

УДК 551.513551.557

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ (1980–2021 гг.)

© 2023 г. Е. А. Безотеческая^{a, b, *}, О. Г. Чхетиани^a, И. И. Мохов^{a, c}

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^bАрктический и антарктический научно-исследовательский институт,
ул. Беринга, 38, Санкт-Петербург, 199397 Россия

^cМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

*e-mail: eadurneva@aari.ru

Поступила в редакцию 21.12.2022 г.

После доработки 13.02.2023 г.

Принята к публикации 10.03.2023 г.

На основе данных реанализа получены количественные оценки кинетической энергии высотных струйных течений Северного полушария (E_k СТ СП) и ее изменений в годовом ходе и межгодовой изменчивости для периода 1980–2021 гг. при разных условиях для минимальной скорости ветра V_m в области СТ. Сделаны соответствующие оценки доли общей кинетической энергии атмосферы Северного полушария, связанной с СТ (P_{Ek} СТ). Оценена также доля объема атмосферных слоев в области СТ в СП в общем анализируемом слое атмосферы 500–100 гПа (P_V СТ). Существенные изменения отмечены для летних сезонов, в том числе значимые тренды ослабления E_k , P_{Ek} и P_V в июле и августе при $V_m \geq 20$ и $V_m \geq 30$ м/с. В зимние сезоны значимые изменения отмечены только для P_V – тенденции уменьшения при $V_m \geq 20$ и $V_m \geq 30$ м/с. Отмечены сезонные особенности связи СТ с явлениями Эль-Ниньо, наиболее значимо проявляющиеся с января по апрель.

Ключевые слова: климатическая изменчивость, атмосферная циркуляция, высотные струйные течения, явления Эль-Ниньо, данные наблюдений и реанализа

DOI: 10.31857/S0002351523030021, EDN: TNGRAK

ВВЕДЕНИЕ

Струйные течения (СТ) в атмосфере – воздушные потоки со скоростью, достигающей и превышающей 100 м/с – существенно большей, чем в окружающих атмосферных слоях. Высотные СТ отмечаются в верхней тропосфере и нижней стратосфере, менее интенсивные – в нижней тропосфере. На фоне атмосферного переноса в восточном направлении выделяются субтропические СТ (ССТ) с максимальными скоростями вблизи уровня 200 гПа в разрыве тропопаузы и полярные СТ вблизи тропопаузы в высотных фронтальных зонах в субполярных широтах [Хромов и Мамонтова, 1955; Джорджио, 1956; Воробьев, 1960; Джорджио и Петренко, 1967; Palmén and Newton, 1969; Лайхтман, 1976; Мохов, 1993].

В [IPCC, 2021] представлены различные оценки особенностей современных режимов СТ и их изменчивости, а также прогностические оценки возможных изменений. Особая роль СТ проявляется в формировании региональных погодноклиматических аномалий. С режимами СТ, с их

неустойчивостью и извилистостью [Обухов и др., 1984; Мохов, 2011; Мохов, 2020] связано развитие блокирований (блокингов) в тропосфере средних широт [Rex, 1950; Lupo et al., 2019]. Особенности широтного положения и интенсивности СТ проявляются в изменениях взаимодействия атмосферы и океана, вариациях траекторий атмосферных циклонов, региональной изменчивости приповерхностной температуры и осадков [Hall et al., 2014; Ma et al., 2020]. Отмечается связь режимов СТ с ключевыми модами климатической изменчивости, включая Североатлантическое, Арктическое и Южное колебания, с протяженностью морских льдов и снежного покрова над континентами [Дюкарев и др., 2008; Strong and Davis, 2008].

Режимы СТ, как характерные структурные и динамические особенности общей циркуляции атмосферы, должны изменяться при изменениях климата. В частности, в [Strong and Davis, 2007] отмечена связь скорости ветра в ядре ССТ с интенсивностью меридиональной ячейки Хэдли.

Согласно [Francis and Vavrus, 2015] глобальное потепление с уменьшением межширотного температурного градиента из-за проявления Арктического усиления с более сильным потеплением в тропосфере более высоких широт способствует замедлению полярного СТ и большей его извилистости. При этом, как отмечено в [Мохов, 2011], при общем потеплении субтропическое струйное течение может усиливаться в связи с выхолаживанием страто-мезосферы на фоне тропосферного потепления. При различных температурных тенденциях в слоях тропосферы и стратосферы возможны различные тенденции для режимов СТ [Мохов, 2022]. Проявляются также различия режимов СТ и их изменений в Северном и Южном полушариях [Archer and Caldeira, 2008; Pena-Ortiz et al, 2013].

В связи с отмеченными особенностями СТ и их изменчивости необходимо наряду с локальными режимами анализировать интегральные характеристики атмосферной динамики, связанные с СТ. В данной работе представлены результаты анализа кинетической энергии СТ в атмосфере Северного полушария (E_K СТ СП) и ее изменений в годовом ходе и межгодовой изменчивости с использованием данных реанализа для периода 1980–2021 гг.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для определения характеристик СТ СП использовались данные реанализа NCEP/NCAR для зональной и меридиональной компонент скорости ветра в тропосфере и нижней стратосфере с широтно-долготным разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ и с суточным временным шагом для периода 1980–2021 гг. При этом использовались данные реанализа на всех доступных уровнях в атмосфере от 500 гПа до 100 гПа: 500, 400, 300, 250, 200, 150 и 100 гПа. Анализ проводился при различных условиях для минимальных значений V_m скорости ветра в СТ: при $V_m \geq 20$, $V_m \geq 30$ и $V_m \geq 40$ м/с. Варьирование значений V_m позволяет выделять, наряду с интегральными характеристиками системы СТ в атмосфере СП в целом, особенности отдельных ветвей СТ в разных широтно-высотных слоях атмосферы. Выбор различных значений V_m позволяет также более детально проанализировать особенности изменений в области СТ, в том числе в области ядра СТ, и сопредельных слоях атмосферы.

