

О.П. ОСИПОВА*, Э.Ю. ОСИПОВ**

*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, olga@irigs.irk.ru

**Лимнологический институт СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия, eduard@lin.irk.ru

ВЛИЯНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ЛЕДНИКОВОЙ ЗОНЫ ХРЕБТА КОДАР В ПЕРИОД АБЛЯЦИИ

Представлены результаты анализа крупномасштабных атмосферных процессов (с использованием данных реанализа NCEP/NCAR) и метеорологических характеристик, измеренных в ледниковой зоне хр. Кодар в период абляции (июль–август) 2019 г. Установлено, что метеорологический режим ледника формировался на фоне выраженной положительной аномалии высоты геопотенциала в нижней тропосфере (700 и 500 нПа) над территорией Восточной Сибири. Квазициклические колебания температуры воздуха и скорости ветра, выявленные на леднике (с периодом в 12–13 сут), хорошо коррелируют с волновым характером прохождения гребней и ложбин над районом исследования. Выявлено, что высокие скорости абляции на леднике были связаны с антициклонами и блокирующими гребнями субтропического происхождения, а низкие — с циклонами и малоградиентными полями давления.

Ключевые слова: ледники, метеорологический режим, циркуляция атмосферы, блокирующие процессы, аномалии метеопараметров.

О.Р. OSIPOVA*, E.Yu. OSIPOV**

*V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, olga@irigs.irk.ru

**Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 3, Russia, eduard@lin.irk.ru

INFLUENCE OF THE LARGE-SCALE ATMOSPHERIC CIRCULATION ON METEOROLOGICAL REGIME OF THE GLACIAL ZONE OF KODAR RANGE DURING THE ABLATION

Presented are the results from analyzing large-scale atmospheric processes (using NCEP/NCAR reanalysis data) and meteorological characteristics measured in the glacial zone of Kodar Range during the ablation period of June–August 2019. It was established that the meteorological regime of the glacier emerged developed at the background of a clearly pronounced positive anomaly of the geopotential height in the lower troposphere (700 and 500 hPa) over the territory of Eastern Siberia. Quasi-cyclic fluctuations of air temperature and wind velocity as revealed on the glacier (with a period of 12–13 days) are well correlated with the wave pattern of the passage of the ridges and troughs over the study area. It is determined that the high ablation rates were associated with anticyclones and blocking ridges of subtropical origin, and the low rates — with cyclones and low-gradient pressure fields.

Keywords: glaciers, meteorological regime, atmospheric circulation, blocking processes, anomalies of meteoparameters.

ВВЕДЕНИЕ

Изменения климата последних десятилетий влияют на циркуляционные процессы в атмосфере [1]. Горные территории достаточно хорошо отражают физические свойства нижней и средней тропосферы и очень чувствительны к колебаниям атмосферной циркуляции, поэтому получение прямых измерений метеорологических характеристик в высокогорных областях позволяет оценивать атмосферные изменения с высокой точностью. Горные ледники, в силу своего расположения в высоко-

горье, служат хорошими индикаторами климатических изменений. Это проявляется в многолетних колебаниях баланса массы в зависимости от смены климатического режима в масштабе десятилетий. Однако для понимания физических причин таких изменений необходимо анализировать временные ряды с высоким разрешением. Как правило, исследования связей между крупномасштабной атмосферной циркуляцией и балансом массы современных ледников основаны на использовании синоптической типизации [2], моделировании общей циркуляции атмосферы, пространственной корреляции эмпирических ортогональных функций [3], анализе макропроцессов в пределах всего Северного полушария [4], статистическом анализе дальних связей [5], комплексном исследовании метеоданных и данных реанализа [6]. Комплексные исследования взаимосвязей атмосферной циркуляции и ледников проводятся во многих районах Земли, однако на территории России в основном ограничены Кавказом [7, 8]. В Сибирском регионе такие данные единичны [9–11].

Хребет Кодар — уникальное место для исследования крупномасштабной атмосферной циркуляции в летний период, так как он является центром горного оледенения [12], находится в широтном трансекте в области влияния влаги, поступающей как с запада, так и с востока [13], а в меридиональном — между арктическим и полярным фронтами, которые могут влиять на режим температуры и осадков.

