

УДК 551.513

## Связь ячеек тропосферной циркуляции с изменчивостью меридиональных потоков тепла над территорией Сибири

С.В. Логинов, Е.И. Морару, Е.В. Харюткина\*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 31.05.2016 г.

По данным реанализа было проведено исследование пространственно-временных изменений меридиональных ячеек циркуляции для сибирского сектора Северного полушария для двух временных интервалов: периода интенсивного глобального потепления 1976–1998 гг. и периода замедления темпов потепления 1999–2014 гг. Выявлено, что наиболее существенные изменения наблюдаются в зимний сезон в начале XXI в.: произошло почти полное исчезновение полярной ячейки и увеличение интенсивности ячеек Хэдли и Феррела. Получены и проанализированы тенденции изменений адвективных и вихревых меридиональных потоков тепла, а также их связь с функцией тока. Установлено, что в период ослабления процесса глобального потепления во все месяцы наблюдается увеличение интенсивности и количества центров вихревой циркуляции, что приводит к развитию меридиональной циркуляции, усилению процессов блокирования и, как следствие, к уменьшению меридионального притока тепла в сибирском секторе в начале XXI в.

*Ключевые слова:* ячейки циркуляции, меридиональная циркуляция, потоки тепла, сибирский сектор; circulation cells, meridional circulation, heat fluxes, Siberian sector.

### Введение

Общая циркуляция атмосферы — один из важнейших климатообразующих факторов, так как приводит к переносу вещества и энергии в широтном и меридиональном направлениях. Глобальными элементами атмосферной циркуляции являются так называемые циркуляционные ячейки [1–4]. Планетарное вращение Земли, с учетом неравномерного нагрева поверхности, приводит к развитию трех меридиональных ячеек в каждом полушарии: Хэдли (ЯХ) и Феррела (ЯФ) в тропических и умеренных широтах соответственно и полярной ячейки (ПЯ) в высоких широтах. Общее представление меридиональной циркуляции в этих ячейках может меняться в зависимости от сезона года, распределения источников тепла на поверхности, особенностей центров действия атмосферы и других факторов. В восточных районах Атлантического и Тихого океанов ячейки менее мощные, при этом в Атлантике они достигают высоты 700 гПа, а в Тихом океане — до 300 гПа [5, 6], что связано также с расположением и интенсивностью субтропического и субполярного струйных течений в верхней тропосфере [7].

В ряде работ [8, 9] показано, что глобальное потепление существенно влияет на интенсивность меридиональных ячеек. В последние десятилетия

в обоих полушариях наблюдается увеличение интенсивности ЯХ, их расширение и смещение границ на 2–5° к полюсу, что сопровождается формированием засушливых зон между 30° с.ш. и 30° ю.ш. и развитием глубоких бароклинных вихрей [10]. Например, за 1979–2009 гг. в зимний период скорость смещения ЯХ к югу над Африкой, Океанией, а также в западной и центральной частях Тихого океана составила 1°/год, при этом над Южной Америкой и в Атлантике ее интенсивность усилилась на 1–5% [11].

Совместно с климатическими изменениями меняется и степень влияния вихревого потока углового момента на интенсивность ЯХ с максимальным влиянием в холодном климате [10]. Кроме этого, на интенсивность влияет нелинейная адвекция момента средней меридиональной циркуляции, которая дает существенный вклад в баланс зонального момента верхней ветви ЯХ летом [12]. Согласно результатам работы [13] ослабление ПЯ за счет потепления в высоких широтах и смещение к Северному полюсу ЯХ в условиях глобального потепления в конце 1980-х гг. создали благоприятные условия для интенсификации и расширения ЯФ в сторону полюса в зимние месяцы.

Ячейки циркуляции вносят существенный вклад в энергетический запас атмосферы [14]. Термодинамическая эффективность ЯХ как теплового двигателя за 1979–2010 гг. оставалась относительно постоянной. В работе [15] показано, что летом в Северном полушарии влияние меридионального

\* Сергей Владимирович Логинов (seo@imces.ru); Евгения Ивановна Морару (seo@imces.ru); Елена Валерьевна Харюткина (kh\_ev@imces.ru).

переноса на баланс кинетической энергии невелико, однако зимой оно возрастает. Доминирующую роль в переносе энергии к полюсу меридиональная циркуляция играет в районе  $30^\circ$  с.ш., в то время как в более высоких широтах главная роль отводится крупномасштабным зональным вихрям. Изменение в переносе энергии приводит к изменению меридионального транспорта массы, который оценивается по переносу функций тока [2]. Режим циркуляции, связанный с изменениями потенциальной энергии во внетропических и арктических широтах, проявляется в миграции ЯФ на север, приводя к формированию аномально теплых условий в высоких широтах Евразии и аномально холодных в Гренландии, Северо-Восточной Африке и юго-западной части Китая.