Кинетическая энергия слоя атмосферы СП рассчитывается как в [Archer and Caldeira, 2008]

$$E_K = \sum_{i,j} \sum_{k=L}^{k=H} \frac{m_{i,j,k} V_{i,j,k}^2}{2} = \sum_{i,j} \sum_{k=L}^{k=H} \frac{(p_{k-1} - p_{k+1})}{g} \cos(\varphi_i) \left(\sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2} \right)^2.$$

Здесь p — атмосферное давление, g — ускорение силы тяжести, φ — географическая широта, u и v — зональная и меридиональная компоненты скорости ветра, i и j — номера узлов сетки по широте и долготе; k характеризует высоту атмосферного слоя, L, H — нижняя и верхняя границы всего анализируемого атмосферного слоя. В частности, оценивались значения E_K в слое высот от 500 гПа до 100 гПа.

Определялись также доля (P_{EK}) кинетической энергии СТ в общей кинетической энергии атмосферы СП и доля (P_V) занимаемого СТ объема в атмосфере.

Наряду с оценками тенденций изменения характеристик СТ в последние десятилетия анализировались их особенности в связи явлениями Эль-Ниньо, с которыми ассоциируются сильнейшие межгодовые вариации глобальной приповерхностной температуры. Явления Эль-Ниньо детектировались с использованием индексов Niño 3, Niño 4 и Niño 3.4, характеризующих аномалии температуры поверхности в экваториальных широтах Тихого океана (<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list>).

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рис. 1 представлены средние для периода 1980–2021 гг. значения скорости ветра в зависимости от высоты и широты в атмосфере СП для января (а) и июля (б). Максимальные значения скорости ветра отмечаются в области ядра ССТ на уровне 200 гПа около 30° с.ш. в январе и около 45° с.ш. в июле.

В табл. 1 приведены средние для периода 1980–2021 гг. значения E_K СТ СП для разных сезонов при различных V_m . Максимальные значения E_K СТ характерны для зимнего сезона, минимальные — для летнего. При этом максимальная межгодовая изменчивость, характеризующаяся среднеквадратическими отклонениями (СКО), проявляется в промежуточные сезоны, особенно весной.

На рис. 2 представлены широтные зависимости E_K для атмосферы СП и E_K СТ при разных V_m в январе (а) и июле (б) в среднем для периода 1980–2021 гг. Максимальные значения E_K в январе (рис. 2а) отмечаются вблизи 30° с.ш. с максимальной скоростью СТ в ядре ССТ СП. В июле (рис. 2б) максимальные значения E_K , как и ядро ССТ СП, смещаются к 45° с.ш. При этом в июле проявляется высокоширотная особенность около 70° с.ш., связанная со вторым максимумом скорости в области полярно-фронтального СТ, и низкоширотная особенность в области 0 – 20° с.ш., связанная с экваториальным СТ, которое, как и ССТ, летом смещается к северу.

В табл. 2 представлены оценки трендов E_K СТ СП для разных месяцев. Наиболее значимые

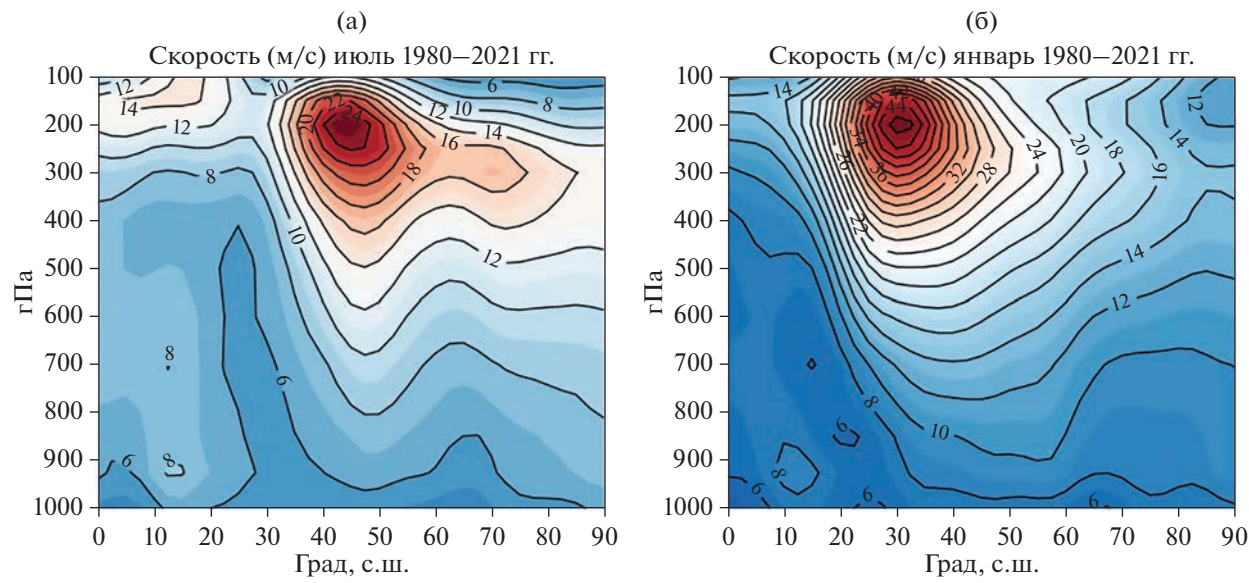


Рис. 1. Средние для периода 1980–2021 гг. значения скорости ветра (м/с) в зависимости от широты и высоты в слое 1000–100 гПа атмосферы СП для января (а) и июля (б).

