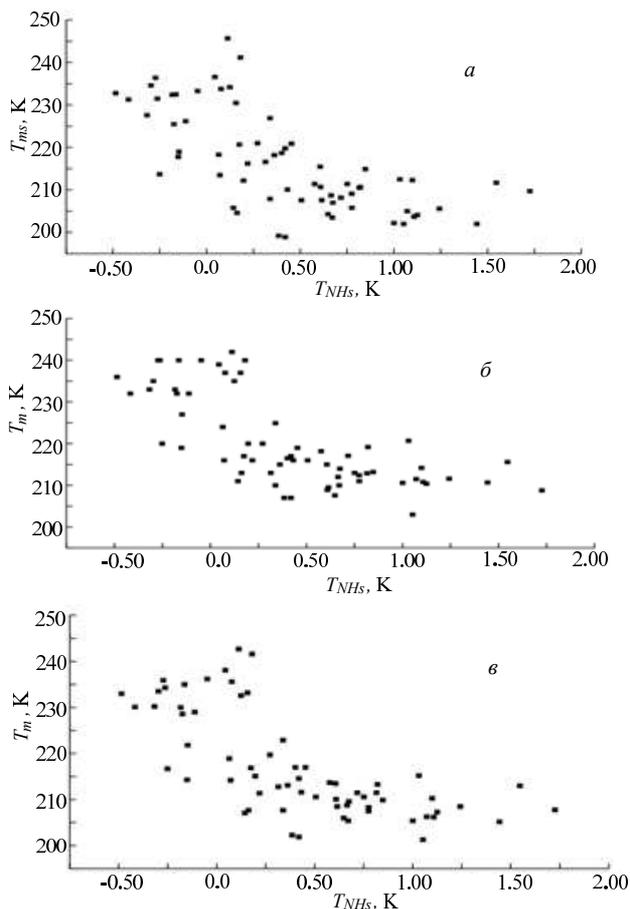


Рис. 5. Межгодовые вариации зимней температуры на уровне мезопаузы T_{ms} , $T_m(1)$, $T_m(2)$ по измерениям на ЗНС ИФА РАН в зависимости от соответствующих зимних вариаций приповерхностной температуры Северного полушария T_{NHs} в 1960–2024 гг.

они статистически значимы для первого подынтервала 1960–1992 гг. и незначимы для второго подынтервала (1992–2024 гг.). При этом оценки параметров $dT_m(1)/dT_{NHs}$ и $dT_m(2)/dT_{NHs}$ с исключением влияния солнечной активности больше по абсолютной величине, чем оценка dT_{ms}/dT_{NHs} без исключения влияния солнечной активности.

Согласно табл. 2 для более коротких временных подынтервалов, наряду с отрицательными оценками $dT_m(1)/dT_{NHs}$ и $dT_m(2)/dT_{NHs}$, в частности для подынтервала 1976–1992 гг., получены и положительные оценки $dT_m(1)/dT_{NHs}$ и $dT_m(2)/dT_{NHs}$, в частности для подынтервала 1960–1976 гг. Полученные результаты согласуются с выводами, сделанными в [22], о существенных различиях, вплоть до знака, параметров связи температурных вариаций в области мезопаузы и у поверхности на временных масштабах в несколько десятилетий и более коротких временных масштабах — от межгодовых до междесятилетних.

