

## ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В БАССЕЙНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

УДК 551.501.74

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(15-19)

**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](mailto:olga@irigs.irk.ru)\*\*Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия,  
[eduard@lin.irk.ru](mailto:eduard@lin.irk.ru)

### АТМОСФЕРНЫЕ ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ И ИХ СВЯЗЬ С ПРОЦЕССАМИ ТАЯНИЯ ЛЕДНИКОВ БАЙКАЛЬСКОГО ХРЕБТА

На основе данных ежемесячных бюллетеней Иркутского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за июнь–август 2001–2013 гг. исследована связь циркуляции атмосферы и потенциальной летней абляции ледников Байкальского хребта. В качестве показателя абляции использовались суммы положительных температур, рассчитанные для средней высоты ледниковой зоны. Проведена классификация летних сезонов на три группы — с высокой, низкой и умеренной абляцией. Максимальное значение суммы положительных температур составило 1152 °С (2002 г.), минимальное — 787 °С (2013 г.). С помощью модели HYSPLIT выявлены доминирующие направления воздушных масс в районе исследований: западное, юго-западное, северное, северо-западное. Оценен вклад меридиональной составляющей атмосферной циркуляции, усиливающейся на протяжении последнего десятилетия. По динамике зонального и меридионального индексов циркуляции А. Л. Каца отмечаются летние сезоны с максимальной (2007, 2010 гг.) и минимальной (2003, 2012 гг.) интенсивностью зональной циркуляции, а также межгодовые вариации меридиональной. По результатам комплексного анализа приземных и высотных синоптических карт, изобарических полей абсолютной и относительной топографии, температурного режима над ледниковой зоной (NCEP/NCAR) выявлены синоптические условия, способствующие увеличению/уменьшению таяния ледников рассматриваемой области. Исследована динамика фронтальной деятельности, типов адвекции, теплых влажных воздушных масс в летние сезоны над Байкальским хребтом. Изменение частоты всех исследованных циркуляционных механизмов влечет за собой изменение погодных условий и климатического режима, что способствует усилению либо уменьшению абляции для ледников и отражается на эволюции всей ледниковой зоны Байкальского хребта.

Ключевые слова: циркуляция атмосферы, циклоны, антициклоны, реанализ NCEP/NCAR, суммы положительных температур, абляция, ледник.

**O. P. OSIPOVA\*** AND **E. YU. OSIPOV\*\***

\*V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS,

664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya str., 1, Russia, [olga@irigs.irk.ru](mailto:olga@irigs.irk.ru)\*\*Limnological Institute SB RAS, 664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya str., 3, Russia, [eduard@lin.irk.ru](mailto:eduard@lin.irk.ru)

### ATMOSPHERIC CIRCULATION MECHANISMS AND THEIR ASSOCIATION WITH THE PROCESSES OF GLACIER MELTDOWN OF THE BAIKAL RANGE

On the basis of data from monthly bulletins of the Irkutsk Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring for June–August 2001–2013, we investigated the association of the atmospheric circulation with potential summer ablation of the glaciers of the Baikal Range. As the indicator of ablation, we used the accumulated positive temperatures calculated for the mean height of the glacier zone. The summer seasons were classified into three groups: with high, low and moderate ablation. The maximum and minimum values of accumulated positive temperatures, respectively, were 1152 (the year 2002) and 787 °C (2013). The HYSPLIT model was used to identify the prevailing directions of air masses over the study area: westerly, southwesterly, northerly, and northwesterly. We assessed the contribution from the meridional component of the atmospheric circulation which has been enhanced over the course of the last decade. According to the dynamics of A. L. Kats' zonal and meridional circulation indices, there occur summer seasons with a maximal (2007 and 2010) and minimal (2003 and 2012) intensity of the zonal circulation as well as inter-annual variations in the meridional circulation. Results of a comprehensive analysis of ground-level

*and altitudinal synoptic maps, isobaric fields of absolute and relative topography, and the temperature regime over the glacier zone (NCEP/NCAR) revealed synoptic conditions contributing to an increase/decrease in glacier meltdown in the region under consideration. A study is made of the dynamics of frontal activity, the types of advection and of the warm wet air masses over the Baikal Range during summer seasons. A change in the frequency of all the circulation mechanisms used in this study involves a change in weather conditions and climatic regime, which favor an enhancement or a decrease in ablation for glaciers and has influence on the evolution of the entire glacier zone of the Baikal Range.*