Изменение расположения и интенсивности ячеек меридиональной циркуляции связывают с различными процессами. Предполагается, что за ослабление и расширение ЯХ и смещение на полюс ЯФ может быть ответственна солнечная активность [16]. В работе [5] отмечается достаточно высокая связь (коэффициент корреляции 0,67) между усилением ЯХ и режимом температуры поверхности океана в экваториальной зоне Атлантического океана. Также усиление системы ЯФ и ЯХ связывают с крупномасштабными процессами атмосферной циркуляции, а именно с высокой фазой Северо-Атлантического колебания и Эль-Ниньо, периодами сильного блокирования на западе Тихого океана в зимний период [6].

Таким образом, в большинстве работ проводится исследование характеристик ячеек тропосферной циркуляции и их изменений в системе общей циркуляции атмосферы, однако при этом не рассматривается их связь с изменением региональных циркуляционных механизмов, влияющих на изменчивость климатических величин. В то же время, как было показано в [17] при описании климата региона Западной Сибири, представляющего собой ограниченную территорию, величины вкладов радиационных и циркуляционных факторов в изменчивость температуры примерно равны. Поэтому целью данной работы явилось исследование временных изменений характеристик ячеек меридиональной циркуляции в тропосфере и их влияния на меридиональные потоки тепла на территории Сибири в последние десятилетия.

## Исходные данные и методы исследования

Расчеты проводились не только для территории Западной Сибири, но и для всего сибирского сектора Северного полушария, ограниченного  $60^\circ$  в.д. ( $x_0$ ) и  $120^\circ$  в.д. ( $x_1$ ) на западе и востоке соответственно. Рассчитывались как средние значения, так и оценки флуктуаций величин геопотенциала  $H$ , температуры  $T$  и компонент скорости ветра в изобарических координатах (зональной  $u$ , ме-

ридиональной  $v$  и вертикальной  $\omega$ ). Ранее в [18] было показано, что функции тока, рассчитанные по данным реанализов и с помощью методов моделирования, имеют общее качественное согласие. Значимые различия наблюдались в сезонных оценках интенсивности и тенденциях некоторых параметров. Поэтому в рамках данной работы в качестве исходных данных использовались данные реанализа JRA-55 [19] с горизонтальным разрешением  $1,25^\circ \times 1,25^\circ$  и шагом по времени 6 ч на 23 изобарических уровнях с 1000 до 200 гПа за период 1976–2014 гг.

Согласно [2] глобальная, или среднезональная, функция тока меридионального массопереноса с учетом гидростатического приближения определяется как

$$\Psi(y, p) = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \oint_0^p \frac{v(x, y, p', t)}{g} dp' dx dt, \quad (1)$$

где  $x$ ,  $y$ ,  $t$ ,  $p$ ,  $g$  – долгота, широта, время, давление и ускорение свободного падения соответственно. Направлению на север соответствует условие  $v > 0$ . Для сектора, ограниченного  $x_1$  и  $x_0$ , выражение (1) может быть записано следующим образом:

$$\Psi(y, p) = \frac{1}{(t_1 - t_0)} \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \int_0^p \frac{v(x, y, p', t)}{g} dp' dx dt. \quad (2)$$

В данной работе по выражению (2) были получены среднemesячные и среднегодовые оценки величины функции тока  $\Psi(y, \chi)$  и ее вихревой составляющей  $\Psi^*(y, \chi)$  как в изобарических координатах, так и в рамках энергетического подхода [2]. Анализ проводился для двух временных интервалов: в период интенсивного глобального потепления с 1976 по 1998 гг. и в период замедления темпов потепления в средних широтах с 1999 по 2014 г. [20].

Для этих же условий была проведена оценка адвективных и вихревых потоков тепла, рассчитываемых как  $q = -\mathbf{V}\nabla Q$  и  $q^* = -\mathbf{V}^*\nabla Q^*$  соответственно. Здесь  $\mathbf{V}$  – скорость ветра;  $Q$  – теплосодержание слоя атмосферы; символом «\*» обозначено отклонение от средней величины.

