

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.508:551.589

## Изменение синоптического режима Томска в конце XX – начале XXI в.

Т.К. Складнева, Б.Д. Белан, Т.М. Рассказчикова, В.Г. Аршинова\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 21.06.2018 г.

Представлен анализ синоптических процессов, наблюдавшихся в районе г. Томска с 1993 по 2016 г. Показано, что на территории Томской области за последнее десятилетие существенно уменьшилась разница между повторяемостью циклонов и антициклонов. Прослеживаются тенденция снижения вторжения арктических воздушных масс и рост поступления в регион субтропического и тропического воздуха.

*Ключевые слова:* синоптические процессы, циклон, антициклон, воздушная масса; synoptic process, cyclone, anticyclone, air mass.

### Введение

В последние десятилетия заметное изменение климата из-за возможных катастрофических последствий для окружающей среды, оцениваемых в 20 трлн долл. [1], обсуждается международным сообществом на уровне ООН [2, 3]. Потепление проявляется в Северном полушарии, в первую очередь в Сибири, Приморье и на европейской территории России, в полях температуры и осадков [3–5]. По данным [6], постепенное увеличение температуры воздуха на территории России зафиксировано уже в конце XIX в. Исследования показали, что потепление обусловлено рядом причин, в том числе изменением крупномасштабной атмосферной циркуляции [7, 8].

В [9] отмечено, что с 1899 г. в Северном полушарии наблюдались три циркуляционные эпохи: две меридиональные (с 1899 по 1915 г. и с 1957 г. по настоящее время) и одна зональная (1916–1956 гг.). Меридиональные эпохи различаются между собой преобладанием различных групп циркуляции. В меридиональную северную эпоху (в начале XX в.) годовая продолжительность блокирующих процессов была выше средней за 1899–2012 гг., т.е. в средние широты перемещались арктические антициклоны и их гребни. С 1957 г. началась меридиональная южная эпоха. В ней в 2,5 раза продолжительнее средней оказались выходы южных циклонов. Вторая меридиональная эпоха подразделяется на следующие периоды: в 1957–1969 гг. положительными отклонениями от средней отличались обе меридиональные группы циркуляции, в дальнейшем — меридиональная южная, хотя в 1970–1980 гг. продолжи-

тельность обобщенной зональной группы была на уровне средней. В 1981–1997 гг. отмечается стремительный рост продолжительности выходов южных циклонов, а с 1998 г. — ее уменьшение. С этого же времени начинается новый рост суммарной годовой продолжительности блокирующих процессов. Начиная с 1998 г. в Северном полушарии уменьшение суммарной годовой продолжительности выходов южных циклонов сопровождается быстрым ростом (6,4 дня в год) продолжительности блокирующих процессов преимущественно на континентах зимой и летом. В среднем по полушарию при сохранении больших среднемесячных июльских аномалий положительные январские аномалии уменьшились, т.е. выросла годовая амплитуда температуры. Важным изменением в атмосферной циркуляции последних десятилетий является повышение повторяемости блокирующих процессов и их интенсивности [10–12], с которыми связаны значительные климатические аномалии — экстремальные морозы зимой и засухи летом. Определяющую роль в годовом ходе числа блокингов в Европейско-Азиатском секторе (Россия) играют летние блокинги. Эпизоды блокирования связаны с меридиональными формами циркуляции, повторяемость которых в последние годы увеличивается, как и повторяемость блокирующих процессов [13–15].

Изменчивость климата отдельных регионов в целом обуславливается повторяемостью крупномасштабных атмосферных вихрей: циклонов (Zn), сопровождающихся осадками и сменой воздушных масс, а также антициклонов (Azn), обеспечивающих длительные периоды устойчивой погоды [16, 17]. В работах [18, 19] исследованы характеристики циклонов и антициклонов (число, давление в центре и продолжительность воздействия), определяющих погоду на территории Западной Сибири (50–70° с.ш., 60–110° в.д.) в 1976–2011 гг. Показано, что число

\* Татьяна Константиновна Складнева (tatyana@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru).