В июле–августе 2019 г. на одном из ледников Кодара была установлена автоматическая система мониторинга и получены данные по многим метеорологическим характеристикам на протяжении периода абляции ледника.

Цель данной работы — исследование основных механизмов крупномасштабной атмосферной циркуляции, контролирующей метеорологический режим на леднике и влияющих на скорость его поверхностного таяния. Именно такого плана процессы определяют динамику погодных условий и тем самым — метеорологический режим ледника.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на Сыгыктинском леднике (хребет Кодар, северо-восток Байкальской горной области, $56^{\circ}51,02'$ с. ш., $117^{\circ}25,09'$ в. д., 2561 м над ур. моря). Сыгыктинский ледник исследуется нами с 2009 г. [14]. В начале июля 2019 г. в ледниковой зоне впервые была установлена система автоматического мониторинга. На леднике измерялся комплекс метеорологических параметров: температура и относительная влажность воздуха (на высоте 2 м), потоки приходящей/отраженной коротковолновой радиации (два датчика Davis). Все датчики были синхронизированы (часовой пояс +8 GMT), параметры автоматически усреднялись каждые 30 мин. Для анализа полей приземного давления, высоты геопотенциала AT-700 и AT-500 в работе использовались данные реанализа NCEP/NCAR [15]. Для выявления аномалий высоты геопотенциала в нижней и средней тропосфере на территории Азии строились композитные карты за разные периоды (ESRL, <https://www.esrl.noaa.gov>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В июле–августе 2019 г. в верхней стратосфере над Кодаром сохранялся летний режим циркуляции. Западный перенос был ослаблен, в средней тропосфере в осредненном за месяц поле геопотенциала наблюдался меридиональный гребень небольшой амплитуды. Такой же гребень прослеживался и на уровне ледниковой зоны Кодара (AT-700). Положение планетарной высотной фронтальной зоны в июле соответствовало норме, а в августе она располагалась севернее на 10 – 15° . В августе стратосферный антициклон постепенно ослабевал, и в конце месяца началась перестройка на зимний режим. Приземное поле давления было близким к среднему многолетнему, однако в нижней и средней тропосфере прослеживалась положительная аномалия высоты геопотенциала с центром в пределах Азиатского континента над Таймыром (от +25 геопотенциальных метров (гп. м) для 700 гПа до +35 гп. м для 500 гПа) (рис. 1, а). По данным реанализа NCEP/NCAR, положительная аномалия температуры воздуха на уровне 700 гПа составила $1,5^{\circ}\text{C}$ от среднего многолетнего уровня (см. рис. 1, б). Отрицательная аномалия интенсивности осадков составила $-0,6$ мм/сут от многолетней нормы (см. рис. 1, в). Сложившиеся особенности барического поля обусловили аномальный режим погоды в районе исследований: повышенную температуру воздуха, пониженную относительную влажность и дефицит атмосферных осадков. Анализ карт AT-700 и AT-500 выявил активное участие блокингов в формировании барического поля над территорией Восточной Сибири. Влияние блокирующих процессов заключалось в прерывании западного потока и существенном искривлении его траектории.

