

---

**СОВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО  
РЕЖИМА ТРОПОСФЕРЫ  
В СИБИРСКОМ СЕКТОРЕ В РАЗЛИЧНЫЕ ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ ПЕРИОДЫ**  
**CURRENT STATUS OF THE TEMPERATURE AND HUMIDITY REGIME  
OF THE TROPOSPHERE  
IN THE SIBERIAN SECTOR IN DIFFERENT CIRCULATION PERIODS**

---

**Е.П. Белоусова**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, elenapbel@iszf.irk.ru  
Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия*

**И.В. Латышева** 

*Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия, ababab1967@mail.ru*

**К.А. Лощенко**

*Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия, loshchenko@bk.ru*

**С.В. Олемской**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, olemskoy@mail.ru*

**E.P. Belousova**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, elenapbel@iszf.irk.ru  
Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russia*

**I.V. Latysheva**

*Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russia, ababab1967@mail.ru*

**K.A. Loshchenko**

*Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russia, loshchenko@bk.ru*

**S.V. Olemskoy**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, olemskoy@mail.ru*

---

**Аннотация.** В работе выполнено исследование многолетней динамики индексов аномальности температуры и относительной влажности воздуха в приземном слое и на разных уровнях тропосферы в Сибирском секторе и соседних с ним регионах (Европейский и Дальневосточный секторы). В качестве основной причины наблюдаемых вариаций климатических параметров рассмотрены циркуляционные факторы, которые учитывались с использованием типизации макроциркуляционных процессов, предложенной Б.Л. Дзерdzeевским. Выявлены сезонные различия в распределении индексов аномальности и площади, занятой аномалиями разных знаков среднегодовых и среднемесячных значений температуры и относительной влажности воздуха, которые наиболее ярко проявляются в циркуляционные периоды увеличения продолжительности меридиональных северных процессов в Сибирском секторе и Северном полушарии в целом. Наибольшие скорости изменения температурного режима в Сибирском секторе в последние десятилетия отмечаются на уровне изобарической поверхности АТ–700 гПа (3 км), который оказывает влияние на адвективно-динамические факторы приземного цикло- и фронтогенеза, а также на процессы формирования облачности и выпадения атмосферных осадков. В целом повышение теплосодержания нижней и средней тропосферы и уменьшение относительного влагосодержания вблизи тропопаузы могут сопровождаться увеличением запасов потенциальной энергии и энергии конвективной неустойчивости и привести к росту климатических рисков в Сибирском секторе.

**Ключевые слова:** температура, относительная влажность, климат, циркуляционная эпоха, типизация, аномалии.

---

**Abstract.** The paper studies the long-term dynamics of air temperature and relative humidity anomaly indices in the surface layer and at different levels of the troposphere in Siberia and neighboring regions (European and Far Eastern sectors). As the main cause of the observed variations in climatic parameters we considered circulation factors, which were taken into account using the typification of macrocirculation processes proposed by B.L. Dzerdzeevsky. Seasonal differences were revealed in the distribution of anomaly indices and the area occupied by anomalies of different signs of annual and monthly mean temperature and relative air humidity, which are most pronounced during circulation periods of increased duration of meridional northern processes in the Siberian sector and in the Northern Hemisphere as a whole. The highest rates of change in the temperature regime in the Siberian sector over recent decades have been observed at the level of the isobaric surface AT–700 hPa (3 km), which affects the advective-dynamic factors of surface cyclo- and frontogenesis, as well as the processes of cloud formation and precipitation. In general, an increase in the heat content of the lower and middle troposphere and a decrease in the relative moisture content near the tropopause can be accompanied by an increase in the amount of the potential energy and convective instability energy reserves and can lead to an increase in climate risks in the Siberian sector.

**Keywords:** temperature, relative humidity, climate, circulation epoch, typification, anomalies.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент существует большой риск недооценки всех факторов влияния разнообразных космических и геологических процессов на глобальное изменение климата Земли [Logenz, 1967; Котляков, 2019]. Основные механизмы климатических изменений в атмосфере связаны с вариациями потоков приходящей солнечной радиации, космических лучей, вулканической деятельностью, парниковыми газами, внутренней изменчивостью климатических параметров, океанической деятельностью, геодинамикой земной коры, конвекцией вещества в мантии Земли и др. Среди указанных механизмов солнечная активность является основным природным фактором, управляющим изменениями климата. Антропогенный фактор обуславливает парниковый эффект и связан в основном с ростом в атмосфере концентрации углекислого газа и других малых газовых составляющих, включая содержание водяного пара.

Межгодовые и десятилетние температурные вариации часто связывают с естественными климатическими изменениями, в том числе с ключевыми модами климатической изменчивости, включая квазициклические процессы типа Эль-Ниньо/Южного колебания (El-Niño/Southern Oscillation — ENSO), Атлантической мультидесятилетней осцилляции (Atlantic Multidecadal Oscillation — AMO), Тихоокеанской десятилетней осцилляции (Pacific Decadal Oscillation — PDO), Тихоокеанской междесятилетней осцилляции (Interdecadal Pacific Oscillation — IPO), Антарктической осцилляции (Antarctic Oscillation — AAO) и др. [Мохов, Смирнов, 2022]. Возрастание темпов изменений климата с начала 1970-х гг. происходит на фоне существенного роста вклада Североатлантического колебания (NAO), с которым связано усиление зонального переноса над значительной частью территории России, вплоть до бассейна Енисея. Отмечается, что с середины 1990-х гг., со сдвигом центра приполярной депрессии на север Скандинавского полуострова, активизацией арктических вторжений и увеличением повторяемости атмосферных процессов меридиональных типов, резко возрастает влияние скандинавского антициклона (Scand) (в положительной фазе) [Zhang et al., 2008]. Рост повторяемости арктических вторжений и холодных зим на севере Евразии в этот период, известный как пауза в потеплении, следует расценивать как следствие этого явления и, возможно, как его индикатор [Попова и др., 2018]. Общему ослаблению зонального переноса во внетропической зоне Северного полушария также может способствовать перераспределение аномалий температуры поверхности Тихого океана, которому в ряде исследований отводится роль сдерживающего фактора потепления [Trenberth, Fasullo, 2013]. В работе [Крымская и др., 2017] на основе анализа океанических параметров и термодинамических характеристик атмосферы выявлено влияние на атмосферные процессы над территорией Кыргызстана нестационарных процессов в океане, связанных с явлениями Эль-Ниньо и Ла-