Качественное изменение температурного режима вблизи мезопаузы в 1970-х гг. проявляется и при анализе связи зимних вариаций T_m по 65-летним данным измерений на ЗНС ИФА РАН с соот-

Таблица 1. Оценки тренда dT_{ms}/dt , К/(10 лет) (а), $dT_m(1)/dt$, К/(10 лет) (б), $dT_m(2)/dt$, К/(10 лет) (в), а также соответствующих параметров взаимосвязи dT_{ms}/dT_{NHs} , $dT_m(1)/dT_{NHs}$, $dT_m(2)/dT_{NHs}$ для всего анализируемого временного интервала 1960–2024 гг. и для двух подынтервалов: 1960–1992 гг. и 1992–2024 гг. В скобках отмечены среднеквадратические отклонения (СКО). Наиболее статистически значимые оценки выделены

(а)

Параметр	1960–2024 гг.	1960–1992 гг.	1992–2024 гг.
dT_{ms}/dt , К/(10 лет)	–5.2(±0.4)	–8.9 ± 0.9	–0.5(±0.9)
dT_{ms}/dT_{NHs}	–15.8(±2.1)	–14.3(±6.2)	–1.3(±2.4)

(б)

Параметр	1960–2024 гг.	1960–1992 гг.	1992–2024 гг.
$dT_m(1)/dt$, К/(10 лет)	–4.8(±0.4)	–9.6(±0.6)	0.3(±0.7)
$dT_m(1)/dT_{NHs}$	–15.2(±1.9)	–21.1(±5.7)	–0.3(±1.9)

(в)

Параметр	1960–2024 гг.	1960–1992 гг.	1992–2024 гг.
$dT_m(2)/dt$, К/(10 лет)	–5.0(±0.4)	–9.9(±0.7)	–0.1(±0.7)
$dT_m(2)/dT_{NHs}$	–15.5(±2.0)	–19.1(±6.2)	–0.7(±1.9)

Таблица 2. Оценки тренда dT_{ms}/dt , К/(10 лет) (а) $dT_m(1)/dt$, К/(10 лет) (б), $dT_m(2)/dt$, К/(10 лет) (в) и соответствующих параметров взаимосвязи dT_{ms}/dT_{NHs} , $dT_m(1)/dT_{NHs}$, $dT_m(2)/dT_{NHs}$ для четырех подынтервалов: 1960–1976 гг., 1976–1992 гг., 1992–2008 гг., 2008–2024 гг. В скобках отмечены СКО. Наиболее статистически значимые оценки выделены

(а)

Параметр	1960–1976 гг.	1976–1992 гг.	1992–2008 гг.	2008–2024 гг.
dT_{ms}/dt [К/(10 лет)]	–6.6(±1.9)	–5.2(±2.5)	–0.4(±3.0)	–0.8(±1.8)
dT_{ms}/dT_{NHs}	10.4(±5.6)	0.0(±6.2)	–0.2(±6.5)	–1.3(±2.6)

(б)

Параметр	1960–1976 гг.	1976–1992 гг.	1992–2008 гг.	2008–2024 гг.
$dT_m(1)/dt$ К/(10лет)]	–4.9(±1.2)	–8.2(±1.5)	0.5(±1.6)	–2.7(±2.2)
$dT_m(1)/dT_{NHs}$	6.6(±3.9)	–11.5(±5.0)	0.6(±3.3)	–3.9(±3.1)

(в)

Параметр	1960–1976 гг.	1976–1992 гг.	1992–2008 гг.	2008–2024 гг.
$dT_m(2)/dt$ К/(10 лет)	–5.8(±1.5)	–7.5(±1.7)	0.9(±2.0)	2.0(±1.8)
$dT_m(2)/dT_{NHs}$	10.6(±4.2)	–8.3(±5.2)	0.4(±4.3)	–2.4(±2.6)

ветствующими вариациями полушарной приповерхностной температуры T_{NHs} на рис. 5. В результате резкого падения T_m в 1970-х гг. произошел переход к новым температурным условиям, характерным для последних десятилетий, начиная с 1980-х гг. При этом, как уже было отмечено в [22], существенно различаются взаимные температурные изменения в области мезопаузы и у поверхности при межгодовых и междесятилетних вариациях. Значимая для более долгопериодных вариаций отрицательная корреляция вариаций T_m и T_{NHs} не проявляется в межгодовой изменчивости. Проявление для отдельных подынтервалов положительной корреляции T_m и T_{NHs} свидетельствует о различии механизмов, влияющих на взаимосвязь температурных вариаций в верхней и нижней атмосфере с характерными масштабами порядка года и десятилетий.