циклонов, определяющих климатические условия Сибири, больше, чем число антициклонов. Общее число циклонов возрастает (1,3 события/10 лет), а антициклонов — уменьшается (–0,4 события/10 лет). В 2008–2011 гг. циклоны стали более глубокими, а антициклоны — менее интенсивными. Если в 1976–2006 гг. средняя многолетняя продолжительность влияния единичного циклона составляла 2,9 сут ( $\sigma = 1,4$ ), антициклона — 2,4 сут ( $\sigma = 2,5$ ) [18], то в 1976–2011 гг. средняя продолжительность пребывания циклонов на территории Сибири составила 7 сут, антициклонов — 11 сут [19].

Проблема глобального изменения климата приводит к необходимости всестороннего изучения динамики как можно большего числа геофизических параметров и их интерпретации с привлечением синоптической информации, которая позволяет учитывать не только адвективный перенос, но и трансформацию атмосферных процессов.

Настоящее исследование является продолжением ранее выполненных работ. В [20] мы впервые рассмотрели особенности атмосферной циркуляции в районе г. Томска в 1993 г. Затем в [21] проанализировали синоптические процессы, наблюдавшиеся в этом же регионе с 1993 по 2004 г. В настоящей работе проведен анализ межгодовой изменчивости барических образований, а также типов воздушных масс в районе г. Томска в 1993–2016 гг.

## Исходные данные

Для анализа синоптического режима Томска в 1993–2016 гг. использована синоптическая база данных [22], содержащая ежечасную информацию о количестве общей и нижней облачности, форме облаков, погодных условиях (наличие осадков и атмосферных явлений), а также синоптических ситуациях, в которые включаются тип воздушной массы и характерные термобарические элементы. База данных пополняется по результатам ежедневной обработки приземных синоптических карт и карт барической топографии с использованием типизации синоптических ситуаций [23]. Данная классификация состоит из нескольких уровней:

1. Все ситуации делятся по генетическому признаку — происхождению воздушной массы, наблюдаемой в конкретном географическом районе. Для территории России такими воздушными массами являются: арктическая, умеренная, субтропическая и тропическая, которые в зависимости от района формирования и дальнейшей трансформации подразделяются еще на три подтипа: морскую, континентальную и старую. Следовательно, на первом уровне классификации выделяются 4 типа или 12 подтипов, которые уточняются на втором уровне классификации.

2. В имеющемся термобарическом поле выделяются характерные элементы: циклоны, антициклоны, фронтальные разделы, а также гребни (область повышенного давления между двумя областями пониженного давления), ложбины (область пониженного давления, расположенная между двумя областями повышенного давления), седловины (область,

заклученная между двумя накрест лежащими циклонами и двумя антициклонами), малоградиентные поля и контрастные зоны, возникающие в поле давления без заметного скачка температуры.

3. Так как все синоптические объекты имеют трехмерный вид и характеризуются определенной вертикальной и горизонтальной протяженностью, то естественно, что в их отдельных частях будут иметься отклонения от общих характеристик. Поэтому элементы второго уровня типизации подразделяются на следующие части: тыл, центр, передняя часть, ось, север, северо-восток, восток, юго-восток, юг, юго-запад, запад, северо-запад, ось растяжения, ось сжатия, а для малоградиентного поля — пониженное и повышенное.

Повторяемость определенной ситуации ( $P$ , %) рассчитывалась как отношение количества часовых интервалов с конкретными условиями к числу случаев за весь период. В результате учитывается продолжительность данных синоптических условий, а не их число.

## Результаты

На рис. 1 показана межгодовая изменчивость повторяемости основных синоптических образований в Томске.