Нинья. Из полученных результатов можно заключить, что в последние 10–15 лет идет медленный процесс похолодания.

Повышение глобальной приповерхностной температуры сопровождается быстрым ростом числа гидрометеорологических аномалий, что увеличивает риск экстремальных региональных событий, а также указывает на возможное развитие новых циркуляционных механизмов при достижении климатическими изменениями определенного уровня [Мохов, 2022]. По данным Росгидромета, только на территории России в 2020 г. было зарегистрировано 1000 опасных гидрометеорологических явлений, 372 из которых со значительным ущербом для экономики и населения [Доклад об особенностях климата..., 2021]. Рост числа опасных гидрометеорологических явлений тесно коррелирует с высокой скоростью потепления в среднем по России, которая значительно превосходит глобальные усредненные значения и составляет для периода 1976–2020 гг. 0.51 °C за десятилетие.

Региональные климатические изменения на территории России, в отличие от глобальных, характеризуются большей пространственно-временной неоднородностью, атмосферных процессов региональных типов, проявляющейся на фоне неоднородного рельефа и многолетней динамики океанических и континентальных центров действия атмосферы. В целом в высоких широтах увеличение приземной температуры воздуха протекает быстрее, чем в умеренных. Однако в пределах одной широтной зоны этот процесс по-разному выражен при продвижении с запада на восток. Еще более сложная структура отмечается в распределении параметров облачности, количества и интенсивности атмосферных осадков, характеристик влажности воздуха и ветра.

Изменения циркуляционного режима проявляются в повышении приземных температур воздуха, сопровождающемся увеличением абсолютного влагосодержания тропосферы и, соответственно, изменением количества атмосферных осадков, отражающимся на многолетнем режиме речного стока в различных регионах России [Гармаев и др., 2022]. В ряде регионов на фоне глобального потепления в последние десятилетия отмечается тенденция к понижению средних температур воздуха. По данным эмпирической модели регионального изменения температурного режима нижней атмосферы выявлено похолодание в приземном слое атмосферы на территории Центральной Азии, обусловленное в первую очередь влиянием солнечной активности [Каримов и др., 2020]. На территории Республики Беларусь среди естественных факторов современных тенденций изменений климата рассматривают проявление квазишестидесятилетнего колебания, согласующееся с динамикой Атлантического мультидекадного квазишестидесятилетнего колебания (AMO). Предполагают, что в последующие годы на нисходящей ветви AMO (2023–2043 гг.) может наступить понижение средней температуры воздуха в теплое время года по сравнению с предыдущим десятилетием [Логинов, 2022].

Учитывая разнонаправленные тенденции изменений климата, важно более детально исследовать температурно-влажностные характеристики атмосферы, которые определяют формирование условий увлажнения, процессов облако- и осадкообразования в различных регионах земного шара. Годовые и суточные вариации температуры и относительной влажности воздуха, в свою очередь, существенно зависят от природно-климатических факторов. В частности, в зимние периоды 1966–2019 гг. наибольшие положительные статистически значимые тренды аномалий относительной влажности воздуха отмечены на всей европейской территории России, где коэффициенты линейного тренда, значимые при заданном 5%-м уровне, достигают до 0.4–0.5 % за 10 лет; чуть меньше тренды на азиатской территории России — до 0.4 % за 10 лет [Кузнецова, Швець, 2020]. Весной над большей частью территории России происходит уменьшение относительной влажности воздуха. Летом и осенью в регионах, где преобладают тундра и хвойные леса, наблюдается увеличение относительной влажности воздуха, а в лесостепных, степных и в муссонных районах — ее уменьшение, но тренды в основном статистически незначимые [Кузнецова, Швець, 2020].

Таким образом, наблюдаемые с середины XX в. изменения климата внетропических широт Северного полушария, включая территорию России, наряду с антропогенным влиянием, тесно коррелируют с вариациями крупномасштабных форм атмосферной циркуляции [Попова и др., 2018a]. Изменения интенсивности и форм атмосферной циркуляции определяют тепло- и влагосодержание различных слоев тропосферы, на которые, в свою очередь, накладывается влияние рельефа, что указывает на актуальность и практическую значимость исследований пространственно-временной динамики температурно-влажностных характеристик на разных уровнях атмосферы Земли.

Целью данной работы является статистический анализ пространственно-временных неоднородностей в распределении таких климатических показателей, как температура и влажность воздуха на разных уровнях тропосферы в Сибирском секторе. Были сформулированы следующие задачи: рассчитать среднемесячные и среднегодовые значения индексов аномальности метеорологических полей температуры и относительной влажности воздуха на разных уровнях тропосферы по критерию, предложенному Багровым Н.А. [Багров, Мякишева, 1966]; проанализировать современные особенности температурно-влажностного режима во взаимосвязи с циркуляционными факторами. Для оценки пространственной структуры температурных аномалий были получены карты месячных аномалий приземной температуры воздуха  $\Delta T_A \geq \pm 6$  °C для временных периодов 2010–2015 и 2015–2020 гг. Для более достоверной оценки вклада глобальных и региональных факторов в изменения климата сравнивались температурно-влажностные характеристики, полученные для Сибирского сектора и соседних регионов — Европейского и Дальневосточного.