Keywords: atmospheric circulation, cyclones, anticyclones, NCEP/NCAR reanalysis, accumulative positive temperatures, ablation, glacier.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблеме изменения климата на глобальном и региональном уровне в последние десятилетия уделяется повышенное внимание, так как климатические характеристики претерпевают значительные колебания из-за глобального потепления. Основным климатообразующим фактором является общая циркуляция атмосферы, которой определяется преобладанием постоянных и сезонных центров действия атмосферы, трансформирующих воздушные массы под влиянием местных физико-географических условий. Для диагноза и прогноза климатических изменений надо исследовать динамику атмосферной циркуляции, благодаря которой происходит регулирование и усиление всех крупнейших колебаний климата. Таким образом, возникла необходимость оценить направленность климатических тенденций в отдельных регионах земного шара. Большой научно-практический интерес в этой оценке представляет климат горных районов, где есть ледники — важнейшие составляющие водного баланса, одни из самых чувствительных показателей изменения климата. Горные ледники, как правило, расположены в удаленных областях, где метеостанций мало или вообще нет. В таких случаях колебания климата можно оценить по текущему режиму этих ледников, который определяется климатическими условиями сезонов аккумуляции и абляции.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Байкальский хребет протягивается вдоль западного побережья оз. Байкал. Его вершины достигают 1900–2200 м, а средняя высота — 1700 м. На Байкальском хребте имеется два маленьких ледника общей площадью около 0,6 км<sup>2</sup> [1, 2]. Ледник Черского расположен на юго-восточном склоне хребта у подножия его высочайшего массива — горы Черского (2588 м). Второй ледник находится в соседнем каре, он активно деградирует и разделился на две части. Эти ледники были впервые обнаружены и исследованы в 1970–1980 гг. [3]. Изменение ледников хр. Черского рассмотрено в работах [1, 2, 4, 5]. Однако циркуляционные механизмы, обуславливающие динамику ледников, ранее не изучались. Цель нашего исследования — выявление взаимосвязей между циркуляционными механизмами в нижней тропосфере и таянием ледников Байкальского хребта.

В качестве исходных данных для анализа полей давления использовались ежесуточные приземные карты и карты барической топографии на высотных уровнях 500, 700 и 850 гПа за июнь–август 2001–2013 гг. Температурный режим ледниковой зоны исследовался по данным реанализа NCEP/NCAR [6]. Рассчитанные суммы потенциальных температур (СПТ) на уровне ледниковой зоны за 2001–2013 гг. выступили в роли потенциального показателя интенсивности абляции ледников. Объектами синоптического анализа являлись воздушные массы, атмосферные фронты, циклоны, антициклоны и другие формы барического рельефа. Для комплексной характеристики поля давления использовали приземные карты, а дополняли их картами барической топографии. Карты АТ-500 гПа соответствуют высоте 5,5 км, т. е. средней тропосфере, по ним оценивалась высота циклонов и мощность антициклонов. Карты АТ-700 гПа соответствуют высоте 3 км, что ближе всего к зоне высокогорья, и по ним определялись ведущий поток в атмосфере и тип барического образования. По картам АТ-850 гПа устанавливались атмосферные фронты, тип адвекции и наличие влажной воздушной массы с дефицитом точки росы 2 °С. Направления переноса воздушных масс в район Байкальского хребта анализировались по модели обратных траекторий HYSPLIT (<http://ready.arl.noaa.gov/hypub-bin/trajasc.pl>). В качестве количественного показателя циркуляции атмосферы был выбран индекс циркуляции А. Л. Каца [7]. Значения индексов зональной (Iz) и меридиональной (Im) циркуляции рассчитывались исходя из того, что при условии геострофичности ветра мерой развития зонального переноса является меридиональный градиент давления, а мерой меридионального переноса — зональный. Зональный и меридиональный индексы циркуляции были рассчитаны для района, ограниченного меридианами 90 и 120° в. д. и параллелями 50 и 65° с. ш. [8]. Для расчетов были использованы средние месячные значения высоты геопотенциала уровня 500 гПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

К главным факторам, определяющим климатические особенности в районе оз. Байкал, относят общую циркуляцию атмосферы, сложная орография, а также удаленность от океанов. Большое влияние на климатические изменения оказывают синоптические процессы. В летний период над Байкальским хребтом преобладает циклоническое барическое поле (рис. 1).

Такой тип барического поля характеризуется пониженным атмосферным давлением, проявляется в прохождении или стационаровании циклонов либо в преобладании малоградиентного поля по типу циклонического. У поверхности земли в районе исследования чаще всего преобладает малоградиентное поле низкого давления. На высотных картах (АТ-700, АТ-500) прослеживаются гребни и ложбины. За исследуемый период в районе хребта наблюдались 71 циклон и 21 антициклон. Частные циклоны, как и такого же рода антициклоны, составили 70 % от их общего количества. Период действия частных барических образований составляет один-два дня. Чаще всего это самостоятельные байкальские антициклоны и циклоны. Вторжение антициклонов происходило с запада и северо-запада, циклонов — с юга, юго-востока, юго-запада и запада. Максимальная непрерывная продолжительность действия наблюдалась у циклонического поля, а минимальная — у малоградиентного барического поля по типу антициклонического.