За период с 1993 по 2016 г. в Томске повторяемость циклонов и антициклонов составила 15,3 и 20,1% соответственно, контрастных зон — 10,4%, ложбин и гребней — 19,6 и 12,6%, малоградиентных полей — 14,4 и седловин — 5,6%. Из рис. 1 видно, что повторяемость циклонов и антициклонов меняется от года к году. Циклонические условия чаще всего наблюдались в 1993–2002 гг. ( $P = 14,3–27,7\%$ ). В 2003–2011 гг. повторяемость циклонов была минимальной (9–11,7%), а в 2012–2016 гг. увеличилась и колебалась от 12,1 до 17,4%. Аналогичные тенденции прослеживаются и для антициклонов. Высокая повторяемость  $A_{zn}$  в 1993–2004 гг. (17,6–30,9%) сменилась минимумом в 2005 и 2006 гг. (12,2 и 11,9% соответственно) и вновь возросла до 17,4% в 2007–2016 гг. Следует также отметить, что в 1993–2003 гг. антициклонические условия наблюдались значительно чаще, чем циклонические. В последние годы это разницы существенно сократилась, а в 2015 и 2016 гг. повторяемость  $Z_n$  и  $A_{zn}$  была практически одинаковой.

Из рис. 1 также следует, что в период 2003–2016 гг. на 10% возросла повторяемость гребней и на 20% чаще, по сравнению с 1993–2002 гг., стали наблюдаться ложбины. Повторяемость седловин сохраняется на уровне 5% практически в течение всего исследуемого периода. Малоградиентные поля встречаются чаще и колеблются в пределах 10–20%, а контрастные зоны — от 9 до 15% в 1993–2002 гг. и в пределах 10% в последующие годы.

Отметим, что годовой ход повторяемости циклонов слабо выражен (рис. 2, *a*), а повторяемости антициклонов имеет более выраженный характер с максимумом в апреле (26,8%) и минимумом, как и у циклона, в июле. С наступлением тепла в мае