## 1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время для оценки циркуляционных факторов изменений климата в России широко ис-

пользуется типизация макромасштабных атмосферных процессов, разработанная Дзердзеевским Б.Л. и дополненная Н.К. Кононовой, согласно которой элементарный циркуляционный механизм, действуя как единый целостный механизм макроциркуляционного обмена, по-разному проявляется в тех или иных районах Северного полушария [Дзердзеевский, Монин, 1954]. Данная типизация через траектории смещения подвижных барических образований (циклонов и антициклонов) отражает основные пути переноса тепла и влаги, что позволяет более детально анализировать причины региональных изменений климата. Все типы атмосферных процессов над внетропическими широтами Северного полушария были объединены в четыре группы. В первую группу вошли зональные типы атмосферной циркуляции, во вторую группу — процессы с одним арктическим вторжением, в третью группу — с двумя и более арктическими вторжениями, а четвертая группа объединила процессы, при которых циклоническая деятельность охватывает Арктику. Средняя продолжительность циркуляционных процессов рассмотренных типов составляет от 3.6 до 5.3 сут.

Согласно типизации Дзердзеевского Б.Л., за период с 1899 г. по настоящее время сменилось три циркуляционные эпохи: две меридиональные (с 1899 по 1915 г. и с 1957 г. по настоящее время) и одна зональная (1916–1956 гг.). В нашей работе рассматриваются эпохи зональной циркуляции (1948–1956 гг. (I)) и меридиональной южной циркуляции. Эпоха южной меридиональной циркуляции включает четыре временных периода (см. рис. 1 и 2): одновременного увеличения продолжительности меридиональных северных и южных процессов (1957–1969 гг. (II)); повышенной продолжительности зональных процессов (1970–1980 гг. (III)); быстрого роста продолжительности меридиональных южных процессов (1981–1998 гг. (IV)); уменьшения продолжительности меридиональных южных процессов и роста продолжительности меридиональных северных процессов (1999–2020 гг. (V)).

Для исследования был выбран Сибирский сектор (60°–119° E) в интервале широт от 30° до 90° N. Для оценки пространственного масштаба выявленных температурно-влажностных аномалий дополнительно проведены расчеты по соседним секторам — Европейскому (0°–59° E) и Дальневосточному (120°–169° E). Расчеты выполнены на основе среднесуточных данных по температуре и относительной влажности воздуха у поверхности земли и на уровнях изобарических поверхностей АТ-850 гПа (1.5 км), АТ-700 гПа (3 км), АТ-500 гПа (5 км), АТ-300 гПа (9 км) Национального управления по исследованию океана и атмосферы США (NOAA) за период с 1948 по 2020 г.

В климатических исследованиях в качестве показателя аномальности широко используются отклонения метеорологических величин от многолетних средних значений либо их отношение к среднему среднеквадратичному отклонению  $\sigma$  [Груза, Ранькова, 2012]. Для количественной оценки аномальности метеорологических полей температуры и относительной влажности воздуха на разных уровнях тропосферы нами был выбран критерий, предложенный Н.А. Багровым [Багров, Мякишева, 1966]:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{\sigma_n^2}, \quad (1)$$

где  $A_n$  — аномалия в точке  $n$  ( $n=1, 2, 3, \dots, N$ );  $\sigma_n$  — ее среднеквадратичное отклонение. При этом считается, что на данной территории точки образуют достаточно равномерную сеть и аномалия в точке  $n$  имеет распределение, близкое к нормальному.

Индекс  $K$  представляет собой безразмерное среднее нормированное значение аномалии, характеризующее интенсивность очагов аномалий разных знаков на рассматриваемой территории. Нормирование, т. е. вычисление отношения месячной аномалии температуры и относительной влажности воздуха  $A_n$  к ее среднеквадратичному отклонению  $\sigma_n$ , дает возможность исключить влияние сезонности и географической широты на рассматриваемые величины.

Преимуществом данного параметра является то, что, зная распределение величины аномальности для определенного месяца (года), можно принять для него некоторые пороговые значения  $K$ , которые будут являться границами степени аномальности. В качестве порогового значения можно принять среднее значение индекса  $K$  за весь расчетный период, равное единице, когда на рассматриваемой территории в каждом узле сетки абсолютное значение аномалии равно среднеквадратичному отклонению ( $A_n = \sigma_n$ ,  $n=1, 2, 3, \dots, N$ ). Таким образом, для значений индекса  $K$ , не превышающих единицы, аномалии температуры и относительной влажности воздуха находятся в пределах стандартного отклонения, т. е. естественной изменчивости.

Для определения площади, которую могут занимать аномалии того или иного знака, был введен параметр  $P$  [Багров, Мякишева, 1966]:

$$P = \frac{n_+ - n_-}{n_+ + n_-}, \quad (2)$$

где  $n_+$  — число точек с положительной аномалией;  $n_-$  — число точек с отрицательной аномалией на рассматриваемой территории.