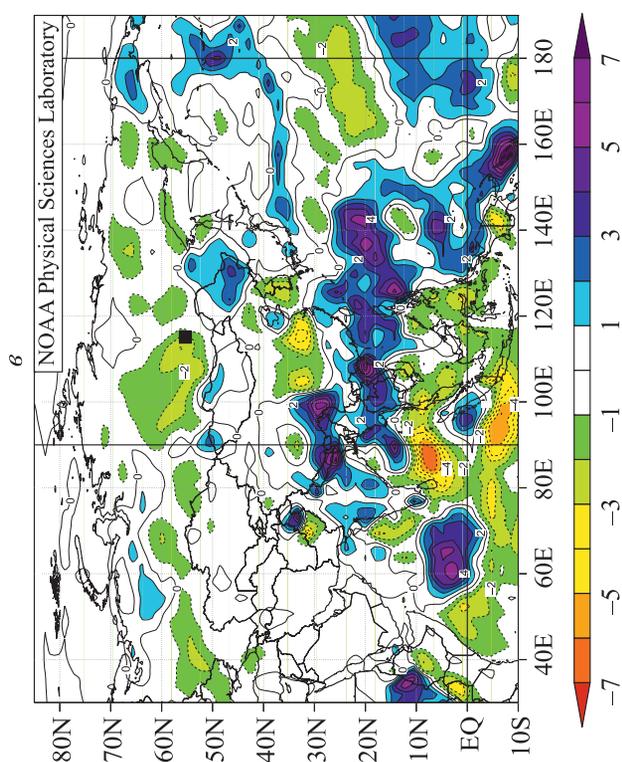
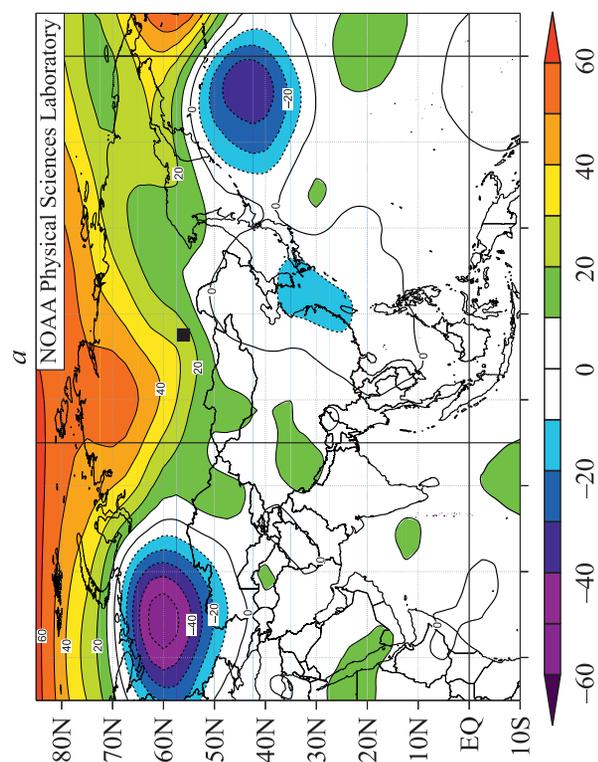
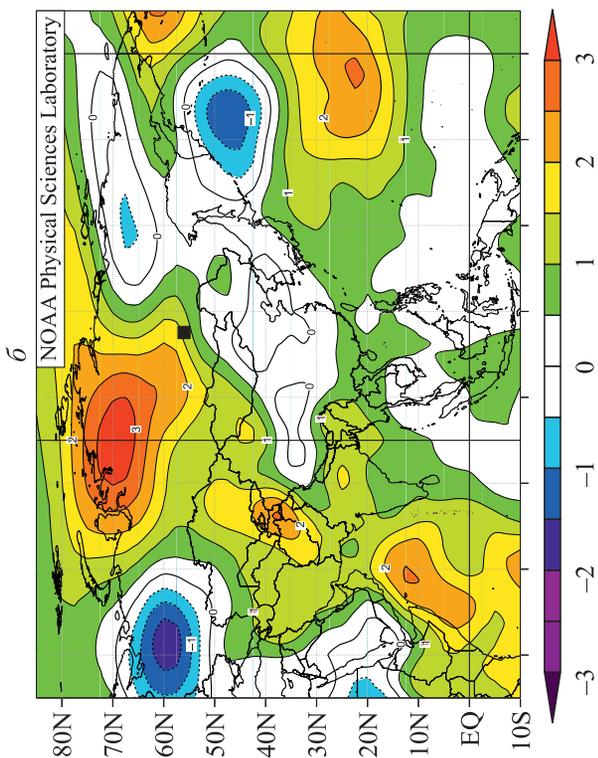


Рис. 1. Аномалии высоты геопотенциала 700 гПа (гп. м) (а), температуры воздуха на уровне 700 гПа (°С) (б) и скорости осадков (мм/сут) (в) за июль–август 2019 г. по сравнению с аналогичным периодом 1981–2010 гг. Черный квадрат показывает район исследований.