Выявление областей существования изэнтропических процессов, а также области трансформации энергии удобнее проводить не в изобарических координатах, поэтому при решении подобных задач проводился расчет функции тока в обобщенных координатах ( $\chi$ ). Например, при рассмотрении адиабатических процессов в сухом и влажном воздухе в [2] проводятся построения в координатах, которые позволяют следить за выполнением условия сохранения статической энергии сухого воздуха и скрытого тепла:  $\chi = c_p T + gz$  и  $\chi = Ls$ , где  $c_p$  – теплоемкость;  $L$  – теплота парообразования;  $s$  – удельная влажность,  $z$  – высота [2]. Для этой цели в выражение (2) вводилась единичная шаговая функция  $\mu(\chi(p) - \chi)$  ( $\mu$  – функция Хевисайда)

и проводилось интегрирование по всему столбу атмосферы в заданном диапазоне ( $\chi$ ). Полученные оценки функции тока  $\Psi(y, \chi)$  в [2] помогли определить области преобразований энергии и более четко выделить ячейки циркуляции.

Атмосферная циркуляция различных масштабов может приводить к разному вкладу в общую динамику возникающих возмущений, поэтому для расчета вихревой составляющей функции тока  $\Psi^*(y, \chi)$  использовались значения компонент, описывающих атмосферную (метеорологическую) изменчивость разных временных и пространственных масштабов [21]: синоптические — с периодом 2–7 сут и зональным волновым числом  $6 \leq k \leq 9$  (циклоны и антициклоны), и низкочастотные — с временными масштабами 10–30 сут и волновым числом  $4 \leq k \leq 6$  (блокирующие антициклоны). Величина изменчивости метеорологической величины соответствующего масштаба определялась с помощью полосового частотного фильтра с ослаблением 25 дБ в низкочастотной полосе поглощения и 40 дБ в высокочастотной области. Он основан на нерекурсивном фильтре с конечной импульсной характеристикой, использующим весовое окно Хемминга. Для устранения постоянного фазового сдвига отфильтрованные данные пропускались через фильтр в прямом и обратном направлениях.

Для определения силы связи между временными рядами рассчитывались коэффициенты корреляции Пирсона. Статистическая значимость полученных оценок определялась по двустороннему  $t$ -тесту нулевой гипотезы с  $\alpha = 0,05$  [22].

## Обсуждение результатов

Как было отмечено в предыдущем разделе, для сибирского сектора Северного полушария рассчитывались среднемесячные и среднегодовые оценки функции тока  $\Psi(y, p)$ , на основе которых проводился анализ пространственно-временных изменений циркуляционных ячеек для двух временных интервалов: 1976–1998 и 1999–2014 гг. Стоит отметить, что распределение среднегодовых оценок  $\Psi(y, p)$  в сибирском секторе повторяет тенденции распределения этих величин в Северном полушарии, полученных в работе [2].

На построенных картах распределений величины функции тока по меридиональным сечениям в отдельные месяцы достаточно отчетливо выделяются две ячейки тропосферной циркуляции — ЯХ и ЯФ (рис. 1). Характерной для определения положения границ ячеек была взята изолиния 30 Св (1 Св (свердруп) =  $10^6$  м<sup>3</sup>/с). Ее величина близка к используемой в [2] для выделения границ ячеек. Наименьшая величина в 15 Св совпадает с погрешностью вычислений. Шкала определяет диапазон изменения интенсивности соответствующих потоков. Значения интенсивности также нанесены на карту (рис. 1).

Стоит отметить, что циркуляция ЯФ практически полностью охватывает территорию Западной

Сибири. ПЯ выделяется лишь в зимние месяцы первого временного интервала. А уже в начале XXI в. происходит существенное уменьшение ее интенсивности на 15 Св, т.е. почти полное исчезновение ПЯ. В январе 1999–2014 гг. наблюдается также увеличение интенсивности ЯХ и ЯФ, при этом северная граница ЯФ сдвинулась на  $\sim 3^\circ$  в направлении полюса и на  $\sim 1^\circ$  в среднем за зимний сезон. Летом происходит уменьшение интенсивности циркуляции на  $\sim 10$  Св, сдвиг северной границы ЯФ в направлении экватора на  $\sim 7^\circ$ , а северной границы ЯФ на  $0,5^\circ$  в противоположном направлении; ПЯ, как уже было отмечено, не выделяется. Однако значимых изменений местоположения и интенсивности ячеек в начале XXI в. не обнаружено. Анализ  $\Psi(y, \chi)$  показал, что в зимние месяцы область потока влажного воздуха, движущегося в полярном направлении, переместилась аналогично ЯФ. Области трансформации энергии потоков зимой приходится на ЯФ и их размеры за последнее время увеличились на северной и южной границах. Летом трансформация энергии в потоках происходит в области ЯХ и южной части ЯФ.