Величина  $P$  указывает не только на знак, преобладающий в аномалиях, но и на относительную величину площади, занятой этой аномалией (см. таблицу). Как правило, чем глубже очаг аномалии, тем большую площадь занимает аномалия одного знака. В этом случае значение величины аномальности  $K$  большое и  $P \rightarrow 1$ . Если аномалия положительная,  $P \rightarrow +1$ , если отрицательная,  $P \rightarrow -1$ . Если имеется несколько очагов разных знаков, значение индекса  $P$  колеблется около 0. В этом случае при большой величине индекса  $K$  на территории располагаются крупные по интенсивности очаги аномалии, если же значение  $K$  небольшое, наблюдается слабое (размытое) по интенсивности поле аномалий разных знаков. Далее мы называем  $K$  и  $P$  индексами аномальности.

## 2. МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ИНДЕКСОВ АНОМАЛЬНОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Рассмотрим графики индексов  $K$  и  $P$  аномальности среднегодовых значений температуры воздуха,

рассчитанных за 1948–2020 гг. и усредненных за различные циркуляционные эпохи и их периоды: 1948–1956 гг. (I), 1957–1969 гг. (II), 1970–1980 гг. (III), 1981–1998 гг. (IV), 1999–2020 гг. (V). В изменениях индексов аномальности среднегодовых значений приземной температуры воздуха отчетливо выделяется два аномальных периода (рис. 1, а). Это холодный период 1957–1969 гг., когда значительная часть (70–80 %) территории Европы и Сибири была занята отрицательными аномалиями средних температур воздуха при  $K \geq 2$ , и аномально теплый период с 1999 г. по настоящее время, когда практически на всей территории Евразии отмечаются положительные аномалии среднегодовых температур при  $K \geq 3$ . На уровне изобарической поверхности АТ–850 гПа (1.5 км), который близок к верхней границе пограничного слоя, характер изменений индексов  $K$  и  $P$  хорошо согласуется с их вариациями у поверхности земли ( $r=0.83$ ,  $R^2=69$  %). На уровне изобарической поверхности АТ–700 гПа (3 км), т. е. на уровне ведущего потока, в направлении которого смещаются барические образования у поверхности земли, как аномально теплый выделяется циркуляционный период уменьшения продолжительности меридиональных южных процессов и роста продолжительности меридиональных северных процессов (1999–2020 гг.). Кроме того, в последние годы в Сибирском секторе и соседних регионах значительно возрастают значения индекса  $K \geq 4$  и их межгодовая изменчивость (рис. 1, в). На уровне изобарической поверхности АТ–500 гПа (5 км), который отражает характеристики средней тропосферы, индекс  $K$  аномальности температурного режима превышал единицу только в период господства зональной циркуляции (1948–1956 гг.), когда лишь незначительные площади Сибирского сектора были заняты положительными или отрицательными температурными аномалиями. На уровне изобарической поверхности АТ–300 гПа (9 км) аномальными в распределении среднегодовых температур воздуха были периоды повышенной продолжительности зональных процессов: 1948–1956 и 1970–1980 гг. В последнее десятилетие значения индекса  $K$  находились в пределах  $\sigma$ , но отмечена тенденция к увеличению значений  $K$  и  $P$ . Обнаружено, что в значительной толще тропосферы наиболее выражены изменения температурного режима в период 1999–2020 гг. в Сибирском секторе, а на уровне 9 км наибольшие значения индексов аномальности отмечаются в Европейском и Дальневосточном секторах.

Анализируя многолетние изменения индексов аномальности среднегодовых значений относительной влажности у поверхности земли и на уровне изобарической поверхности АТ–850 гПа (1.5 км), как аномально влажные можно выделить периоды 1948–1956 и 1957–1969 гг. В эти годы до 60 % площади Сибирского сектора было занято положительными аномалиями относительной влажности воздуха (рис. 2, а). В последующие годы прослеживалась тенденция к уменьшению значений  $K$  и  $P$ , что отразилось в основном в увеличении площади, занятой отрицательными аномалиями среднегодовых

Соответствие значений индекса  $P$  процентному соотношению суммарных площадей  $S$  аномалий противоположных знаков на рассматриваемой территории [Багров, Мякишева, 1966]

$P$	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1
$S_+$ , %	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
$S_-$ , %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