Средняя суточная температура воздуха в ледниковой зоне колебалась от $-0,2$ до $12,8$ °С. Средняя суточная относительная влажность воздуха изменялась от 41 до 100 %. В течение июля–августа в районе ледниковой зоны наблюдался дефицит осадков — меньше нормы (<80 %). За период наблюдений в ледниковой зоне выпало 136 мм осадков (в июле — 53 мм, в августе — 83 мм). Среднее суточное атмосферное давление менялось от 743 до 757 гПа. По данным ближайшей к леднику метеостанции Чара, в июле–августе общая облачность за рассматриваемый период в среднем составила 66 %, а нижняя — 41 %. Состояние нижней облачности во многом определяло температурный режим на леднике: в условиях кодарского высокогорья ясные дни (средняя температура $9,8$ °С) были теплее пасмурных ($2,8$ °С).

Комплексный анализ циркуляционных механизмов позволил выделить синоптические условия, которые влияли на метеорологический режим и абляцию ледника. В табл. 1 приведены отклонения основных метеорологических параметров, измеренных на леднике, от средних за период наблюдений в условиях действия различных циркуляционных механизмов.

При антициклональном типе барического поля, когда Кодар находился в области антициклона или гребня (рис. 2, а, б), наблюдались максимальные температуры воздуха, увеличение приходящей коротковолновой радиации, небольшие скорости ветра, низкие относительная влажность, облачность, высокая абляция. Антициклоны чаще всего формировались от отрога Тихоокеанского максимума, их период существования составлял 1–3 сут. Над ледником во время стационарирования антициклона наблюдалась ясная, безоблачная погода, температура воздуха превышала 12 °С, что способствовало максимальному таянию. Наибольший вклад в антициклональный тип внесли теплые меридиональные гребни со слабыми градиентами вдоль оси (их повторяемость за весь период исследований составила 50 %). Гребни распространялись с юга на север, способствовали адвекции тепла из Монголии и Средней Азии, создавали благоприятные условия для блокирования циклонов с запада и севера. При отклонении оси гребня к северо-западу в район ледника поступал заток холодных воздушных масс с Арктики.

Наиболее сильное влияние на снижение летнего таяния ледника оказывала циклональная активность. Циклоны над районом исследования наблюдались в 15 % дней периода наблюдений и либо приходили с юго-востока, либо формировались на полярном фронте в Забайкалье с медленным дальнейшим смещением к северу. На рис. 2, в показан пример типичной синоптической ситуации с проходящим циклоном. Во время действия циклона погода на леднике характеризовалась следующими особенностями (см. таблицу): низкая температура, повышенные осадки, высокая относительная влажность и облачность. Радиационная обстановка в эти дни не способствовала активной абляции, поскольку в условиях высокой нижней облачности поток коротковолновой радиации по сравнению с антициклональными условиями сокращался примерно в три раза. Однако при этом приток длинноволновой радиации к ледниковой поверхности возрастал на 20 % в результате увеличения влагосодержания воздуха.

Отклонения метеорологических характеристик, измеренных на леднике, от средних значений с 7 июля по 22 августа 2019 г.

Период	Тип атмосферной циркуляции	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Нижняя облачность, %	Осадки, мм/сут	Максимальная скорость ветра, м/с	Приходящая коротковолновая радиация, Вт/м ²	Приходящая длинноволновая радиация, Вт/м ²	Абляция, мм/сут
11–13 июля	Трансформация воздуха внутри воздушной массы (малогradientное барическое поле)	1,0	7	6	3,4	-0,2	-56	6	-6
16–18 июля	Выходы гребней южных (субтропических) антициклонов	4,3	-3	-4	0,8	-0,2	40	10	6
1–3 августа	Зональная западная	0,2	3	-2	-1,8	0,2	15	0	3
4–5 августа	Арктическое вторжение	-4,7	12	3	5,7	1,9	-38	-22	0
7–9 августа	Антициклональный	5,0	-34	-39	-2,9	-2,2	64	-31	7
13–16 августа	Циклональный	-5,9	24	31	5,6	1,9	-88	21	-17