Анализ функций распределения для зимних значений T_{ms} для всего анализируемого периода 1960–2024 гг. (рис. 6) свидетельствует о проявлении разных температурных режимов в области мезопаузы — до и после отмеченного температурного скачка в 1970-х гг. Ранее это было выявлено для более

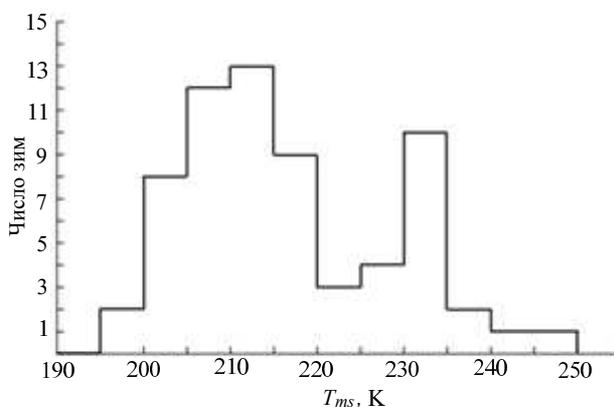


Рис. 6. Количество зим со значениями температуры в области мезопаузы T_{ms} в разных диапазонах по данным для всего периода измерений на ЗНС ИФА РАН (1960–2024 гг.)

узы — до и после отмеченного температурного скачка в 1970-х гг. Ранее это было выявлено для более

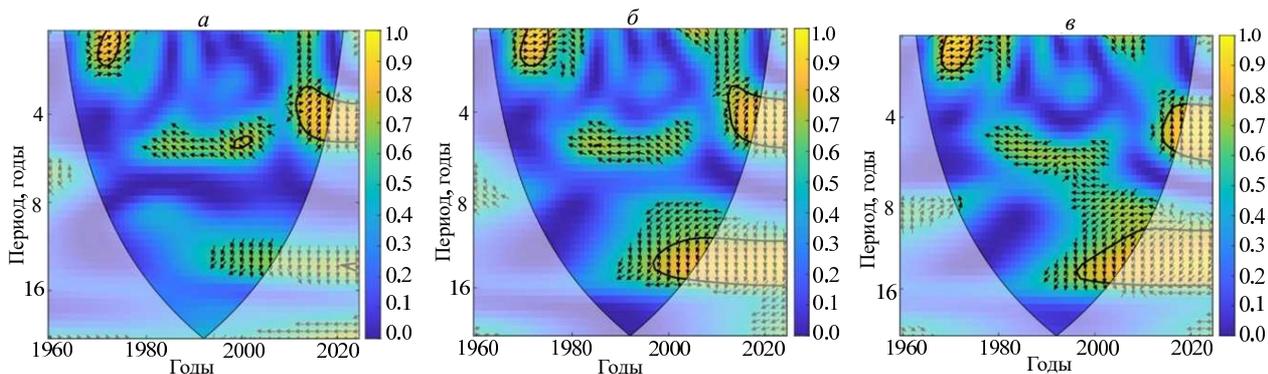


Рис. 7. Кросс-вейвлетная когерентность зимних вариаций температуры в области мезопаузы T_{ms} по данным для периода 1960–2024 гг. с индексами: *a* — Niño3, *б* — Niño3.4, *в* — Niño4. Сплошные линии отделяют области краевых эффектов, а жирные линии ограничивают области значимой когерентности (с когерентностью, отличной от нуля на уровне значимости $p = 0.05$). Стрелки характеризуют фазовый сдвиг: стрелки направо — синфазность, налево — противофазность

короткого временного интервала 1960–2015 гг. [19]. Функция распределения для зимних значений T_{ms} для всего анализируемого периода 1960–2024 гг. характеризуется двумя максимумами: в диапазонах 230–235 К и 210–215 К, с минимумом между ними в диапазоне 220–225 К (рис. 6). Минимуму функции распределения соответствуют годы скачка температуры в 1970-х гг. Максимум со средним значением T_{ms} в диапазоне 230–235 К соответствует первому временному подынтервалу. Максимум в диапазоне 210–215 К характеризует T_{ms} после температурного скачка в 1970-х гг. и перехода к новому режиму.