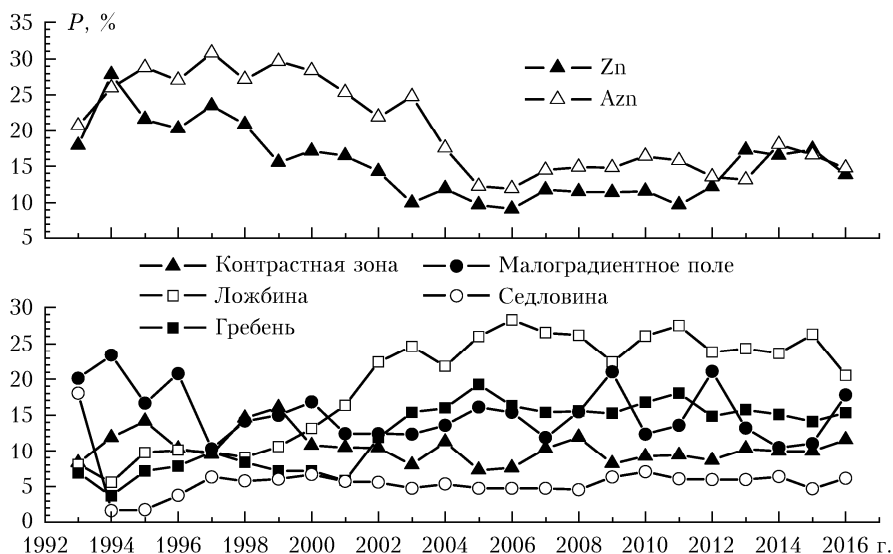


Рис. 1. Многолетний ход повторяемости синоптических образований

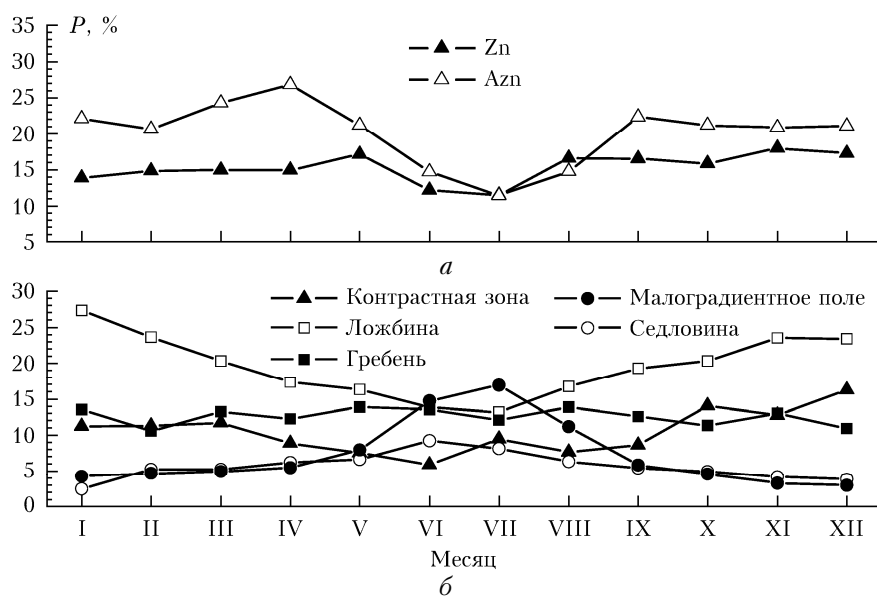


Рис. 2. Годовой ход повторяемости циклонов и антициклонов (а), других синоптических объектов (б) в Томске (1993–2016 гг.)

повторяемость Azn заметно падает и достигает своего минимума в июле с последующим ростом в сентябре до 22,3%.

Из рис. 2, б видно, что повторяемость контрастных зон в районе Томска достигает максимальных значений в холодное полугодие, а минимальных — в июне (5,8%). Ложбины реже всего наблюдаются в летнее время, в июле повторяемость составляет 13,2% и достигает максимальных значений в январе 27%. Повторяемость гребня в среднем составляет 12,5%. Малоградиентные поля имеют максимальную повторяемость в летний период. Это объясняется тем, что планетарные контрасты температур смещаются на север и высотно-фронтальные зоны чаще наблюдаются севернее г. Томска.

Томск находится на территории Западной Сибири, которая расположена в умеренных и частично

в высоких широтах северо-запада Азии и подвержена всем флуктуациям общей циркуляции атмосферы Северного полушария. Из-за особенностей рельефа регион доступен как арктическим, так и тропическим воздушным массам, что создает благоприятные условия для интенсивного развития атмосферных процессов [24].

Для региона Западной Сибири, в зависимости от траектории перемещений, можно выделить три типа циклонов: западные, южные и северные («ныряющие»). Западные циклоны, формирующиеся на волнах арктического и полярного фронтов, часто образуют серию, в которой каждый последующий перемещается несколько южнее предыдущего, и в конце каждой серии проходят антициклон или его гребень. «Ныряющие» циклоны образуются на арктическом фронте при сильно развитых меридиональных процессах.

Такие циклоны наблюдаются в том случае, когда высотная фронтальная зона образует над Уралом блокирующий гребень и по его восточной периферии они из Арктики опускаются на территорию Западной Сибири вплоть до южных районов. Траектория этих образований зависит от ориентации оси гребня. Если ось имеет северное или северо-западное направление, то вторжение циклонов называется полярным, а если северо-восточное — ультраполярным. Эти процессы характерны для холодного полугодия. Летом они практически не наблюдаются. С циклонической деятельностью на полярном фронте связаны выходы южных циклонов. Основной особенностью термобарического поля, необходимого для выхода южного циклона, является наличие глубокой ложбины, ориентированной в районы Черного, Каспийского или Аральского морей. Кроме того,

на территории Западной Сибири часто происходит образование местных циклонов и антициклонов [25].

Результаты анализа синоптических ситуаций за исследуемый период показывают, что большая часть циклонов проходила севернее Томска. Наблюдалось преобладание западных траекторий циклонов, что подтверждается максимальной повторяемостью в г. Томске южной или юго-восточной части циклонов (рис. 3, *a*). Видно, что реже всего наблюдается северо-восточная часть циклона, т.е. в течение исследуемого периода вероятность перемещения через Томск «ныряющих» циклонов минимальна.

При рассмотрении годового хода траекторий циклонов обращает на себя внимание то, что в течение всего года сохраняется преобладание северных траекторий. И только в июле почти равновероятны пути этих образований как севернее, так и южнее города.