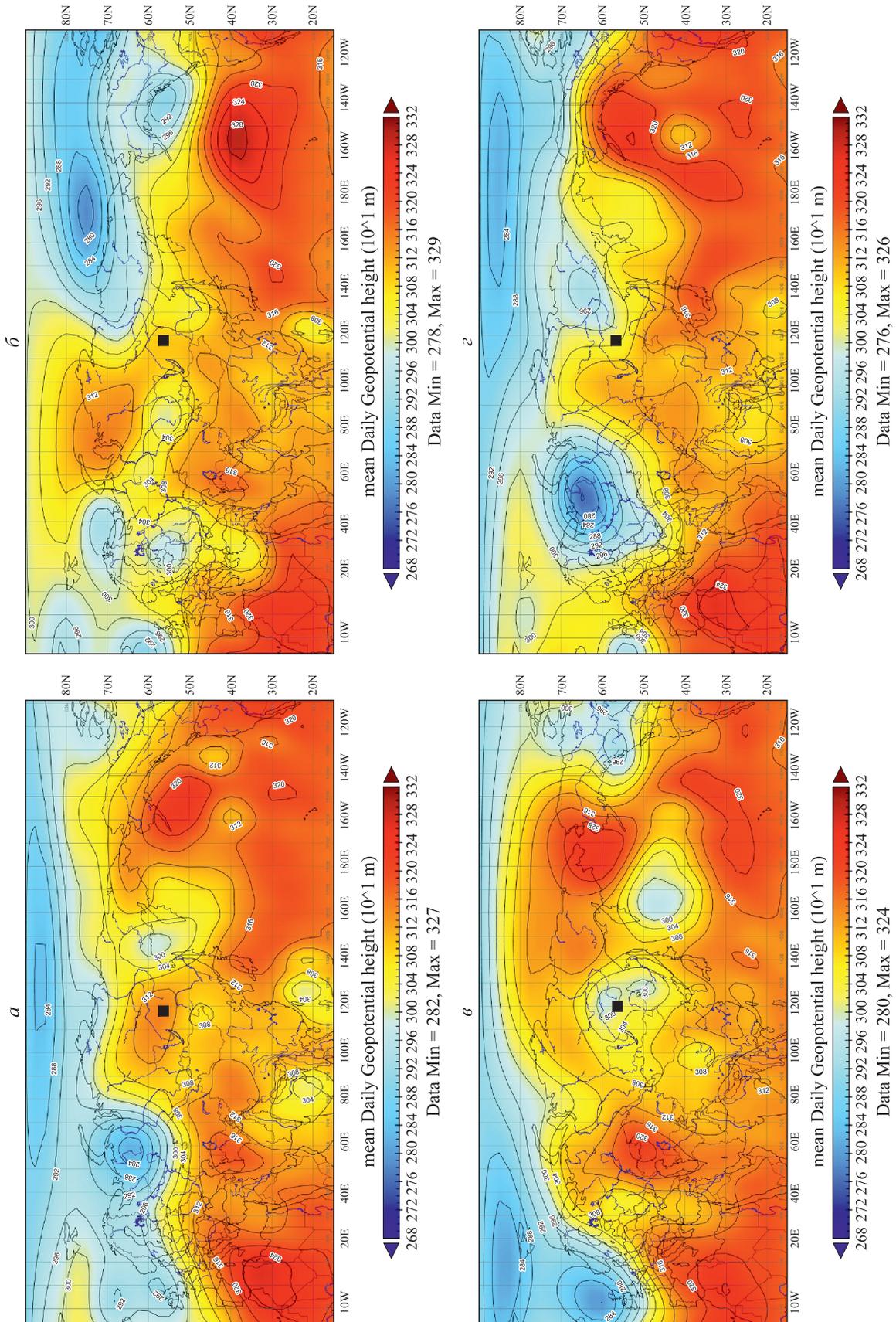


Рис. 2. Типичные поля высоты геопотенциала 700 гПа для антициклона (а), выхода южного антициклонального гребня (б), циклона (с) и арктического вторжения (д).