В [14, 19] отмечена синхронность отмеченного скачка температурного режима в области мезопаузы по измерениям на ЗНС ИФА РАН с широко известным климатическим сдвигом в 1970-х гг., отмеченным в разных приповерхностных климатических особенностях, в том числе в усилении Алеутского циклонического центра действия атмосферы (см., напр. [22]). Климатический сдвиг 1976–1977 гг. в Тихоокеанском секторе связывается с качественными изменениями в процессах формирования явлений Эль-Ниньо [31–33]. В частности, в [31] отмечено проявление более частых событий Эль-Ниньо и более редких событий Ла-Нинья со второй половины 1970-х гг. Отмечена также более значимая в конце XX века связь с явлениями Эль-Ниньо характеристик зимних северо-тихоокеанских центров действия атмосферы, Алеутского минимума и Гавайского максимума [34] (см. также [35, 36]). В [37] отмечены существенные изменения частоты различных межфазовых переходов для явлений Эль-Ниньо (с периодичностью от 2 до 8 лет), с которыми связаны сильнейшие межгодовые вариации глобальной приповерхностной температуры на фоне более долгопериодных (с периодом в несколько десятилетий) вариаций и в целом положительного векового тренда глобальной приповерхностной температуры. В [38, 39] отмечена тенденция интенсификации и учащения явлений Эль-Ниньо при глобальном потеплении.

Рис. 7 характеризует кросс-вейвлетную когерентность зимних вариаций температуры в области мезопаузы T_{ms} по данным для временного интервала 1960–2024 гг. с индексами Эль-Ниньо: (*a*) Niño3, (*б*) Niño3.4, (*в*) Niño4. Согласно рис. 7 в последние десятилетия связь зимних вариаций температуры в области мезопаузы с индексами Эль-Ниньо проявляется более значимо для междесятилетних и более короткопериодных вариаций.

Что касается долгопериодных тенденций, то при более детальном кросс-вейвлетном анализе в [22] по данным измерений на ЗНС ИФА РАН для периода 1960–2015 гг. не было выявлено значимой когерентности наиболее долгопериодных вариаций T_{ms} и T_m с T_{NHs} . При этом было отмечено, что, хотя ряд данных для вариаций T_{ms} и T_m по измерениям на ЗНС ИФА РАН и самый длинный в мире (с 1959 г.), его продолжительность пока позволяет детектировать когерентность вариаций T_{ms} и T_m с T_{NHs} только с характерными временами менее двух десятилетий.

Рис. 8, *a*, характеризующий кросс-вейвлетную когерентность зимних вариаций температуры в области мезопаузы T_{ms} с вариациями полусферной приповерхностной температуры T_{NHs} по 65-летним данным для 1960–2024 гг., уже выявляет значимую когерентность их долгопериодных (более двух десятилетий) вариаций. При этом корреляция долгопериодных вариаций отрицательная. Для сравнения на рис. 8, *б* представлены результаты аналогичного анализа по 56-летним данным (1960–2015 гг.), как в [22], без проявления значимой когерентности долгопериодных вариаций T_{ms} и T_{NHs} .