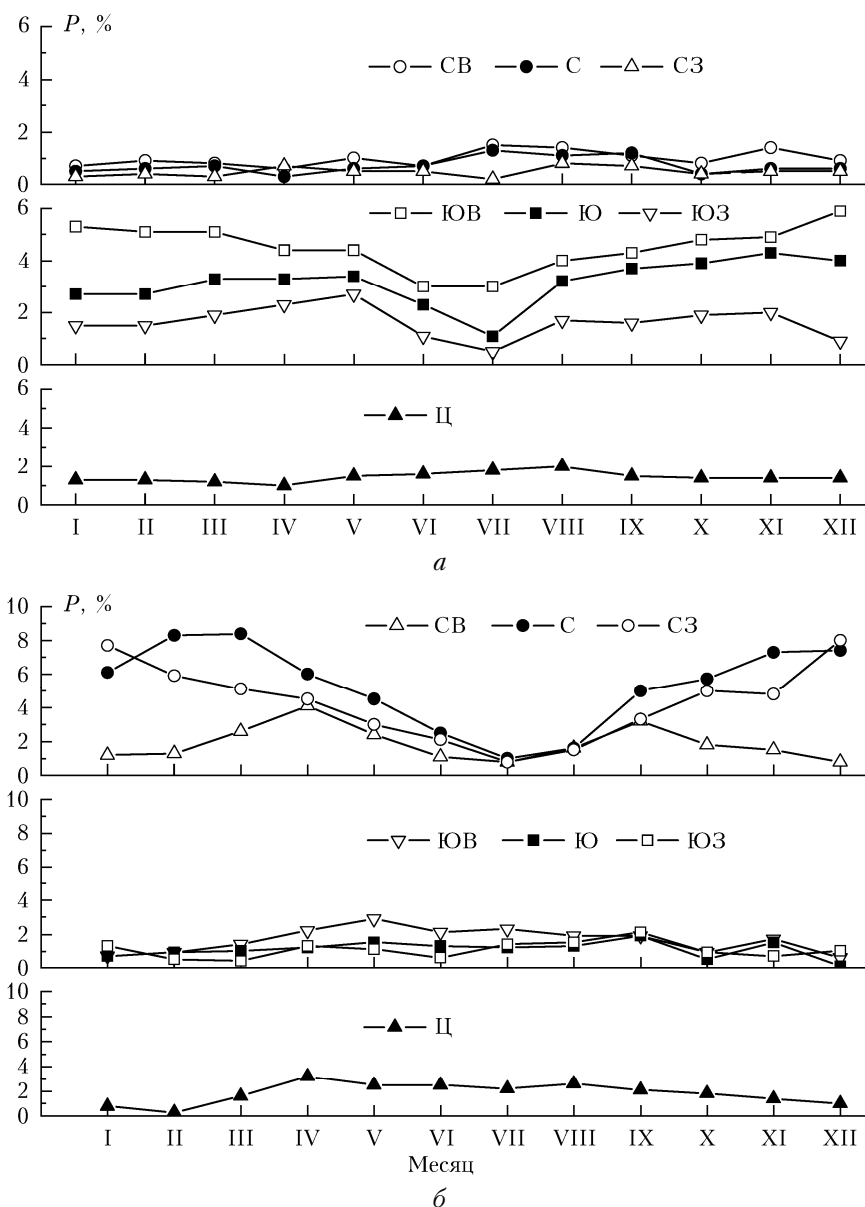


Рис. 3. Повторяемость частей циклона (*a*), антициклона (*б*) в Томске (Ц — центр)

Траектории антициклонов за 1993–2016 гг. проходили большей частью южнее либо непосредственно через исследуемый регион (рис. 3, б). Такие ситуации обычно наблюдаются при преобладании в Томске Сибирского антициклона. Траектории, проходящие севернее, наблюдаются реже, но все равно почти в 2 раза чаще, чем траектории циклонов, проходящие к югу от Томска.

Основное влияние на температурный режим региона оказывают поступающие воздушные массы. На рис. 4 представлена межгодовая изменчивость повторяемости типов воздушных масс в течение всего исследуемого периода.