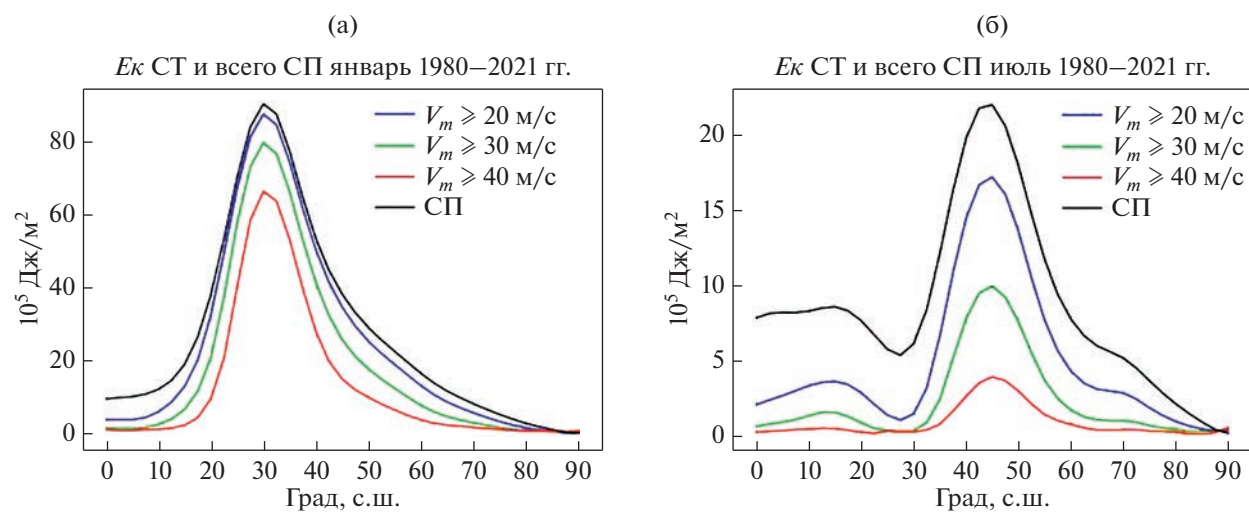


Рис. 2. Широтная зависимость E_k для атмосферы СП и E_k СТ при разных V_m в январе (а) и июле (б) в среднем для периода 1980–2021 гг.

Таблица 1. Средние сезонные значения E_k СТ СП при разных V_m для периода 1980–2021 гг. В скобках приведены среднеквадратические отклонения (СКО)

$E_k \times 10^5, \text{Дж/м}^2$	Зима	Весна	Лето	Осень
$V_m \geq 20 \text{ м/с}$	860 (± 59)	546 (± 160)	206 (± 29)	435 (± 134)
$V_m \geq 30 \text{ м/с}$	665 (± 57)	388 (± 141)	101 (± 22)	290 (± 110)
$V_m \geq 40 \text{ м/с}$	446 (± 51)	219 (± 105)	36 (± 13)	160 (± 74)

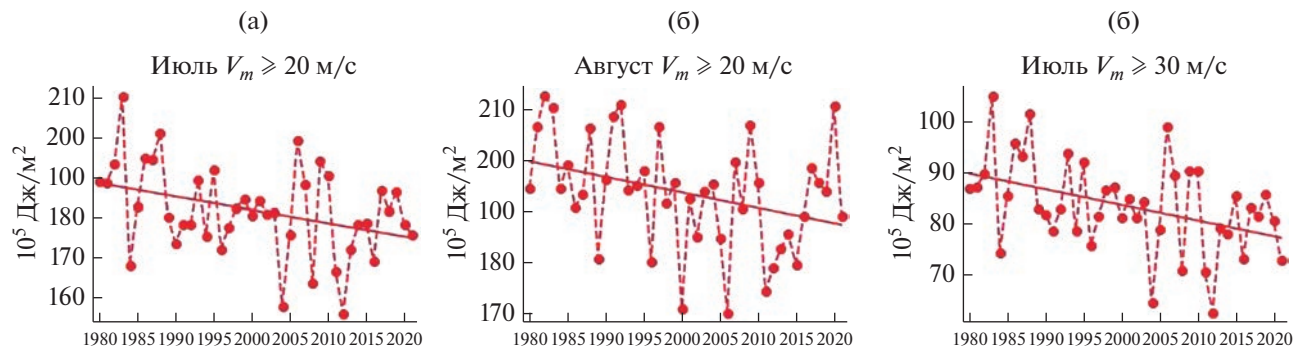


Рис. 3. Межгодовые вариации E_k СТ СП (Дж/м²) при $V_m \geq 20$ м/с в июле (а) и августе (б); при $V_m \geq 30$ м/с в июле (в) по данным для периода 1980–2021 гг. Прямые характеризуют линейные тренды.

тенденции отмечены для летних месяцев. В том числе, отмечены статистически значимые тенденции уменьшения E_k СТ в июле (при $V_m \geq 20$ и $V_m \geq 30$ м/с) и в августе (при $V_m \geq 20$ м/с) – см. рис. 3 (а, б, в). В другие сезоны оценки трендов E_k СТ СП получены статистически незначимыми (и разного знака).

На рис. 4 представлено пространственное распределение общей E_k в атмосфере СП в слое 400–

100 гПа в зимний (а) и летний (б) сезоны для периода 1980–2021 гг. Максимальные значения E_k соответствуют зонам СТ. Зимой (рис. 4а) выделяется область СТ с наибольшими значениями E_k (до 20 кДж/м² и более) в субтропических широтах над западной частью Тихого океана. В области еще одного максимума E_k в атмосфере у восточного побережья Северной Америки среднесезонные значения E_k намного меньше. Летом (рис. 4б) области СТ с наибольшими значениями E_k смещаются на север. Максимальные значения E_k летом (существенно меньшие, чем зимой) отмечаются над акваторией Тихого океана.