Для того чтобы определить изменчивость атмосферных процессов синоптического и низкочастотного масштабов и их вклад в общую динамику меридиональных ячеек, рассчитывались вихревые функции тока  $\Psi^*(y, p)$  (см. рис. 1, а, б). Из-за разных значений волновых чисел для каждого масштаба в зонах ячеек атмосферной циркуляции располагаются несколько центров вихрей с разным направлением вращения. Наибольшее количество вихрей образуется на синоптическом масштабе в области ЯФ в июле, при этом в период 1999–2014 гг. этот процесс усилился. Был проведен также анализ распределения вихревой компоненты  $v^*$  синоптической изменчивости (СИ) в тропосфере сибирского сектора (не приводится), который выявил следующие особенности. В январе в начале XXI в. в верхней тропосфере полярной области, где  $v < 0$  (меридиональный перенос направлен в сторону экватора), значение  $|v|$  уменьшилось в 2 раза, зона переноса в полярном направлении расширилась до  $66^\circ$  с.ш., а на юге затронула ЯХ. При этом во все месяцы наблюдается увеличение интенсивности и количества центров вихревой циркуляции; в распределении вихревой функции тока  $\Psi^*(y, p)$  во всей тропосфере начинает просматриваться регулярная волновая структура (см. рис. 1, б). Выявленные закономерности в изменении интенсивности и расположения центров вихревой активности в первую очередь говорят о развитии меридиональных форм циркуляции в 1999–2014 гг. К тому же совместный анализ распределений  $\Psi^*(y, p)$  и компоненты  $v^*$  в тропосфере сибирского сектора в начале XXI в. выявил наличие похожей структуры для низкочастотной изменчивости (НИ) атмосферного переноса (рис. 1, в), что говорит об усилении процессов блокирования, которые, как правило, наблюдаются при развитии меридиональной циркуляции.