Из рис. 4, а видно, что наблюдается тенденция снижения поступления в наш регион арктической воздушной массы и роста повторяемости субтропического воздуха: за последние 10 лет она увеличилась в среднем на 12,5%. Следует отметить, что в 2011–2016 гг. частота вторжения субтропического и арктического воздуха в район Томска была практически одинаковой (22–30%). Повторяемость умеренной воздушной массы колебалась в пределах 32–53%. В последнее десятилетие в нашем регионе чаще стала наблюдаться тропическая воздушная масса. Максимальная ее повторяемость (5,8%) отмечена в 2015 г.

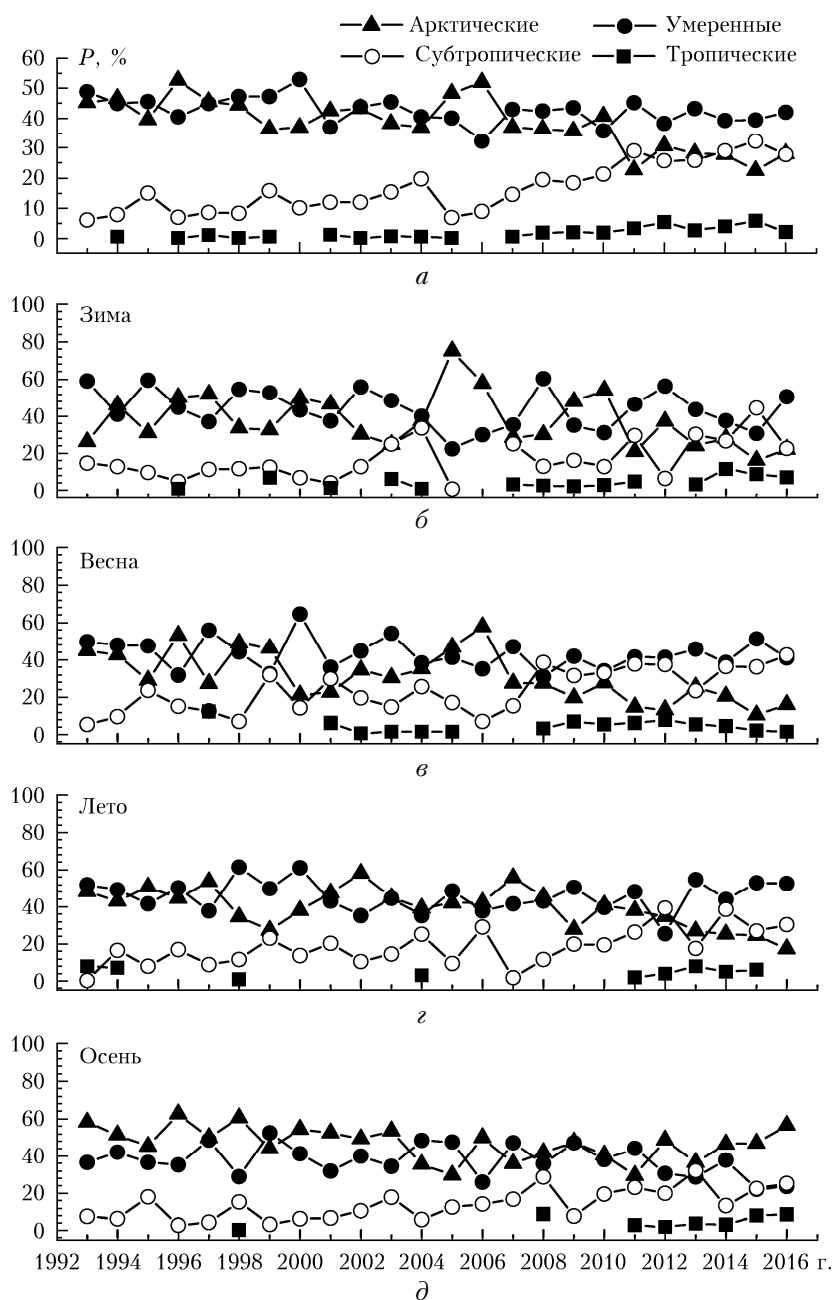


Рис. 4. Многолетний ход повторяемости типов воздушных масс в районе Томска: год (а), зима (б), весна (в), лето (з), осень (д)