Рис. 9 характеризует кросс-вейвлетную когерентность с вариациями полусферной приповерхностной температуры T_{NHs} температуры в области мезопаузы $T_m(1)$ (*a*) и $T_m(2)$ (*б*) по зимним данным для временного интервала 1960–2024 гг. Результаты анализа связи $T_m(1)$ и T_{NHs} свидетельствуют о более значимой когерентности их долгопериодных вариаций в последние годы, чем для T_{ms} и T_{NHs} . По-

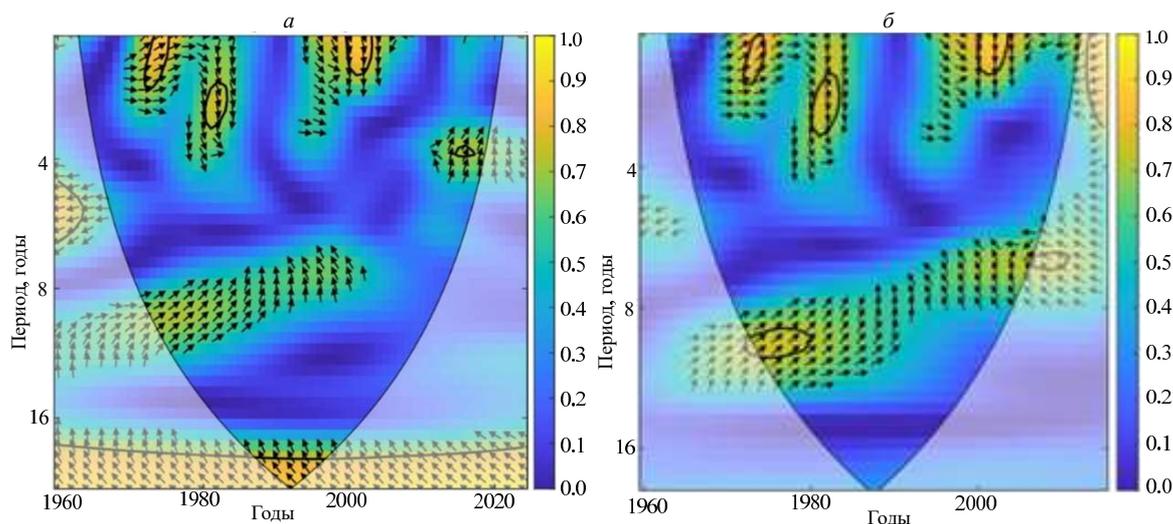


Рис. 8. Кросс-вейвлетная когерентность зимних вариаций температуры в области мезопаузы T_{ms} с вариациями полушарной приповерхностной температуры T_{NS} по данным для периода 1960–2024 гг. (а) и 1960–2015 гг. (б). Сплошные линии отделяют области краевых эффектов, а жирные линии ограничивают области значимой когерентности (с когерентностью, отличной от нуля на уровне значимости $p = 0.05$). Стрелки характеризуют фазовый сдвиг: стрелки направо — синфазность, налево — противофазность