Таблица 2. Оценки трендов E_k СТ СП (Дж/м²/10 лет) для разных месяцев по данным для периода 1980–2021 гг. Выделены результаты, значимые на уровне 95%. В скобках отмечены СКО

Тренды E_k , Дж/м ² /10 лет	$V_m \geq 20$ м/с	$V_m \geq 30$ м/с	$V_m \geq 40$ м/с
Январь	–0.1 (±5.1)	1.2 (±4.9)	3.5 (±4.7)
Февраль	–3.5 (±5.7)	–2.9 (±5.7)	–3.0 (±5.3)
Март	–7.2 (±6.0)	–8.8 (±6.0)	–9.1 (±5.5)
Апрель	–0.6 (±4.1)	–0.6 (±3.9)	1.0 (±3.3)
Май	1.0 (±2.2)	1.8 (±1.9)	2.2 (±1.4)
Июнь	–2.9 (±1.6)	–2.3 (±1.4)	–1.2 (±1.0)
Июль	–3.3 (±1.3)	–3.1 (±1.1)	–1.2 (±0.6)
Август	–3.0 (±1.3)	–1.6 (±1.1)	0.2 (±0.7)
Сентябрь	–1.0 (±1.6)	–0.4 (±1.5)	0.5 (±1.3)
Октябрь	–0.1 (±2.5)	2.3 (±2.6)	4.0 (±2.3)
Ноябрь	–2.5 (±2.6)	–2.0 (±2.7)	–1.3 (±2.8)
Декабрь	–0.8 (±3.3)	0.5 (±3.4)	1.4 (±3.4)

В табл. 3 приведены среднесезонные значения P_{Ek} СТ СП при разных значениях V_m . При всех V_m значения P_{Ek} СТ максимальны зимой и минимальны летом. При этом наибольшая межгодовая изменчивость P_{Ek} СТ СП, характеризующаяся СКО, проявляется в переходные сезоны.

В табл. 4 представлены оценки трендов P_{Ek} СТ СП (%/10 лет) для разных месяцев для периода 1980–2021 гг. Наиболее значимые тенденции отмечены для летних месяцев. В том числе, отмечены статистически значимые тенденции уменьшения P_{Ek} СТ при $V_m \geq 20$ м/с во все летние месяцы и при $V_m \geq 30$ м/с в июле – см. также рис. 5 (а, б, в, г). В другие сезоны оценки трендов P_{Ek} СТ СП получены статистически незначимыми (и разного знака), за исключением статистически значимого положительного тренда P_{Ek} в октябре при $V_m \geq 40$ м/с (рис. 5д).

Таблица 3. Средние сезонные значения P_{Ek} СТ СП для периода 1980–2021 гг. при разных V_m . В скобках приведены среднеквадратические отклонения (СКО)

P_{Ek} , %	Зима	Весна	Лето	Осень
$V_m \geq 20$ м/с	87 (±1)	79 (±5)	59 (±4)	75 (±6)
$V_m \geq 30$ м/с	67 (±2)	53 (±8)	29 (±4)	49 (±8)
$V_m \geq 40$ м/с	45 (±3)	29 (±8)	10 (±3)	26 (±7)

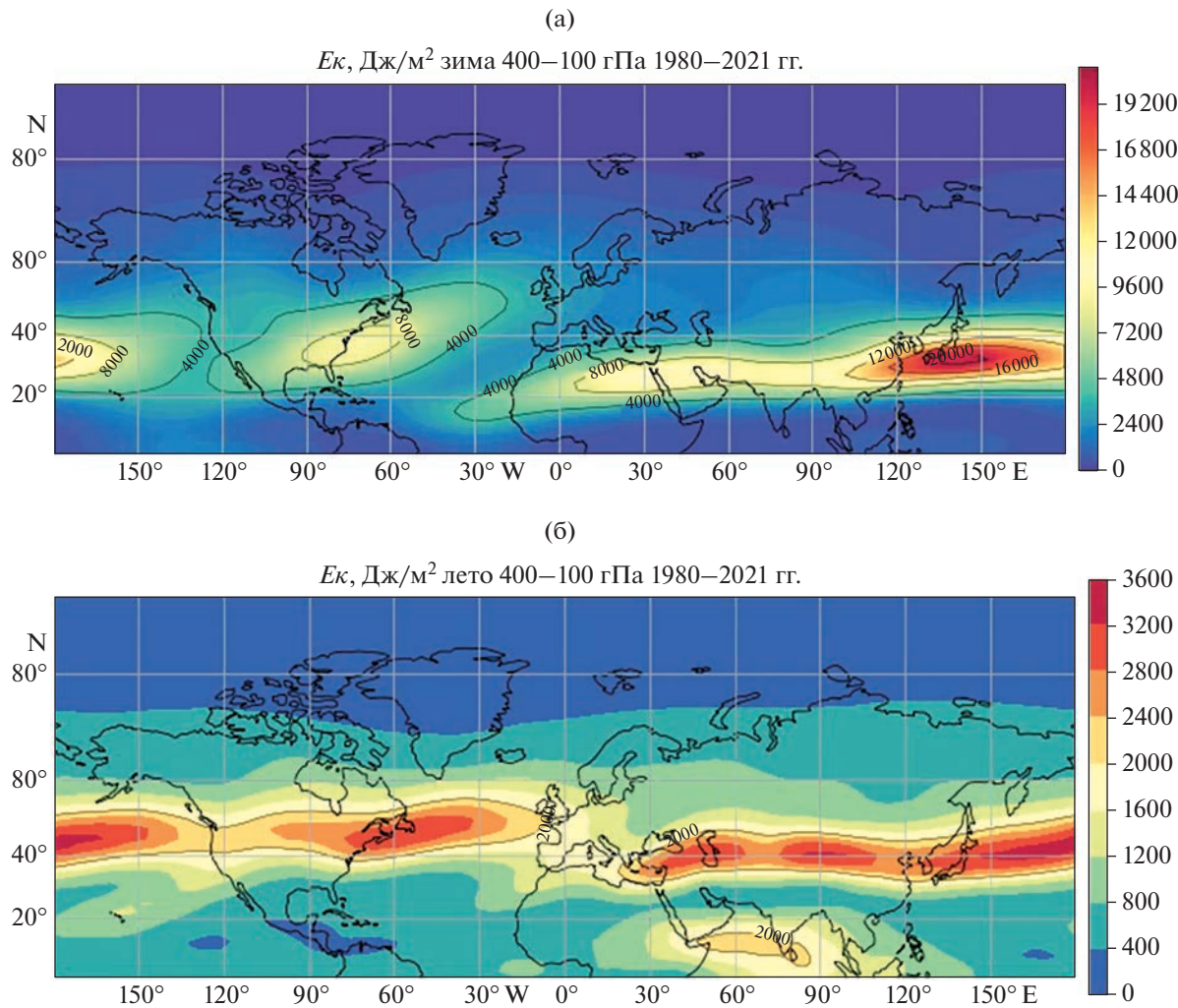


Рис. 4. Пространственное распределение E_k (Дж/м²) в СП в атмосферном слое 400–100 гПа за период 1980–2021 гг. зимой (а) и летом (б).