Над Томском до 2008 г. преобладали арктическая (26–58%) и умеренная воздушные массы (30–60%) во все сезоны года (рис. 4, б–д). С 2008 г. картина несколько изменилась. Тенденция снижения вторжения арктической воздушной массы и рост повторяемости субтропической массы наиболее ярко проявляются в весенне-летний период (см. рис. 4, в, з). Особенно заметно возросла частота поступления субтропического воздуха в марте (42–60%) и апреле (22–53%). Вторжения тропического воздуха до 2008 г. во все сезоны фиксировались единичными случаями, а с 2008 г. вероятность поступления тропического воздуха возросла. Так, в зимний период повторяемость вторжения тропического воздуха менялась от 2,2% (2009 г.) до 11,5% (2014 г.) (см. рис. 4, б). В весенний период частота вторжений тропического воздуха составила в среднем 5%, а в отдельные годы возросла до 8% в марте (2010 г.), до 18% в апреле (2012 г.) и до 12% в мае (2011 г.). В летний период отмечены единичные случаи вторжения тропической воздушной массы. В осенний период поступление тропической массы стало наблюдаться с 2011 г.: с 2011 по 2014 г. — 3,5%, а в 2015–2016 гг. — 8,5% (см. рис. 4, д).

### Заключение

С 1993 по 2016 г. в Томске повторяемость циклонов составила 15,3%, антициклонов — 20,1%, контрастных зон — 10,4%, ложбин — 19,6%, гребней — 12,6%, малоградиентных полей — 14,4 и седловин — 5,6%. При этом повторяемость циклонов и антициклонов меняется от года к году. Циклонические условия чаще всего наблюдались в 1993–2002 гг. ( $P = 14,3–27,7\%$ ). Высокая повторяемость антициклонов отмечена в 1993–2004 гг. (17,6–30,9%). В последующие годы разница существенно сократилась и в 2015 и 2016 гг. повторяемость стала практически одинаковой. В 2003–2016 гг. на 10% возросла повторяемость гребней и на 20% чаще стали наблюдаться ложбины по сравнению с 1993–2002 гг. Малоградиентные поля также встречаются чаще и их повторяемость колеблется в пределах 10–20%.

До 2008 г. в регионе преобладали арктическая (26–58%) и умеренная воздушные массы (30–60%) во все сезоны года. С 2008 г. наметились тенденция снижения вторжения арктических воздушных масс и рост повторяемости субтропических. С 2008 г. также возросла вероятность поступления тропического воздуха.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-17-01095).

1. *Burke M., Davis W.M., Diffenbaugh N.S.* Large potential reduction in economic damages under UN mitigation targets // *Nature*. 2018. V. 557, N 7706. P. 549–553.
2. *IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.V. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.).

Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge University Press, 2007. 996 p.