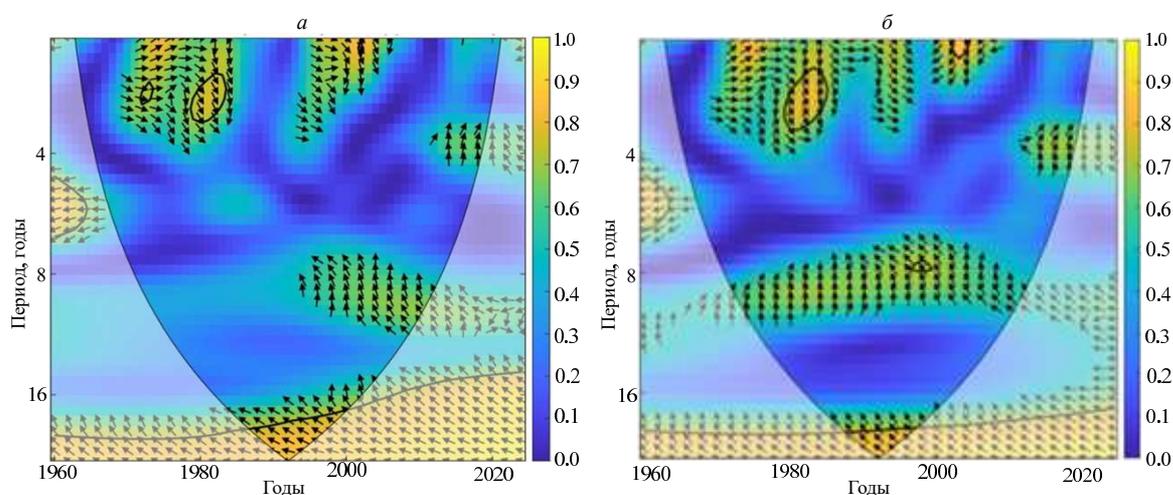


Рис. 9. Кросс-вейвлетная когерентность с вариациями полушарной приповерхностной температуры T_{NS} температуры в области мезопаузы $T_m(1)$ (а) и $T_m(2)$ (б) по зимним данным для периода 1960–2024 гг. Сплошные линии отделяют области краевых эффектов, а жирные линии ограничивают области значимой когерентности (с когерентностью, отличной от нуля на уровне значимости $p = 0.05$). Стрелки характеризуют фазовый сдвиг: стрелки направо — синфазность, налево — противофазность

лученные результаты подтверждают наличие значимой отрицательной корреляции долгопериодных вариаций температуры в области мезопаузы с вариациями приповерхностной температуры, что ожидалось в соответствии с модельными прогностическими расчетами [22].

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты измерений с конца 1950-х гг. на ЗНС ИФА РАН свидетельствуют, что на фоне общего увеличения глобальной приповерхностной температуры значительно понизилась температура на

уровне мезопаузы, в частности зимой, с резким температурным сдвигом в 1970-х гг. и ослаблением скорости охлаждения в последние десятилетия. В рамках современной мировой системы NDMC регулярные измерения температуры в области мезопаузы на других станциях стали проводиться с 1980-х годов — уже после отмеченных резких температурных изменений в области мезопаузы в 1970-х гг. по измерениям на ЗНС ИФА РАН.

Сравнение данных, полученных на ЗНС РАН, с доступными данными измерений на других станциях мировой системы NDMC свидетельствует об общей согласованности данных для температуры в области мезопаузы и ее тренда в течение послед-

них десятилетий (см., напр., [12, 13, 20]). Специальные сравнения в 2015 г. значений температуры в области мезопаузы по измерениям на ЗНС ИФА РАН с полученными на основе лидарных измерений профилей температуры в московском регионе выявили их хорошее соответствие [28].

По данным измерений на ЗНС ИФА РАН отмечена синхронность резкого понижения температуры в области мезопаузы в 1970-х гг. с широко известным климатическим сдвигом 1970-х гг. [17, 22], выявленным ранее в разных климатических особенностях у поверхности. Отмеченный климатический сдвиг с переходом к новому режиму связывается с изменениями в процессах формирования явлений Эль-Ниньо. Результаты кросс-вейвлетного анализа с использованием результатов измерений на ЗНС ИФА РАН для временного интервала 1960–2024 гг. свидетельствуют о проявлении более значимой связи температурных вариаций в области мезопаузы с индексами Эль-Ниньо в последние десятилетия.

Целесообразно также провести анализ влияния на изменчивость температуры в мезосфере и в области мезопаузы внезапных стратосферных потеплений.

При кросс-вейвлетном анализе данных для временного интервала 1960–2024 гг. выявлена значимая когерентность наиболее долгопериодных температурных вариаций температуры в области мезопаузы с полушарной приповерхностной температурой. Ранее подобная связь не была отмечена в [22] по соответствующим данным для более короткого временного интервала. При этом она была выявлена по более долгопериодным расчетам с климатической моделью общей циркуляции для XX–XXI веков и было сделано предположение, что для выявления соответствующей значимой когерентности многолетних противофазных вариаций на уровне мезопаузы и у поверхности по данным наблюдений необходимы более длительные измерения.