Таблица 4. Оценки трендов P_{Ek} СТ СП (%/10 лет) для разных месяцев по данным за период 1980–2021 гг. Выделены результаты, значимые на уровне 95%. В скобках отмечены СКО

Тренды P_{Ek} , %/10 лет	$V_m \geq 20$ м/с	$V_m \geq 30$ м/с	$V_m \geq 40$ м/с
Январь	−0.04 (±0.08)	0.1 (±0.16)	0.33 (±0.26)
Февраль	−0.02 (±0.09)	−0.04 (±0.21)	−0.11 (±0.3)
Март	−0.16 (±0.13)	−0.51 (±0.28)	−0.72 (±0.39)
Апрель	0.02 (±0.15)	−0.01 (±0.3)	0.18 (±0.33)
Май	0.13 (±0.13)	0.31 (±0.22)	0.41 (±0.22)
Июнь	−0.36 (±0.16)	−0.4 (±0.24)	−0.23 (±0.22)
Июль	−0.59 (±0.18)	−0.76 (±0.23)	−0.3 (±0.16)
Август	−0.55 (±0.18)	−0.32 (±0.24)	0.09 (±0.18)
Сентябрь	−0.16 (±0.14)	−0.06 (±0.22)	0.12 (±0.24)
Октябрь	0.1 (±0.13)	0.48 (±0.26)	0.76 (±0.32)
Ноябрь	−0.02 (±0.08)	−0.05 (±0.2)	−0.06 (±0.29)
Декабрь	0.01 (±0.07)	0.13 (±0.16)	0.2 (±0.26)

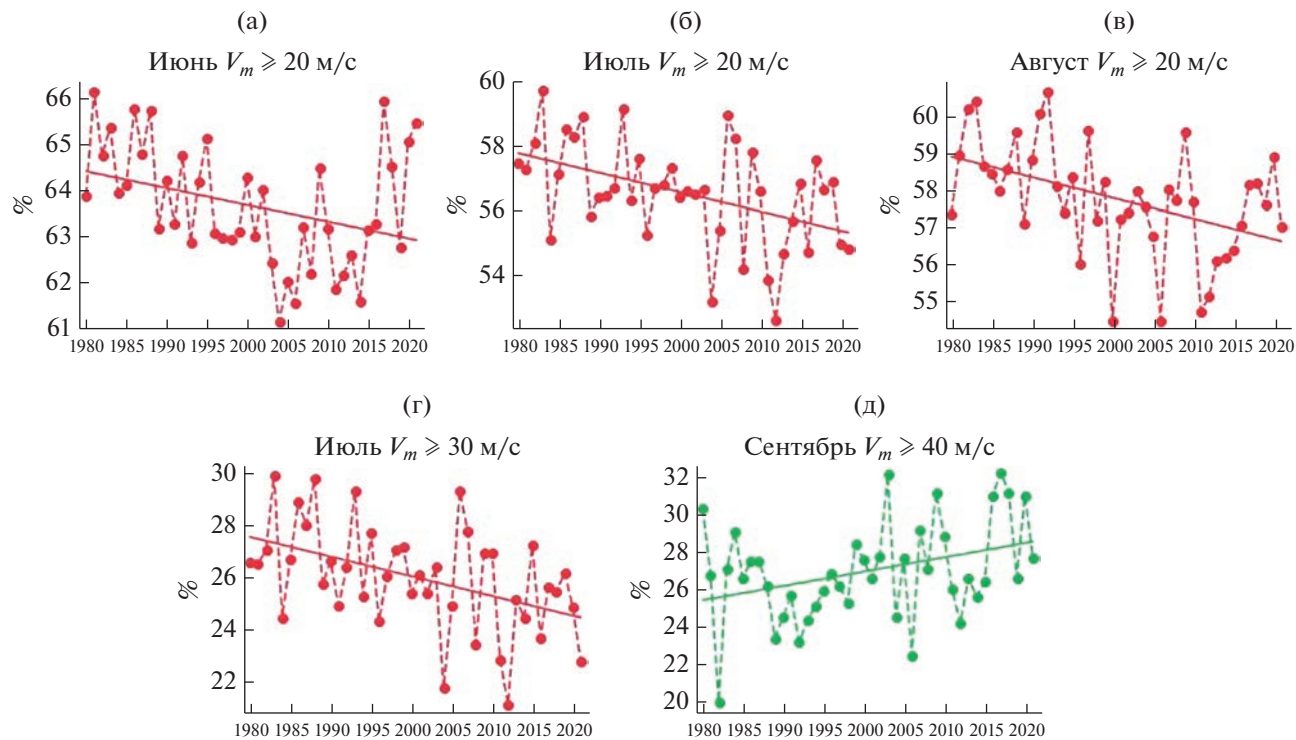


Рис. 5. Межгодовые вариации P_{Ek} СТ СП (%) при $V_m \geq 20$ м/с в июне (а), июле (б) и августе (в); при $V_m \geq 30$ м/с в июле (г) и при $V_m \geq 40$ м/с в октябре (д) по данным для периода 1980–2021 гг. Прямые характеризуют линейные тренды.

В табл. 5 приведены среднесезонные значения P_V СТ СП при разных значениях V_m . При всех V_m значения P_V СТ максимальны зимой и минимальны летом. При этом наибольшая межгодовая изменчивость P_V СТ СП, характеризуемая СКО, проявляется в переходные сезоны.

В табл. 6 представлены оценки трендов P_V СТ СП для разных месяцев для периода 1980–2021 гг. Наиболее значимые тенденции отмечены для летних и зимних месяцев. В том числе, отмечены статистически значимые тенденции уменьшения P_V СТ в июле (при $V_m \geq 30$ м/с) и августе (при $V_m \geq 20$ и $V_m \geq 30$ м/с), а также в декабре (при $V_m \geq 20$ м/с) и январе (при $V_m \geq 20$ и $V_m \geq 30$ м/с) (см. рис. 6). В переходные сезоны оценки трендов P_V СТ СП получены статистически незначимыми (и разного знака).