3. *IPCC, Climate change 2013: The Physical Science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
4. *Liu C.* Severe weather in a warming climate // *Nature*. 2017. V. 544, N 7651. P. 422–423.
5. *Siepielski A.M., Morrissey M.B., Buoro M., Carlson S.M., Caruso C.M., Clegg S.M., Coulson T., DiBattista J., Gotanda K.M., Francis C.D., Hereford J., Kingsolver J.G., Augustine K.E., Kruuk L.E.B., Martin R.A., Sheldon B.C., Sletvold N., Svensson E.I., Wade M.J., MacColl A.D.C.* Precipitation drives global variation in natural selection // *Science*. 2017. V. 355, N 6328. P. 959–962.
6. *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. М.: Росгидромет, 2014. 235 с.
7. *Coumou D., Lehmann J., Beckmann J.* The weakening summer circulation in the Northern Hemisphere mid-latitudes // *Science*. 2015. V. 348, N 6232. P. 324–327.
8. *Попова В.В.* Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции // *Фундам. и прикл. климатол.* 2018. № 1. С. 84–111.
9. *Кононова Н.К.* Изменения циркуляций атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // *Фундам. и прикл. климатол.* 2015. № 1. С. 133–162.
10. *Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Девятова Е.В., Зоркальцева О.С.* Атмосферные блокинги в Западной Сибири. Часть I: Особенности обнаружения, объективные критерии и их сравнение // *Метеорол. и гидрол.* 2017. № 10. С. 29–39.
11. *Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Девятова Е.В., Мартынова Ю.В.* Атмосферные блокинги в Западной Сибири. Часть II: Долговременные вариации и их связь с климатической изменчивостью в Азии // *Метеорол. и гидрол.* 2018. № 3. С. 16–27.
12. *Rennert K.J., Wallace J.M.* Cross-frequency coupling, skewness and blocking in the Northern Hemisphere winter circulation // *J. Clim.* 2009. V. 22. P. 5650–5666.
13. *Мохов И.И.* Особенности формирования легкой жары 2010 г. на европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2011. Т. 47, № 6. С. 709–716.
14. *Cheung H.N., Zhou W., Mok H.Y., Wu M.C., Shao Y.* Revisiting the climatology of atmospheric blocking in the Northern Hemisphere // *Adv. Atmos. Sci.* 2013. V. 30, N 2. P. 397–410.
15. *Barriopedro D., Garcia-Herrera R., Lupo A.R., Hernandez E.* A climatology of Northern Hemisphere blocking // *J. Clim.* 2006. V. 19. P. 1042–1063.
16. *Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф.* Особенности изменчивости циклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, связанные с ведущими модами атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе // *Фундам. и прикл. климатол.* 2015. № 2. С. 14–40.
17. *King M.P., Kucharski F., Molteni F.* The roles of external forcings and internal variabilities in the Northern Hemisphere atmospheric circulation change from the 1960s to the 1990s // *J. Clim.* 2010. V. 23. P. 6200–6220.
18. *Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Логинов С.В., Поднебесных Н.В.* Исследование циклонической и анти-

- циклонической активности на территории Западной Сибири по данным реанализа NCEP/DOE AMIP-II и синоптических карт // *Оптика атмосф. и океана*. 2009. Т. 22, № 1. С. 38–41.
19. *Поднебесных Н.В., Ипполитов И.И.* Характеристики циклонов и антициклонов над Сибирью в конце XX в. – начале XXI в. // *Метеорол. и гидрол.* 2017. № 4. С. 27–37.
  20. *Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М.* Результаты климато-экологического мониторинга на ТОР-станции. Ч. 1. Синоптический режим и метеорологические параметры // *Оптика атмосф. и океана*. 1995. Т. 8, № 5. С. 732–738.
  21. *Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Складнева Т.К.* Синоптический режим Томска за 1993–2004 гг. // *Оптика атмосф. и океана*. 2005. Т. 18, № 10. С. 887–892.
  22. *Складнева Т.К., Рассказчикова Т.М., Аршинова В.Г.* Синоптическая база Томска // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013620769 от 1 июля 2013 г. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
  23. *Прогноз и контроль оптико-метеорологического состояния атмосферы* / под ред. Г.О. Задде. Томск: ТФ СО АН СССР, 1982. 153 с.
  24. *Руководство по краткосрочным прогнозам погоды*. Ч. 2. Урал и Сибирь. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 198 с.
  25. *Бордовская Л.И., Цыбульский А.Е.* Повторяемость и скорость движения циклонов и антициклонов над Западной Сибирью // *Вопросы географии Сибири*. 1974. Вып. 7. С. 64–98.

*T.K. Sklyadneva, B.D. Belan, T.M. Rasskazchikova, V.G. Arshinova. Change in the synoptic regime of Tomsk in the late XX – early XXI centuries.*

Synoptic processes observed in Tomsk region between 1993 and 2016 are analyzed. A significant decrease in the difference in the frequency of cyclones and anticyclones over the past decade is revealed. There is a tendency to decline in the frequency of Arctic air mass invasion and growth of subtropical and tropical ones.