Еще одним макропроцессом, снижающим температуру воздуха в ледниковой зоне, были арктические вторжения, наблюдавшиеся в 10 % дней периода наблюдений. При этом холодный арктический воздух поступал вдоль ложбин с северо-востока и северо-запада. На рис. 2, з показан пример синоптической ситуации с затоком ультраполярного воздуха с северо-востока в район исследований. В целом погодный режим на леднике характеризовался резким понижением температуры воздуха, повышенной относительной влажностью и облачностью, усилением скорости ветра, особенно при прохождении холодного фронта.

Часто в тыловой части гребней преобладало размытое поле повышенного давления, в которое попадал район исследований. Для него характерны температуры воздуха выше средних, небольшие скорости ветра, отсутствие осадков и значения абляции ниже средних.

Анализ высотных карт (АТ-700 и АТ-500) показал наличие пространственных неоднородностей в распределении температуры и осадков на территории Восточной Сибири, и в частности в ледниковой зоне Кодара. Эти неоднородности на леднике проявились в виде квазициклических колебаний температуры воздуха и скорости ветра с частотой 12–13 сут. Можно предположить, что они связаны главным образом с динамикой субтропических антициклональных гребней в средней тропосфере (повышение и понижение высоты геопотенциала) и имеют волновую природу (смещение волн в широтном направлении). Вероятно, волновым характером динамики субтропических гребней можно объяснить аномалии температуры и осадков разного знака, проявившиеся на территории Иркутской области в июне–июле 2019 г. На юго-западе области наблюдались катастрофические наводнения и волны холода, однако на северо-востоке, наоборот, — потепление и дефицит осадков. Наличие блокирующих антициклональных гребней способствовало активизации циклонической деятельности к юго-западу от них. Наличие блокирующих процессов в летний период на территории Восточной Сибири отмечается многими исследователями, при этом было выявлено влияние муссонного воздуха на интенсивность выпадающих осадков [16]. К сожалению, физические механизмы, которые определяют устойчивость и размеры блокирующих антициклонов Северной Евразии, еще недостаточно изучены. В работе [17] на основе данных реанализа MERRA была показана важная роль летних стационарных волн Россби в развитии основных закономерностей месячной евразийской приземной температуры и изменчивости осадков (включая развитие экстремальных явлений). В работе [18] экстремальные случаи летних засух на Тибетском плато также связываются с аномалиями циркуляции в Североатлантическом/Европейском секторе и волнами, пересекающими Евразийский континент.