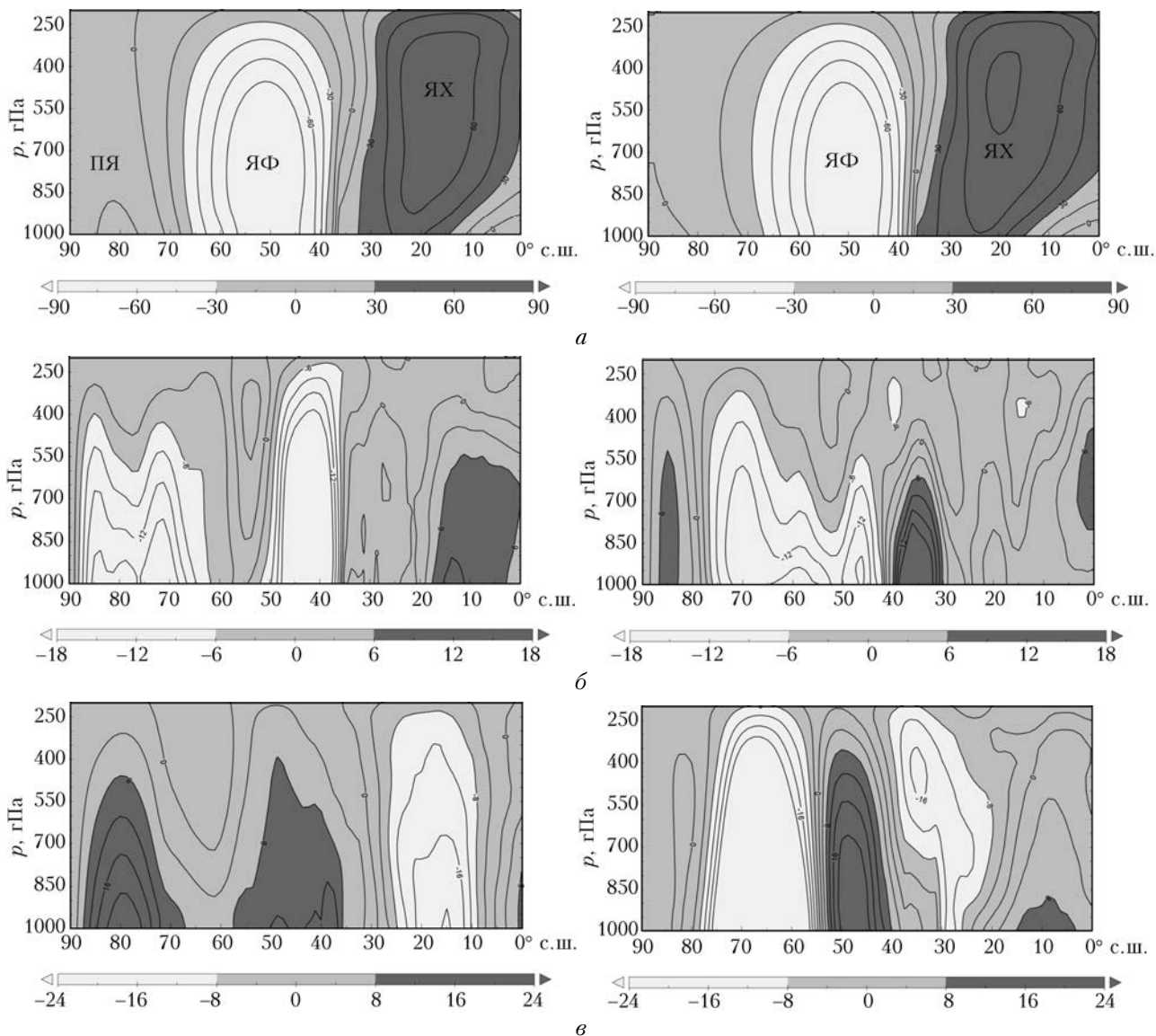


Рис. 1. Среднегодовые оценки функции тока  $\Psi(y, p)$ : а – средний поток, Св; б – поток синоптической изменчивости, мСв; в – поток низкочастотной изменчивости, мСв. Левая панель – 1976–1998 гг., правая панель – 1999–2014 гг.

Для расчета изменений интенсивности адвективных  $q$  и вихревых  $q^*$  потоков по модулям их значений для каждого месяца  $j$  определялись следующие величины ( $N$  – количество лет в заданном временном интервале):

$$M(y, p, j) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |q(y, p, j, t)|,$$

$$\Delta m(p, j) = \text{med}\{M(y, p, j)_2 - M(y, p, j)_1\}. \quad (3)$$

Разность между значениями, рассчитанными для двух временных интервалов  $M(y, p, j)$ , является эффективной оценкой изменений интенсивностей потоков  $\Delta m$ . Индексами 1 и 2 в (3) обозначены номера временных интервалов 1976–1998 и 1999–2014 гг. соответственно. Медианы распределений использовались для того, чтобы избежать влияния анома-

лий, возникающих, как правило, в ограниченном районе полюса. На рис. 2 представлены безразмерные величины интенсивности потоков, полученные путем нормировки на максимальное значение распределения  $\Delta m(p, j)$ . Из анализа рис. 2 следует, что величины  $\Delta m$  для адвективных потоков  $q$  в целом отрицательные, т.е. в период с 1999 по 2014 г. интенсивность меридиональных потоков тепла в сибирском секторе уменьшилась. Величины  $\Delta m$ , рассчитанные для вихревых потоков  $q^*$  СИ, имеют аналогичную тенденцию, а для НИ тенденция обратная – наблюдается наличие четких максимумов в положительной области значений. Таким образом, увеличение интенсивности потоков тепла для НИ свидетельствует об усилении процессов блокирования меридионального переноса (антициклонической циркуляции) в зимние месяцы в средней тропосфере (800–400 гПа), а летом и осенью – в верхней тропосфере.