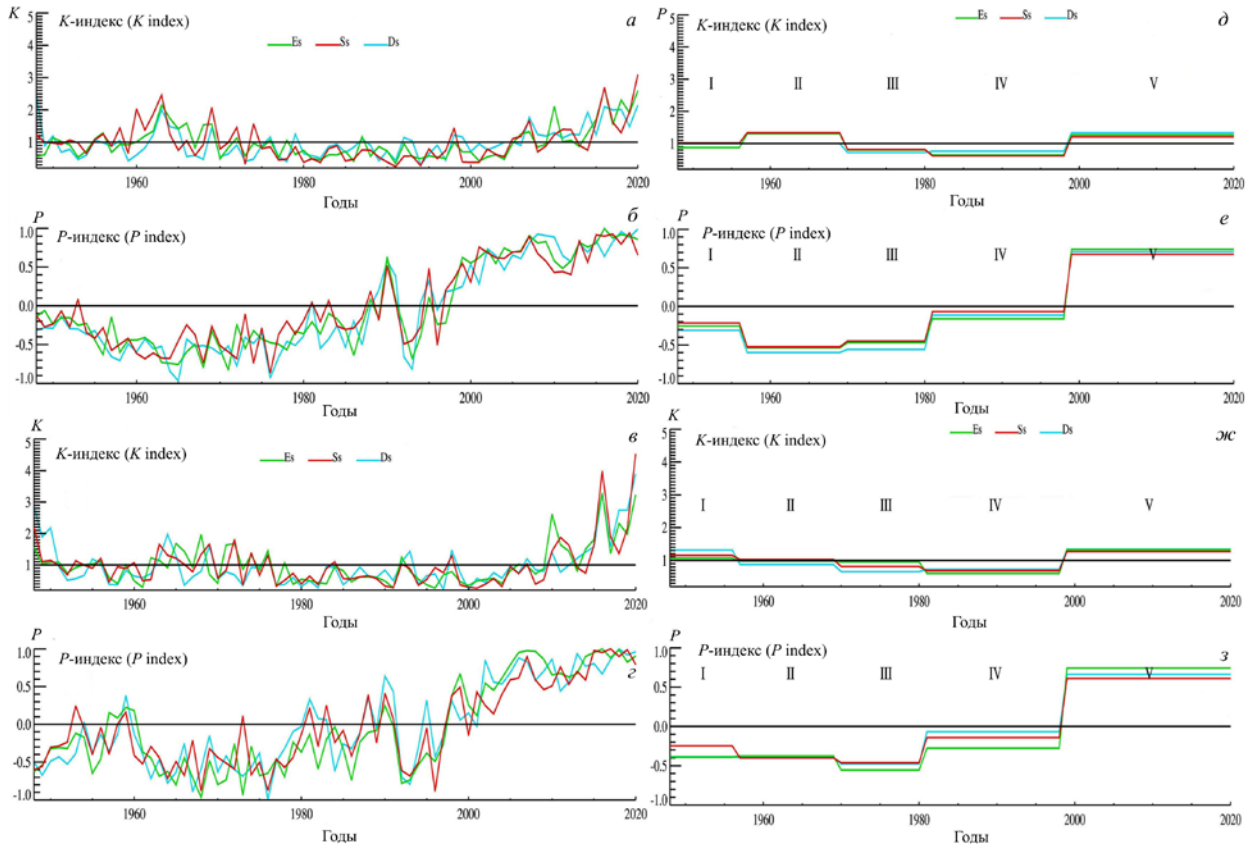


Рис. 1. Изменения индексов аномальности  $K$  и  $P$  среднегодовой температуры воздуха у поверхности земли ( $a, б$ ) и на уровне 3 км ( $в, г$ ) в 1948–2020 гг., а также их средние значения в различные циркуляционные периоды у поверхности земли ( $d, e$ ) и на уровне 3 км ( $ж, з$ ) в Европейском (Es, зеленая линия), Сибирском (Ss, красная линия) и Дальневосточном (Ds, голубая линия) секторах

значений относительной влажности воздуха как в Сибирском секторе, так и в Евразии в целом. В средней тропосфере (3–5 км) выделяется как аномально влажный период 1948–1956 гг. В последние годы происходит увеличение индекса  $K$  и площади, занимаемой отрицательными температурными аномалиями, особенно в Европейском и Сибирском секторах на уровне изобарической поверхности АТ-700 гПа (3 км) и в Сибирском и Дальневосточном секторах на уровне изобарической поверхности АТ-500 гПа (5 км). Наиболее быстрые изменения индексов аномальности среднегодовых значений относительной влажности воздуха отмечаются на уровне верхней тропосферы, где наряду с аномально влажным периодом 1948–1956 гг. имеет место хорошо выраженная тенденция к увеличению значений  $K$  и уменьшению  $P$  в 1999–2020 гг. (рис. 2, б, е). Это указывает на увеличение сухости воздуха в верхних слоях тропосферы (9 км) при высокой корреляции между соседними регионами. Для индекса  $K$  коэффициенты парной корреляции составили в Сибирском и Европей-

ском секторах  $r=0.85$ ,  $R^2=72\%$ , в Сибирском и Дальневосточном секторах  $r=0.88$ ,  $R^2=77\%$ .

Во внутрigoдовом распределении температурных аномалий в нижнем 1.5-километровом слое тропосферы в последнее десятилетие в холодный период года с ноября по январь в Сибирском секторе отмечается увеличение площади, занятой положительными аномалиями температуры. В феврале положительные температурные аномалии сохраняются, но занятая ими территория уменьшается. Существенно возрос индекс аномальности  $K$ , который сопровождается увеличением площади, занятой отрицательными температурными аномалиями, в период с марта по октябрь. В средней тропосфере на высотах 3–5 км увеличение значений  $K$  и площади, занятой положительными аномалиями температуры воздуха, в последнее десятилетие отмечается в период с ноября по февраль, а с марта по октябрь происходит увеличение  $K$ , которое сопровождается ростом площади, занятой отрицательными температурными аномалиями. Вблизи уровня тропопаузы (9 км) увеличение