Отмеченные особенности изменений температуры в области мезопаузы на фоне изменений приповерхностной температуры — важный индикатор для количественной оценки сравнительной роли естественных и антропогенных факторов в формировании современных изменений климата.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 24-17-00211.

- [1] Roble R.G., Dickinson R.E. // *Geophys. Res. Lett.* **16**. 1441 (1989).
- [2] Golitsyn G.S., Semenov A.I., Shefov N.N. et al. // *Geophys. Res. Lett.* **23**. 1741 (1996).
- [3] Мохов И.И., Елусеев А.В. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* **33**, № 4. 452 (1997).
- [4] Dunkerton T., Delisi D., Baldwin M. // *Geophys. Res. Lett.* **25**. 3371. (1998).
- [5] Семенов А.И., Шефов Н.Н., Гившивили Г.В. и др. // *Доклады РАН.* **374**. № 6. 816 (2000).
- [6] Semenov A.I., Shefov N.N., Lysenko E.N. et al. // *Phys. Chem. Earth.* **27**. 529 (2002).
- [7] Beig G., Keckhut P., Lowe R.P. et al. // *Rev. Geophys.* **41**. № 4. 1015 (2003).
- [8] Brasseur G.P., Solomon S. *Aeronomy of the middle atmosphere.* New York: Springer, 2005. 646 p.
- [9] Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. *Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики.* М.: ГЕОС, 2006.
- [10] *Climate Change 2007: Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007.*
- [11] Варгин П.Н., Юшков В.А., Хайкин С.М. и др. // *Вестник РАН.* № 2. 114 (2010).
- [12] Beig G. // *J. Geophys. Res.* **116**, A00H11 (2011).
- [13] Beig G. // *J. Geophys. Res.* **116**, A00H12 (2011).
- [14] Qian L., Lastovicka J., Roble R.G. et al. // *J. Geophys. Res.* **116**. A00H03 (2011).
- [15] Bindoff N.L., Stott P.A., AchutaRao K.M. et al. / In: *Climate Change 2013: Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 2013. P. 867.*
- [16] Lübken F.-J., Berger U., Baumgarten U. // *J. Geophys. Res. Atmos.* **118**. 13347. (2013).
- [17] Мохов И.И., Семенов А.И. // *Доклады РАН.* **456**, № 5. 596 (2014).
- [18] Laštovička J., Beig G., Marsh D.R. // *Progr. Earth Planet. Sci.* **1**(21). 1 (2014). <http://www.progearthplanetosci.com/content/1/1/21>
- [19] Perminov V.I., Semenov A.I., Medvedeva I.V., Zhelezny Yu.A. // *Adv.Space Res.* **54**. 2511 (2014).
- [20] She C.-Y., Krueger D.A., Yuan T. // *Ann. Geophys.* **33**. 363 (2015).
- [21] Kalicinsky C. et al. // *Atmos. Chem. Phys.* **16**. 15033 (2016).
- [22] Мохов И.И., Семенов А.И., Володин Е.М., Дембицкая М.А. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* **53**. № 4. 435 (2017).
- [23] Baldwin M.P. and coauthors // *Meteor. Monogr.*, **59**, N 27. 1 (2019).
- [24] Garcia R.R., Yue J., Russell J.M. // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* **124**(10). 7984.(2019).
- [25] Laštovička J. // *Atmos. Chem. Phys.* **23**. 5783 (2023).
- [26] Santer B.D. et al. // *Science.* **301**. 479 (2003).
- [27] *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата.* М.: Росгидромет, 2008.
- [28] Ivanov M.S., Mokhov I.I., Semenov A.I., Sumarokov V.V. // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling.* E. Astakhova (ed.). WCRP Rep. No. 12/2017. S. 2. 13 (2017).
- [29] Dalin P., Perminov V., Pertsev N., Romejko V. // *J. Geophys. Res.* **125**. e2019JD030814 (2020).
- [30] Jevrejeva S., Moore J.C., Grinsted A. // *J. Geophys. Res.* **108**. D21. 4677 (2003).