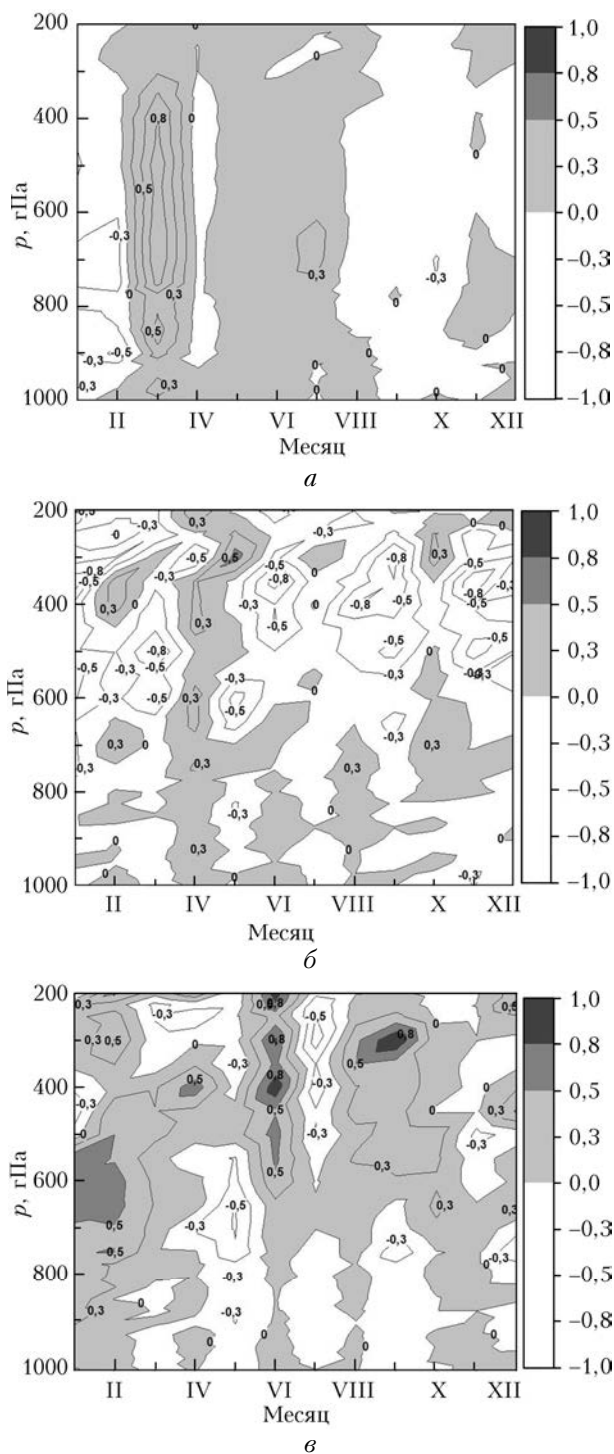


Рис. 2. Сезонные изменения оценок интенсивности потоков тепла: *a* – адвективный поток; *б* – вихревой поток синоптической изменчивости; *в* – вихревой поток низкочастотной изменчивости

Меридиональная циркуляция отвечает за межширотный перенос тепла и влаги, поэтому она будет оказывать влияние на характеристики атмосферной циркуляции регионального масштаба. Для выявления связи между ячейками циркуляции и потоками тепла в каждом узле реанализа в тропосфере сибирского сектора для двух выбранных

временных интервалов рассчитывались ковариации и коэффициенты корреляции.

Области с наибольшими по величине значениями коэффициентов корреляции ( $|r| > 0,5$ ) приходятся на ячейки циркуляции. В период 1999–2014 гг. в среднем за год в районе ЯФ наблюдалось сокращение области значимых коэффициентов корреляции и одновременно увеличение  $|r|$  до  $\sim 0,8$  в центре ЯФ и на границе с ЯХ, а также уменьшение  $|r|$  до 0,25 или отсутствие связи в ЯХ (рис. 3). При этом в зимние месяцы наблюдается ослабление связи в ЯФ во всей тропосфере и увеличение  $|r|$  на границе ЯФ и ЯХ ( $30^\circ$  с.ш.). Летом существенных изменений в положении и интенсивности ячеек не произошло.

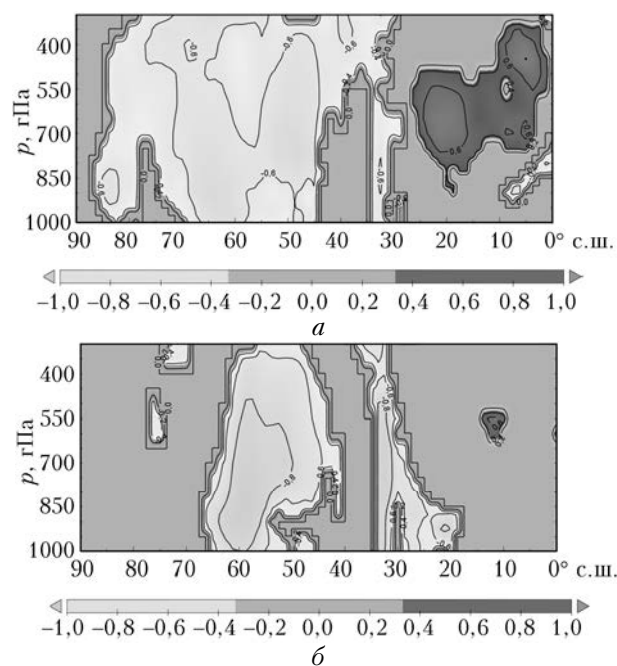


Рис. 3. Среднегодовые оценки коэффициентов корреляции  $r$  функции тока  $\Psi(y, \chi)$  и меридионального потока тепла  $q$  (направление на полюс): *a* – за 1976–1998 гг.; *б* – за 1999–2014 гг.