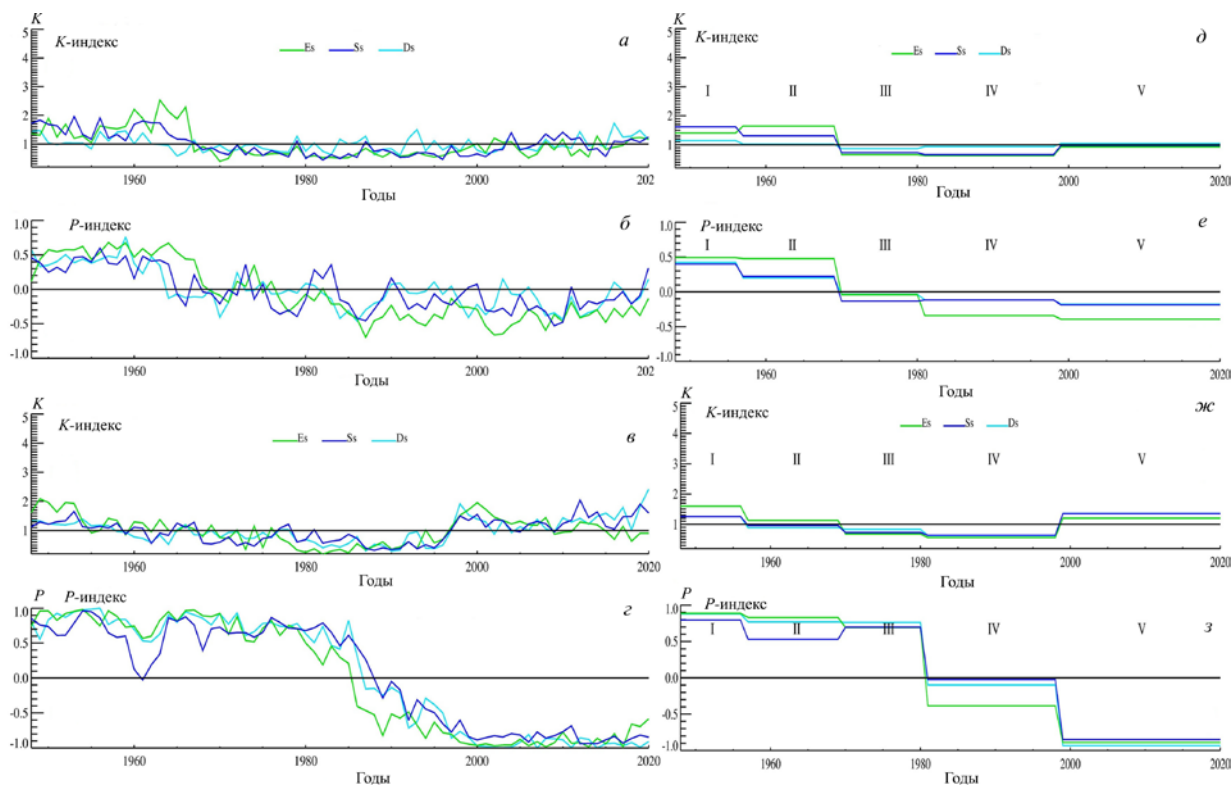


Рис. 2. Изменения индексов аномальности  $K$  и  $P$  относительной влажности воздуха у поверхности земли (а, б) и на уровне 9 км (в, г) в 1948–2020 гг., а также их средние значения в различные циркуляционные периоды у поверхности земли (д, е) и на уровне 9 км (ж, з) в Европейском (Es, зеленая линия), Сибирском (Ss, синяя линия) и Дальневосточном (Ds, голубая линия) секторах

значений индекса  $K$  и площади, занятой положительными аномалиями температуры воздуха, в последнее десятилетие отмечается только в зимние месяцы, в остальное время года происходит увеличение индекса  $K$ , которое сопровождается ростом территории, занятой отрицательными температурными аномалиями.

Для оценки пространственной структуры температурных аномалий были построены карты месячных аномалий температур  $\Delta T_A \geq \pm 6$  °C. Критерий  $\Delta T_A \geq \pm 6$  °C удобен тем, что он составляет половину амплитуды возможных изменений средней месячной температуры зимой в Северном полушарии, зарегистрированной за последние 100 лет. Используя этот критерий, можно исследовать пространственные и временные особенности формирования экстремально теплых и холодных календарных сезонов [Сазонов, 1991]. Для получения более детальной оценки современных тенденций изменений климата в Сибирском секторе и Северном полушарии в целом в настоящей работе сравнивались временные периоды 2010–2015 гг. и 2015–2020 гг.

В зимние сезоны 2015–2020 гг., по сравнению с периодом 2010–2015 гг., происходило увеличение площади крупных как положительных, так и отрицательных температурных аномалий в Северном полушарии, включая Сибирский сектор. Наиболее крупные положительные и отрицательные температурные аномалии отмечались зимой в районе Баренцева, Карского и Белого морей (рис. 3). Весной отмечаются уменьшение площади, занятой отрицательными температурными аномалиями, и увеличе-

ние числа крупных положительных аномалий в высоких широтах, включая северные районы Сибири. Летом уменьшаются площадь и частота крупных отрицательных температурных аномалий над большей частью Северного полушария, а также уменьшается частота крупных положительных аномалий. В Сибирском секторе изменений в аномалиях летнего температурного режима в рассматриваемые временные периоды не выявлено. Осенью происходит увеличение территории, занятой крупными отрицательными температурными аномалиями, включая Сибирский сектор, в частоте крупных положительных температурных аномалий существенных изменений не выявлено.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

В исследуемый период 1948–2020 гг. как аномальные в распределении температуры воздуха в Сибирском секторе в нижней тропосфере (до 1.5 км) выделяются два циркуляционных периода. Это холодный период 1957–1969 гг., когда возросла продолжительность меридиональных северных и южных процессов, и аномально теплый период 1999–2020 гг., когда происходит уменьшение продолжительности меридиональных южных процессов и рост продолжительности меридиональных северных процессов. В средней тропосфере на уровне изобарической поверхности  $AT-700$  гПа (3 км), где скорость изменений температурного режима выше, чем на остальных уровнях тропосферы, как аномальный выде-