Наряду с анализом трендов для характеристик СТ в атмосфере СП проведен анализ связи режи-

мов СТ с явлениями Эль-Ниньо, с которыми связаны сильнейшие межгодовые вариации глобальной приповерхностной температуры. На рис. 7 приведены коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями Ek СТ СП и индексами Эль-Ниньо Nino 3, Nino 4 и Nino 3.4 при разных значениях V_m .

Наиболее высокие коэффициенты корреляции среднемесячных значений Ek СТ СП и индексов Эль-Ниньо, статистически значимые на уровне 95%, отмечены с января по апрель.

Проведен также анализ связи с явлениями Эль-Ниньо субтропического струйного течения Северного полушария (ССТ СП). На рис. 8 приведены коэффициенты корреляции среднемесячных значений зональной скорости ветра u в ядре ССТ на уровне 200 гПа с индексами Эль-Ниньо – Nino 3, Nino 4 и Nino 3.4 по данным для периода 1980–2021 гг.

Таблица 5. Средние сезонные значения P_V СТ СП для периода 1980–2021 гг. при разных V_m . В скобках приведены среднеквадратические отклонения (СКО)

P_V , %	Зима	Весна	Лето	Осень
$V_m \geq 20$ м/с	40 (±2)	31 (±6)	17 (±1)	27 (±5)
$V_m \geq 30$ м/с	20 (±1)	13 (±4)	5 (±1)	11 (±3)
$V_m \geq 40$ м/с	9 (±1)	5 (±2)	1 (±0.3)	4 (±2)

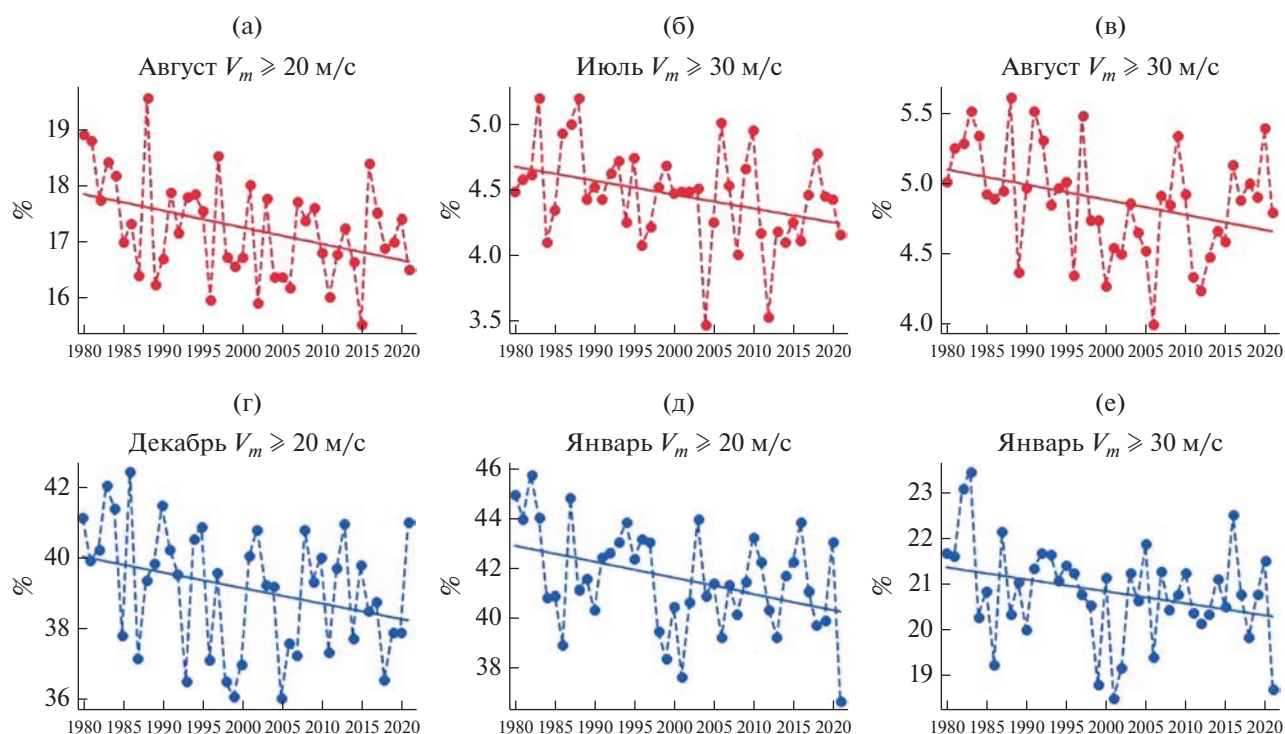


Рис. 6. Межгодовые вариации P_V СТ СП (%) при $V_m \geq 20$ м/с в августе (а) и при $V_m \geq 30$ м/с в июле (б) и августе (в); а также при $V_m \geq 20$ м/с в декабре (г) и январе (д) и при $V_m \geq 30$ м/с в январе (е) по данным для периода 1980–2021 гг. Прямые характеризуют линейные тренды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных реанализа для периода 1980–2021 гг. получены количественные оценки кинетической энергии E_k высотных струйных течений Северного полушария и ее изменений в го-

довом ходе и межгодовой изменчивости. Сделаны также соответствующие количественные оценки доли P_{E_k} общей кинетической энергии атмосферы Северного полушария, связанной с СТ, и доли P_V объема атмосферных слоев в области СТ в СП в общем анализируемом слое атмосферы.