Аналогичные выводы можно сделать и для областей ковариаций. Для удобства анализа оценки ковариации были нормированы на максимальное значение, в результате чего были получены безразмерные величины. При этом анализ среднегодовых оценок ковариаций составляющих меридионального потока тепла, направленного на полюс, в период 1976–1998 гг. выявил отрицательную связь с изменением температуры в тропосфере от  $45^\circ$  с.ш. до  $75^\circ$  с.ш. и более обширную положительную с изменением скорости ветра. Во втором временном интервале 1999–2014 гг. область максимальных значений ковариаций, как с температурой, так и с величиной скорости ветра, становится более узкой ( $45^\circ$ – $60^\circ$  с.ш.) и смещается к югу, при этом образуется второй максимум в районе  $30^\circ$  с.ш. Что касается среднемесячных оценок ковариаций, то в начале XXI в. в зимние месяцы ковариационная связь

ослабевает, а однородность ее пространственного распределения нарушается — на границах ячеек появляются обособленные области максимальных/минимальных значений (рис. 4).

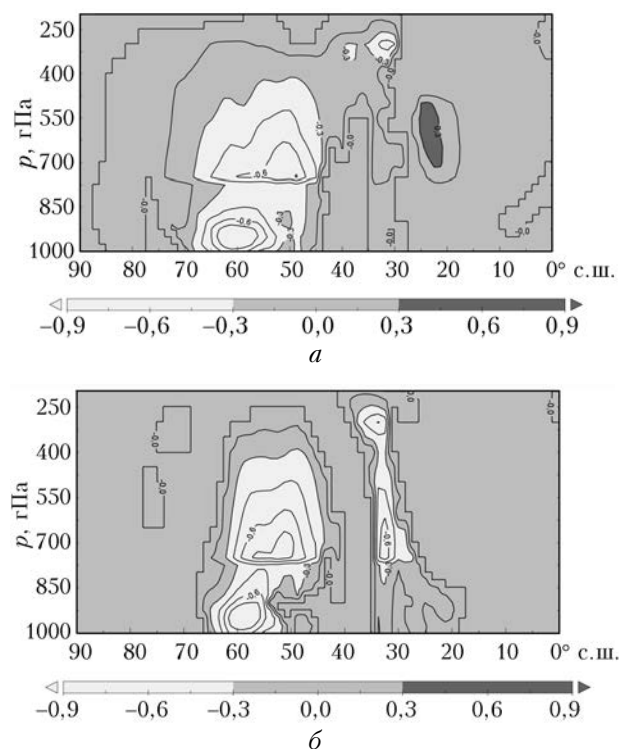


Рис. 4. Ковариации функции тока  $\Psi(y, \chi)$  и меридионального потока тепла  $q$ , направленного на полюс в январе: а — 1976–1998 гг.; б — 1999–2014 гг.

Полученные особенности в распределении коэффициентов корреляции и ковариаций указывают на развитие меридиональных форм циркуляции в начале XXI в.

### Заключение

Таким образом, проведен анализ пространственно-временных изменений циркуляционных ячеек для сибирского сектора Северного полушария для двух временных интервалов: 1976–1998 и 1999–2014 гг. Выявлено, что наиболее существенные изменения наблюдаются в зимний сезон: в начале XXI в. произошло почти полное исчезновение ПЯ и увеличение интенсивности ЯХ и ЯФ, при этом северная граница ЯФ сдвинулась на  $\sim 1^\circ$  в направлении полюса. Эти результаты подтверждают выводы, полученные в [2, 3] для других массивов данных с помощью других способов фильтрации. К тому же в зимний период в среднем для сибирского сектора наблюдается уменьшение интенсивности адвективных меридиональных потоков тепла. При этом уменьшается величина вихревого потока синоптической изменчивости (циклонических вихрей) и, наоборот, увеличивается интенсивность низкочастотной изменчивости (антициклонических вихрей). Корреляционный и ковариационный анализы

выявили, что во втором временном интервале связь между функцией тока и интенсивностью меридионального потока тепла ослабевает, а однородность ее пространственного распределения нарушается. Это говорит о развитии меридиональных форм циркуляции в начале XXI в.

В период ослабления глобального потепления, характеризующегося уменьшением межширотного градиента, во все месяцы наблюдается увеличение интенсивности и количества центров вихревой циркуляции, что приводит к развитию меридиональной циркуляции, усилению процессов блокирования и, как следствие, уменьшению меридионального притока тепла с юга сибирского сектора на территорию Сибири в начале XXI в.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-60088 мол\_а\_дк.

1. Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. Элементы общей циркуляции и распределение влагозапаса атмосферы Земли. Препр. // ИКИ РАН (Москва). 2008. № 2144. 72 с.
2. Döös K., Nilsson J. Analysis of the meridional energy transport by atmospheric overturning circulations // J. Atmos. Sci. 2011. V. 68. P. 1806–1819.
3. Grotjahn R. Global atmospheric circulations: observation and theories. New York: Oxford University Press, 1993. 430 p.
4. Chang E.K.M. Mean meridional circulation driven by eddy forcing of different timescale // J. Atmos. Sci. 1996. V. 53, N 1. P. 113–125.
5. Wang C. Atlantic climate variability and its associated atmospheric circulation cells // J. Climate. 2002. V. 15, N 13. P. 1516–1536.
6. Huang Fei Zhou, Faxiu England, Matthew H. Atmospheric circulation associated with anomalous variations in North Pacific wintertime blocking // Mon. Weather Rev. 2004. V. 132, N 5. P. 1049–1064.
7. Holton J.R. An introduction to dynamic meteorology. 4th ed. International geophysics series. San Diego: Academic Press, 2004. V. 88. 535 p.
8. Johanson C.M., Fu Q. Hadley cell widening: Model simulations versus observations // J. Climate. 2009. V. 22, N 10. P. 2713–2725.
9. Schwendike J., Berry G.J., Reeder M.J., Jakob C., Govekar P., Wardle R. Trends in the local Hadley and local Walker circulations // J. Geophys. Res. A. 2015. V. 120, N 15. P. 7599–7618.
10. Dima I.M., Wallace J.M. On the seasonality of the Hadley cell // J. Atmos. Sci. 2003. V. 60, N 12. P. 1522–1527.
11. Kim Y.-H., Kim M.-K., Lau W.K.M., Kim K.-M., Cho C.-H. Possible mechanism of abrupt jump in winter surface air temperature in the late 1980s over the Northern Hemisphere // J. Geophys. Res. A. 2015. V. 120, N 24. P. 12474–12485.
12. Huang J., McElroy M.B. Contributions of the Hadley and Ferrel circulations to the energetics of the atmosphere over the past 32 years // J. Climate. 2014. V. 27, N 7. P. 2656–2666.
13. Holopainen E.O. On the role of mean meridional circulations in the energy balance of the atmosphere // Tellus. 1965. V. 17, N 3. P. 285–294.
14. Yamada R., Pauluis O. Annular mode variability of the atmospheric meridional energy transport and circulation // J. Atmos. Sci. 2015. V. 72, N 3. P. 2070–2089.

15. Wang L., Wang Z., Li J., Zheng F. The impact of extratropics-arctic-seesaw of perturbation potential energy on surface air temperature in boreal winters // *Atmos. Sci. Lett.* 2015. V. 16, N 4. P. 425–431.
16. Haigh J.D., Blackburn M., Day R. The response of tropospheric circulation to perturbations in lower-stratospheric temperature // *J. Climate.* 2004. V. 18, N 17. P. 3672–3685
17. Итолитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Поднебесных Н.В., Харюткина Е.В. Изменчивость температурного режима на азиатской территории России в период глобального потепления // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 2. С. 122–131.
18. Stachnik J.P., Schumacher C. A comparison of the Hadley circulation in modern reanalyses // *J. Geophys. Res.* A. 2011. V. 116. D22102. DOI: 10.1029/2011JD016677.
19. Kobayashi S., Ota Y., Harada Y., Ebata A., Moriya M., Onoda H., Onogi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo H., Miyaoka K., Takahashi K. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics // *J. Meteorol. Soc. Jap. Ser. II.* 2015. V. 93, N 1. P. 5–48.
20. Trenberth K.E., Fasullo J.T. An apparent hiatus in global warming? // *Earth's future.* 2013. N 1. P. 19–32.
21. Blackmon M.L., Lee Y-H., Wallace J.M. Horizontal structure of 500 mb height fluctuations with long, intermediate and short time scales // *J. Atmos. Sci.* 1984. V. 41, N 6. P. 961–980.
22. von Storch H., Zwiers F.W. *Statistical analysis in climate research.* Cambridge: Cambridge University Press, 2003. P. 484.

***S.V. Loginov, E.I. Moraru, E.V. Kharyutkina. The relationship of tropospheric circulation cells with variability of meridional heat fluxes over the territory of Siberia.***

In this study, the research of spatiotemporal changes of meridional circulation cells over the Siberian sector in the Northern hemisphere was carried out using reanalysis data over two time intervals: the period of intensive global warming 1976–1998 and the period of its slowdown 1999–2014. It was revealed that the most significant changes are observed in winter season in the beginning of XXI century: almost complete disappearance of the polar cell and intensification of Hadley and Ferrell cells was revealed. Tendencies in the changes of advective and eddy meridional heat fluxes and their relationship with stream function were also obtained and analyzed. Thus, there is the intensification of eddy circulation and the increase of the number of its centers in all months over the period of global warming weakening. It leads to meridional circulation development, strengthening of blocking processes, and, therefore, to the decrease of meridional heat fluxes in the Siberian sector in the beginning of XXI century.