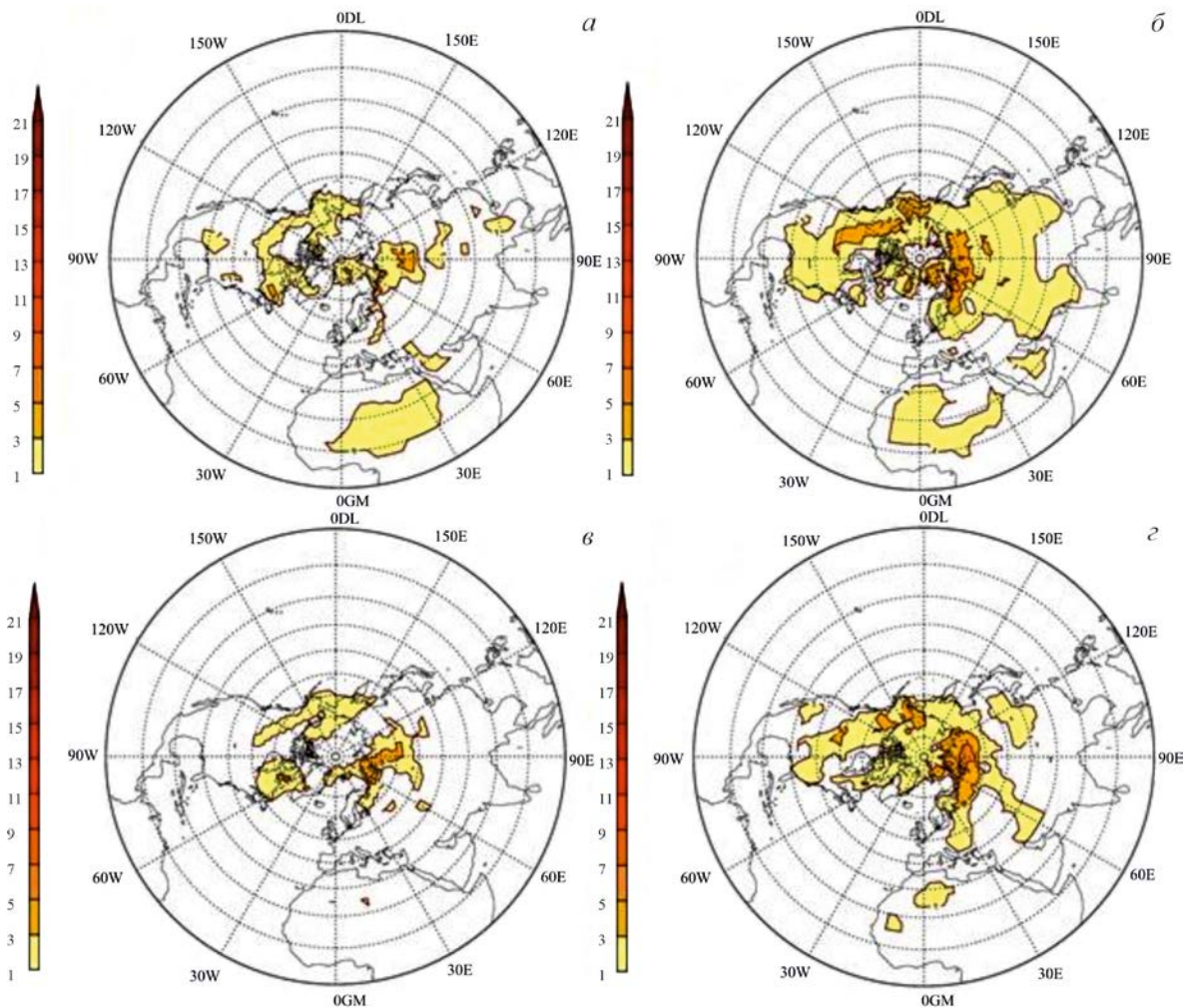


Рис. 3. Частота крупных отрицательных аномалий приземной температуры ( $|\Delta T_A| \geq -6 \text{ }^\circ\text{C}$ ) зимой в периоды 2010–2015 гг. (а) и 2015–2020 гг. (б) и крупных положительных аномалий приземной температуры ( $|\Delta T_A| \geq 6 \text{ }^\circ\text{C}$ ) зимой в периоды 2010–2015 гг. (в) и 2015–2020 гг. (г)

ляется теплый период 1999–2020 гг. На уровне изобарической поверхности АТ–500 гПа (5 км) как аномальный выделяется только теплый период господства зональной циркуляции (1948–1956 гг.). Вблизи тропопаузы на уровне изобарической поверхности АТ–300 гПа (9 км) аномальными в распределении среднегодовых температур воздуха были периоды повышенной продолжительности зональных процессов 1948–1956 и 1970–1980 гг., хотя в последние годы прослеживается тенденция к увеличению индексов аномальности  $K$  и  $P$ .

В 2015–2020 гг. по сравнению с 2010–2015 гг. в Сибирском секторе возросло число крупных положительных и отрицательных температурных аномалий зимой; весной на севере региона увеличилось число крупных положительных аномалий; летом происходит сглаживание температурных контрастов; осенью возросло число крупных отрицательных температурных аномалий. Таким образом, в последние годы в Сибирском секторе происходит усиление контрастности зимней погоды, потепление наиболее выражено весной на севере региона, а похолодание — осенью.

Наибольшие скорости изменения температурного режима в последние десятилетия выявлены на уровне

изобарической поверхности АТ–700 гПа (3 км), что является важным с точки зрения динамики приземных барических образований и процессов формирования облачности и выпадения атмосферных осадков. Повышение температур на данном уровне тропосферы может сопровождаться как усилением процессов блокирования, так и увеличением запасов потенциальной энергии и энергии конвективной неустойчивости, что может привести к росту числа опасных погодных явлений, в том числе конвективного характера. Наибольшие скорости изменения относительной влажности воздуха выявлены в верхней тропосфере на уровне изобарической поверхности 300 гПа (9 км).