Таблица 6. Оценки трендов P_V СТ СП (%/10 лет) для разных месяцев по данным для периода 1980–2021 гг. Выделены результаты, значимые на уровне 95%. В скобках отмечены СКО

Тренды P_V , %/10 лет	$V_m \geq 20$ м/с	$V_m \geq 30$ м/с	$V_m \geq 40$ м/с
Январь	−0.64 (±0.24)	−0.26 (±0.13)	0.01 (±0.07)
Февраль	−0.36 (±0.28)	−0.07 (±0.17)	0.01 (±0.09)
Март	−0.02 (±0.33)	−0.08 (±0.17)	−0.1 (±0.09)
Апрель	0.20 (±0.30)	−0.03 (±0.13)	0.01 (±0.06)
Май	0.00 (±0.13)	0.03 (±0.06)	0.05 (±0.03)
Июнь	−0.13 (±0.10)	−0.08 (±0.05)	−0.03 (±0.03)
Июль	−0.14 (±0.08)	−0.11 (±0.04)	−0.03 (±0.02)
Август	−0.29 (±0.11)	−0.11 (±0.05)	−0.001 (±0.02)
Сентябрь	−0.02 (±0.12)	0.01 (±0.05)	0.03 (±0.03)
Октябрь	−0.27 (±0.15)	−0.01 (±0.07)	0.07 (±0.05)
Ноябрь	−0.11 (±0.21)	−0.02 (±0.08)	0.02 (±0.04)
Декабрь	−0.44 (±0.22)	−0.09 (±0.11)	0.02 (±0.05)

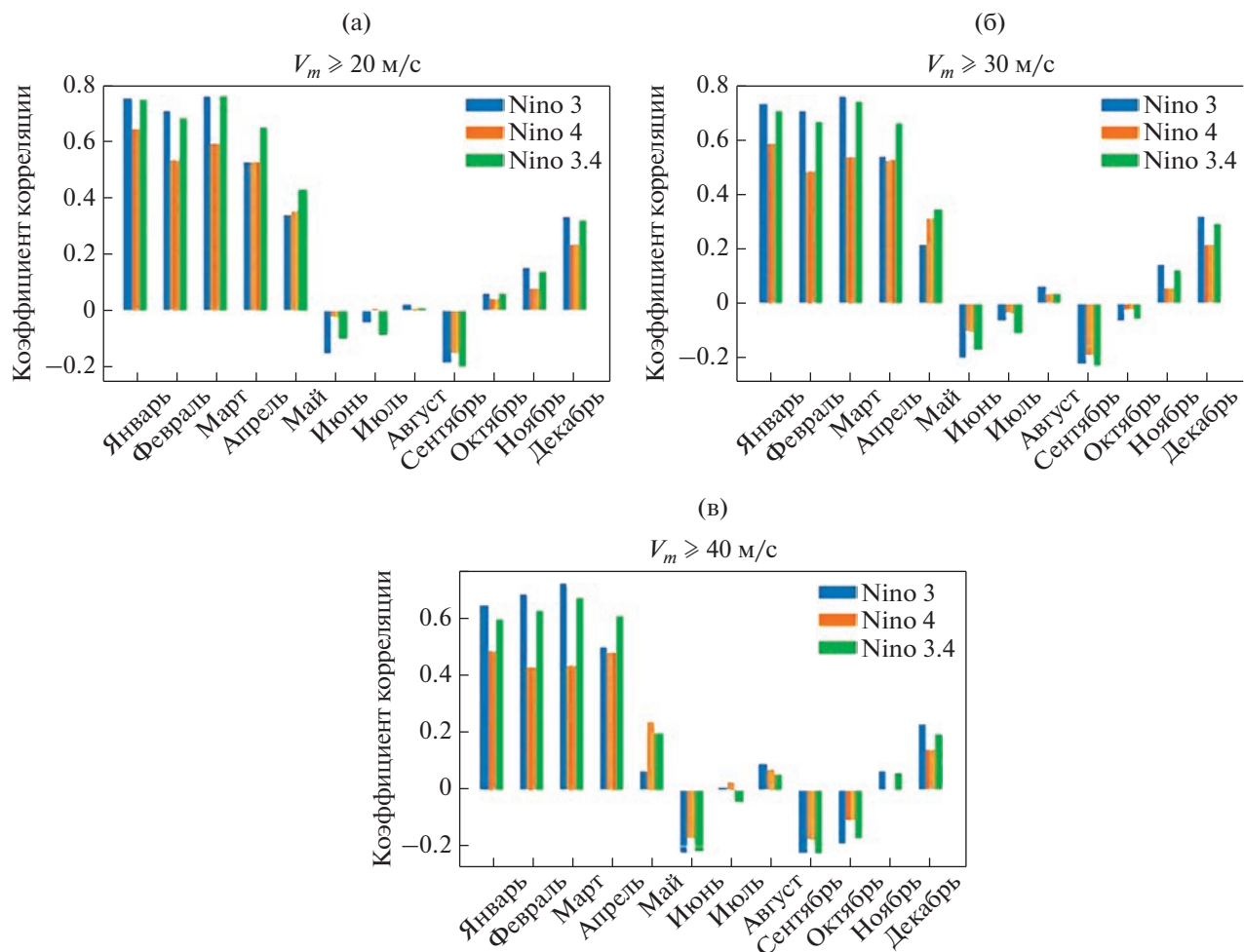


Рис. 7. Коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями E_k СТ СП и разными индексами Эль-Ниньо при $V_m \geq 20$ (а), $V_m \geq 30$ (б) и $V_m \geq 40$ м/с (в) для периода 1980–2021 гг.