Влияние антициклональных процессов (антициклоны и гребни) на усиление скорости абляции на ледниках хорошо согласуется с исследованиями в других регионах. Так, связь между элементарными циркуляционными механизмами Б.Л. Дзердзеевского и балансом массы ледников на северо-востоке Сибири и Полярном Урале была исследована в работе [19]. Авторы связывают наибольшее таяние ледников в теплое время года на северо-востоке с наличием материкового (не арктического) антициклона либо с малоградиентной областью пониженного давления, а на Полярном Урале — с антициклоном или смещением западных циклонов с дождями. В обоих случаях фиксируются антициклонические условия с положительными аномалиями температуры и ясной безоблачной погодой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Положительная аномалия в средней тропосфере (700 и 500 гПа) над территорией Восточной Сибири в летний период 2019 г. повлияла на аномальные погодные условия в районе ледниковой зоны хр. Кодар (повышенные температуры воздуха и дефицит осадков и влагосодержания по сравнению с многолетней нормой). Метеорологические измерения с высоким разрешением, проведенные непосредственно на леднике, отражают крупномасштабные колебания атмосферной циркуляции, вызванные динамикой антициклональных гребней и ложбин, прохождением циклонов и фронтогенезом. Колебания интенсивности абляции на леднике хорошо объясняются сменой синоптических условий, вызванной динамикой атмосферных макропроцессов.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (Программа № 0345-2019-0006, АААА-А16-116122110063-0; АААА-А17-117041910172-4) и при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-00668.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Второй** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М.: Росгидромет, 2014 [Электронный ресурс]. — <http://climatechange.igce.ru> (дата обращения 28.08.2020).
2. **Волошина А.П.** Метеорология горных ледников // Материалы гляциологических исследований. — 2002. — № 92. — С. 3–148.
3. **Sato T., Nakamura T.** Intensification of hot Eurasian summers by climate change and land-atmosphere interactions // Scientific Reports. — 2019. — Vol. 9. — P. 10866.
4. **Кононова Н.К.** Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзержевскому / Отв. А.Б. Шмакин. — М.: Воентехиниздат, 2009. — 372 с.
5. **Shahgedanova M., Stokes C.R., Gurney S.D., Popovnin V.** Interactions between mass balance, atmospheric circulation, and recent climate change on the Djankuat Glacier, Caucasus Mountains, Russia // Journ. of Geophysical Research. — 2005. — Vol. 110. — P. D04108.
6. **Gascon G., Sharp M., Bush A.** Changes in melt season characteristics on Devon Ice Cap, Canada, and their association with the Arctic atmospheric circulation // Annals of Glaciology. — 2013. — Vol. 54 (63). — P. 101–110.
7. **Торопов П.А., Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Морозова П.А., Шестакова А.А.** Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет // Лед и снег. — 2016. — Т. 56, № 1. — С. 5–19.
8. **Торопов П.А., Шестакова А.А., Полохов А.А., Семенова А.А., Михаленко В.Н.** Особенности летнего метеорологического режима Западного плато Эльбруса // Лед и снег. — 2020. — Т. 60, № 1. — С. 58–76.
9. **Осипова О.П., Осипов Э.Ю.** Особенности циркуляционного режима над хребтом Кодар в период абляции ледников // География и природ. ресурсы. — 2014. — № 1. — С. 118–123.
10. **Osipova O.P., Osipov E.Y.** Relationship between recent climate change, ablation conditions of glaciers of the East Sayan Range, Southeastern Siberia, and atmospheric circulation patterns // Environmental Earth Sciences. — 2015. — Vol. 74 (3). — P. 1947–1956.
11. **Osipova O.P., Osipov E.Y.** Relationship between glacier melting and atmospheric circulation in the southeast Siberia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2018. — Vol. 107, N 1. — С. 12039.
12. **Osipov E.Y., Osipova O.P.** Mountain glaciers of southeast Siberia: current state and changes since the Little Ice Age // Annals of Glaciology. — 2014. — Vol. 55. — P. 167–176.
13. **Осипова О.П., Осипов Э.Ю.** Циркуляционные процессы в атмосфере и режим осадков в северной части Байкальской горной области // Метеорология и гидрология. — 2019. — № 10. — С. 87–98.
14. **Осипов Э.Ю., Осипова О.П., Голобокова Л.П.** Оценка современного состояния южного Сыгыктинского ледника — одного из крупнейших ледников хр. Кодар // Лед и снег. — 2012. — № 2 (118). — С. 51–58.
15. **Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D.** The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bulletin of the American Meteorological Society. — 1996. — Vol. 77. — P. 437–471.
16. **Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Девятова Е.В., Мордвинов В.И.** Динамические процессы в атмосфере, обуславливающие аномалии осадков в Восточной Сибири и Монголии в летний период // Фундаментальная и прикладная климатология. — 2018. — Т. 1. — С. 10–27.
17. **Schubert S.D., Wang H., Koster R.D., Suarez M.J., Groisman P.Y.** Northern Eurasian heat waves and droughts // Journ. of Climate. — 2014. — Vol. 27. — P. 3169–3207.
18. **Bothe O., Fraedrich K., Zhu X.** The largescale circulations and summer drought and wetness on the Tibetan plateau // Journ. of Climate. — 2010. — Vol. 30. — P. 844–855.
19. **Ананичева М.Д., Кононова Н.К.** Связь температуры воздуха, осадков и баланса массы ледников с макроциркуляционными процессами на северо-востоке Сибири и Полярном Урале // Материалы гляциологических исследований. — 2007. — Т. 107. — С. 58–67.

Поступила в редакцию 20.09.2020

Принята к публикации 09.10.2020