- [31] *Trenberth K.E., Hoar T.J.* // *Geophys. Res. Lett.* **24**, N 23. 3057 (1997).
- [32] *Zhang Y., Wallace J.M., Battisti D.S.* // *J. Climate.* **10**, N 5. 1004 (1997).
- [33] *Meehl G.A., Hu A., Santer B.D.* // *J. Climate.* **22**. 780 (2009).
- [34] *Мохов И.И., Хон В.Ч.* // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* **41**, № 6. 723 (2005).
- [35] *Мохов И.И., Чернокульский А.В., Осипов А.М.* // *Метеорология и гидрология.* № 11. 5 (2020).
- [36] *Интенсивные атмосферные вихри и их динамика.* Под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чехтиани. М.: ГЕОС, 2018.
- [37] *Мохов И.И.* // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* **58**, № 1. 3 (2022).
- [38] *Мохов И.И., Елисеев А.В., Хворостьянов Д.В.* // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана.* **36**, № 6. 741 (2000).
- [39] *Mokhov I.I., Khvorostyanov D.V., Eliseev A.V.* // *Intern. J. Climatol.* **24**. 401 (2004).

Temperature changes in the mesopause region under climate changes in recent decades (1960–2024)

I.I. Mokhov^{1,2,a}, V.I. Perminov², I.A. Fomina¹

¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

²*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS. Moscow 119017, Russia*

E-mail: ^amokhov_ii@physics.msu.ru

The results of an analysis of temperature variations in the mesopause region based on long-term measurements of hydroxyl airglow at the Zvenigorod Scientific Station of the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS (ZSS IAP RAS) in 1960–2024 in comparison with variations of surface temperature characterizing global-scale climate changes are presented. Along with temperature variations in the mesopause region, two versions of temperature variations in the mesopause region, normalized to the same level of solar activity, were analyzed. Quantitative estimates of a strong decrease of temperature in the mesopause region over the past decades in winter against the background of a global increase of surface temperature have been obtained. It was noted that significant coherence of long-term variations of the mesopause region temperature with the surface temperature in the Northern Hemisphere with the use of cross-wavelet analysis, which was not previously evident in data for a shorter time interval. The possibility of such coherence was predicted in (Mokhov et al., 2017) under the continuation of global warming based on the results of model simulations for the 20th–21st centuries, taking into account anthropogenic forcing. It was not previously manifested from observational data for a shorter time interval. Along with long-term trends, features of a sharp decrease of temperature in the mesopause region for the 1970s with its synchronicity with the known shift in surface climate regimes associated with El Niño events were analyzed. The results of cross-wavelet analysis using data obtained at the ZSS IAP RAS for the time interval 1960–2024 indicate a more significant connection between temperature variations in the mesopause region and El Niño indices in recent decades.

PACS: 92.00.00

Keywords: climate change, temperature, mesopause, nonlinearity, climate shift, El Niño events, modeling.

Received 17 May 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2024. **79**, No. 5. Pp. .

Сведения об авторах

1. Мохов Игорь Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, академик РАН, зав. кафедрой физики атмосферы физического факультета МГУ, научный руководитель ИФА им. А.М. Обухова РАН; тел.: (495) 939-38-06, (495) 951-55-65, e-mail: mokhov_ii@physics.msu.ru, mokhov@ifaran.ru.
2. Перминов Владимир Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: v.i.perminov@yandex.ru.
3. Фомина Ирина Андреевна — студент, e-mail: fomina.ia22@physics.msu.ru.