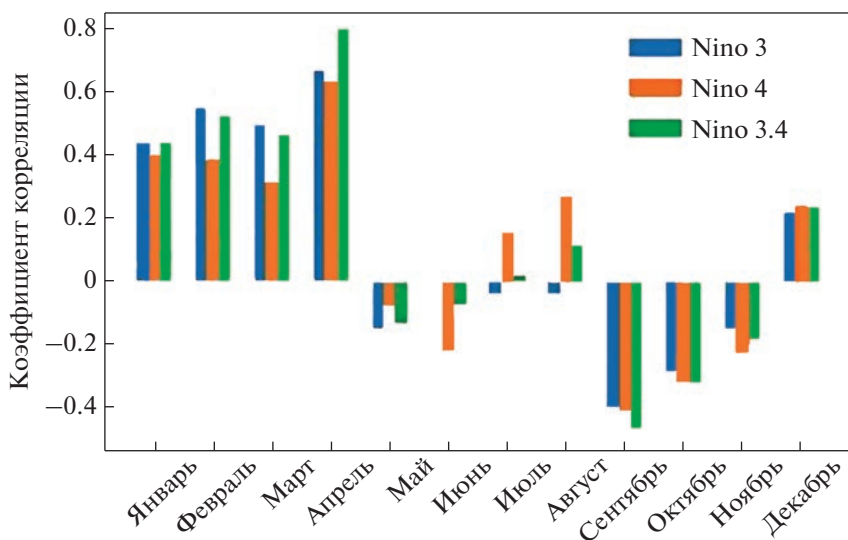


Рис. 8. Коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями зональной скорости ССТ и разными индексами Эль-Ниньо для периода 1980–2021 гг.

Наиболее значимые изменения отмечены для летних сезонов, в том числе значимые тренды ослабления характеристик СТ E_k , P_{Ek} и P_v . В зимние сезоны выявлены только значимое уменьшение P_v .

Отмечены также сезонные особенности связи СТ с явлениями Эль-Ниньо, наиболее значимо проявляющиеся с января по апрель.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФА им. А.М. Обухова РАН (темы № FMWR-2022-0011, № FMWR-2022-0014). Особенности связи режимов струйных течений в атмосфере с явлениями Эль-Ниньо оценивались в рамках проекта РНФ 19-17-00240.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробьев В.И. Струйные течения в высоких и умеренных широтах. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 234 с.
- Джорджо В.А. Струйное течение // Труды Ташкентской геофизической обсерватории. Л.: Гидрометеиздат. 1956. № 12(13). С. 3–101.
- Джорджо В.А., Петренко Н.В. Физическая природа струйных течений в атмосфере // Физика атмосферы и авиационная метеорология. Научные труды. Ташкент: ФАН. 1967. № 289. С. 44–97.
- Дюкарев Е.А., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Изменчивость субтропического струйного течения в тропосфере Северного полушария во второй половине 20 в. // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 10. С. 869–875.
- Лайхтман Д.Л. Динамическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 608 с.
- Мохов И.И. Диагностика структуры климатической системы. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 271 с.
- Мохов И.И. Особенности формирования летней жары 2010 г. на европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 709–716.
- Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 376–396.
- Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник РАН. 2022. Т. 92. № 1. С. 3–14.
- Обухов А.М., Курганский М.В., Татарская М.С. Динамические условия возникновения засух и других крупномасштабных погодных аномалий // Метеорология и гидрология. 1984. № 10. С. 5–13.
- Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1955. 456 с.
- Archer C.L., Caldeira K. Historical trends in the jet streams // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. P. L08803. <https://doi.org/10.1029/2008GL033614>
- Francis J.A., Vavrus S.J. Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming // Environ. Res. Lett. 2015. V. 10. P. 014005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/014005>
- Hall R., Erdélyi R., Hanna E., Jones J.M., Scaife A.A. Drivers of North Atlantic polar front jet stream variability // Int. J. Climatol. 2015. V. 35. P. 1697–1720.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / [Masson-Delmotte V., et al. (eds.)]. Cambridge Univ. Press. 2021.
- Lupo A.R., Jensen A.D., Mokhov I.I., Timazhev A., Eichler T., Efe B. Changes in global blocking character during recent decades // Atmosphere. 2019. V. 10. № 2. P. 92.
- Ma L., Woollings T., Williams R.G., Smith D., Dunstone N. How does the winter jet stream affect surface temperature, heat flux and sea ice in the North Atlantic? // J. Climate. 2020. V. 33. № 9. P. 3711–3730.
- Palmén E., Newton C. Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation. N.Y. and London: Academic Press, 1969. 603 p.
- Pena-Ortiz C., Gallego D., Ribera P., Ordonez P., Alvarez-Castro M. Del C. Observed trends in the global jet stream characteristics during the second half of the 20th century // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2013. V. 118. № 7. P. 2702–2713.
- Rex D.F. Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. Tellus. 1950. V. 2. № 3. P. 196–211.
- Strong C., Davis R. Winter jet stream trends over the Northern Hemisphere // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2007. № 133. P. 2109–2115.
- Strong C., Davis R. Variability in the position and strength of winter jet stream cores related to Northern Hemisphere teleconnections // J. Climate. 2008. V. 21. № 3. P. 584–592.

Variability of Jet Streams in the Atmosphere of the Northern Hemisphere in Recent Decades (1980–2021)

E. A. Bezotecheskaya^{1, 2, *}, O. G. Chkhetiani¹, and I. I. Mokhov^{1, 3}

¹Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia

²Arctic and Antarctic Research Institute, Bering st., 38, Saint-Petersburg, 199397 Russia

³Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1-2, GSP-1, Moscow, 199991 Russia

*e-mail: eadurneva@aari.ru

Based on the reanalysis data quantitative estimates of the kinetic energy of the high-altitude jet streams of the Northern Hemisphere (E_k JS NH) and its changes in the annual cycle and interannual variability for the pe-

riod 1980–2021 were obtained under different conditions for the minimum wind speed V_m in the JS area. Adequate estimates are made for the share of the total kinetic energy of the atmosphere of the Northern Hemisphere associated with JS (P_{EK} JS). The share of the volume of atmospheric layers in the JS area in the NH in the total analyzed atmospheric layer of 500–100 hPa (P_V JS) was also estimated. Significant changes were noted in summer including significant weakening trends of E_K , P_{EK} and P_V in July and August at $V_m \geq 20$ and $V_m \geq 30$ m/s. In winter significant changes were noted only for P_V – a decreasing trend at $V_m \geq 20$ and $V_m \geq 30$ m/s. Seasonal features of JS connection with El Niño phenomena are noted which are most significantly manifested from January to April.

Keywords: climate variability, atmospheric circulation, high-altitude jet streams, El Niño phenomena, observational and reanalysis data