Наблюдаемые изменения температурно-влажностного режима в Сибирском секторе согласуются с многолетней динамикой рассматриваемых метеорологических параметров в Европейском и Дальневосточном секторах, что указывает на крупномасштабный характер современных проявлений изменений климата. Увеличение повторяемости положительных аномалий температуры воздуха и отрицательных аномалий относительной влажности в период уменьшения продолжительности меридиональных южных процессов и роста продолжительности

меридиональных северных процессов может быть интерпретировано как собственные колебания климатической системы, вызванные перераспределением массы атмосферы между высокими и низкими широтами либо усилением теплообмена экваториальных областей Тихого и Атлантического океана со средними и высокими широтами.

#### 4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Современные тенденции изменений климата в Сибирском секторе в исследуемый нами период (1948–2020 гг.) проявляются в неоднородном характере распределения аномалий температурно-влажностного режима на разных уровнях тропосферы, что существенно затрудняет поиск причин региональных изменений климата. В то же время выявлена корреляция многолетней динамики индексов аномальности температуры и относительной влажности воздуха с циркуляционными факторами. В частности, наибольшие значения индексов аномальности температуры воздуха в Сибирском секторе и соседних регионах (Европейском и Дальневосточном) приходятся на аномально холодный период 1957–1969 гг. и аномально теплый период с 1999 г. по настоящее время, когда в Северном полушарии значительно возросла продолжительность меридиональных северных процессов. Следствием возрастания продолжительности меридиональных северных процессов явилось увеличение в 2015–2020 гг., по сравнению с 2010–2015 гг., в Сибирском секторе и большей части Северного полушария площади, занятой крупными положительными и отрицательными температурными аномалиями. Таким образом, проведенное исследование отчетливо показывает, что циркуляционные факторы, наряду с антропогенными, оказывают значительное влияние на региональные изменения климата и определяют высокий уровень климатических рисков в Сибирском секторе.

Публикация осуществляется в рамках проекта «Мониторинг и прогнозирование опасных природных явлений погоды», реализуемого победителем грантового конкурса для преподавателей магистратуры 2021/2022 Стипендиальной программы Владимира Потанина.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Багров Н.А., Мякишева Н.Н. Некоторые характеристики аномалий средних месячных температур воздуха. *Труды ММЦ*. 1966. Вып. 9. С. 53–63.

Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В., Шихов А.Н. и др. Картографирование современных изменений климата в бассейне реки Селенга. *Метеорология и гидрология*. 2022. № 2. С. 62–74. DOI: [10.52002/0130-2906-2022-2-62-74](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-2-62-74).

Груза Г.В., Ранькова Э.Я. *Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха*. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. 194 с.

Дзердзеевский Б.Л., Монин А.С. Типовые схемы общей циркуляции атмосферы в Северном полушарии и индекс циркуляции. *Известия АН СССР. Сер. Геофиз.* 1954. № 6. С. 562–574.

*Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год*. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.

Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д., Жунушова Г.Ш., Крымская Д.Н. Региональные особенности и причины изменения климата в Кыргызстане. *Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики*. 2020. № 1. С. 22–26.

Котляков В.М. Лды — это сама жизнь. *Наука и жизнь*. 2019. № 7. 106 с.

Крымская Д.Н., Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д. Изменение температуры приземной атмосферы под влиянием процессов в океане. *Труды XXIII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»*. Томск, 2017. С. D485–D488.

Кузнецова В.Н., Швець Н.В. Особенности изменчивости относительной влажности воздуха на территории России за последние десятилетия. *Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных*. 2020. № 187. С. 19–33.

Логинов В.Ф. Современные изменения климата Беларуси. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8, № 1. С. 51–74. DOI: [10.21513/2410-8758-2022-1-51-74](https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-1-51-74).

Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. *Вестник Российской академии наук*. 2022. Т. 92, № 1. С. 3–14. DOI: [10.31857/S0869587322010066](https://doi.org/10.31857/S0869587322010066).

Мохов И.И., Смирнов Д.А. Эмпирические оценки вклада парниковых газов и естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры для различных широт. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 503, № 1. С. 53–59. DOI: [10.31857/S2686739722030082](https://doi.org/10.31857/S2686739722030082).

Попова В.В., Мацковский В.В., Михайлов А.Ю. Современные изменения климата суши внетропической зоны Северного полушария. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2018а. № 1. С. 3–13.

Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950–2013 гг.: региональные особенности и связь с глобальным потеплением. *Криосфера Земли*. 2018б. № 4. С. 65–75. DOI: [10.21782/KZ1560-7496-2018-4\(65-75\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4(65-75)).

Сазонов Б.И. *Суровые зимы и засухи*. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 240 с.

Lorenz E.N. The observed circulation. *The Nature and Theory of the General Circulation of the atmosphere*. World Meteorological Organization, 1967. P. 25–45.

Trenberth K.E., Fasullo J.T. An apparent hiatus in global warming? *Earth's Future*. 2013. Vol. 1. P. 19–32. DOI: [10.1002/2013EF00016](https://doi.org/10.1002/2013EF00016).

Zhang X., Sorteberg A., Zhang J., et al. Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system. *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. L22701. DOI: [10.1029/2008GL035607](https://doi.org/10.1029/2008GL035607).

#### Как цитировать эту статью:

Белоусова Е.П., Латышева И.В., Лощенко К.А., Олемской С.В. Современные особенности температурно-влажностного режима тропосферы в Сибирском секторе в различные циркуляционные периоды. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 1. С. 79–86. DOI: [10.12737/szf-91202309](https://doi.org/10.12737/szf-91202309).