Типы атмосферных фронтов и адвекции, наличие влажных воздушных масс в районе Байкальско-го хребта представлены в таблице. Чаще всего над хребтом проходили теплые фронты и фронты окклюзии, реже — холодные. Их распределение неравномерно: максимум теплых фронтов пришелся на 2002 и 2010 гг., а максимум холодных — на 2013 г. В 60 % случаев наблюдалась адвекция тепла, в 13 % над районом исследования проходили теплые влажные воздушные массы. В целом летом интенсивность зональной циркуляции уменьшается, западный перенос теряет свою активность из-за уменьшения межширотных термических градиентов. Часто сменяются воздушные массы с различным температурным режимом, усиливается меридиональная составляющая в виде арктических вторжений и южных циклонов. Распределение меридиональных потоков воздуха по направлениям в июне и июле в 65 % случаев северное, а вклад южной составляющей увеличивается в августе, достигая в отдельные годы 70 %.

В Северном полушарии на протяжении последнего десятилетия циркуляция атмосферы демонстрирует признаки переходного периода, что проявляется как в характере циркуляционных процессов, так и в смене тенденций: рост продолжительности меридиональных южных процессов сменился ростом меридиональных северных. К меридиональной северной группе отнесены процессы, при которых в результате одновременных арктических вторжений в двух-четырёх секторах Северного полушария формируются полосы высокого давления, соединяющие арктический антициклон с субтропическим. Они блокируют западный перенос и потому называются блокирующими процессами. Однако, как известно, арктические вторжения происходят в тылу западных или южных циклонов. К меридиональной южной группе отнесены процессы с циклоном на Северном полюсе, поддерживаемым одновременным выходом южных циклонов в двух-трех секторах в холодное полугодие и в четырех

Повторяемость (в днях) атмосферных фронтов, типов адвекции и воздушных масс за июнь–август 2001–2013 гг.

Год	Фронт			Адвекция		ТВМ
	окклюзии	холодный	теплый	холода	тепла	
2001	4	4	6	25	67	14
2002	5	3	12	18	74	16
2003	8	4	7	37	55	17
2004	2	2	5	20	72	10
2005	1	1	3	34	58	10
2006	2	2	4	34	58	15
2007	—	3	1	41	51	7
2008	2	1	2	41	51	13
2009	3	1	1	44	48	19
2010	11	4	9	36	56	12
2011	1	1	5	46	46	20
2012	5	0	2	46	46	27
2013	2	7	0	52	40	10
Всего	46	33	57	474	722	190

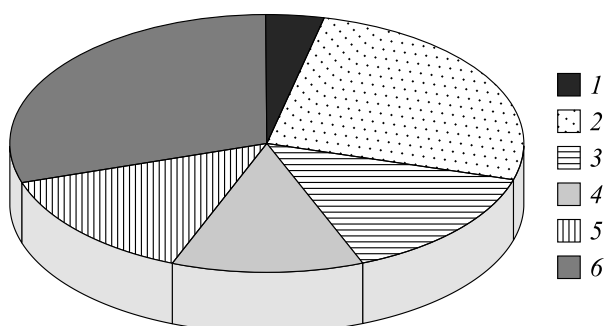


Рис. 1. Продолжительность действия барических образований (в днях) над Байкальским хребтом.

1 — антициклон; 2 — антициклоническое поле; 3 — малоградиентное барическое поле по типу антициклонического; 4 — малоградиентное барическое поле по типу циклонического; 5 — циклон; 6 — циклоническое поле.

Примечание. ТВМ — теплая влажная воздушная масса.

секторах в теплое. В тылу этих циклонов тоже происходят арктические вторжения, но они кратковременны, и блокирующие процессы при них не формируются [9].

Суммы положительных температур на средней высоте ледниковой зоны Байкальского хребта с 1948 по 2013 г. демонстрируют положительный, но статистически незначимый тренд. На основе рассчитанных СПТ за исследуемый период (2001–2013 гг.) можно классифицировать летние сезоны на три группы — с высокой (2001, 2002, 2007, 2010 гг.), низкой (2013 г.) и умеренной (2003–2006, 2008, 2009, 2011 и 2012 гг.) абляцией. Максимальное значение СПТ (1152 °С) было в 2002 г., а минимальное (787 °С) — в 2013 г. Согласно модели HYSPLIT, доминирующими направлениями воздушных масс для летних периодов с максимальными СПТ на высоте 2,5 и 5 км были западное и юго-западное (80 % случаев) и северо-западное (20 % случаев). В наиболее холодное лето (2013 г.) преобладающим направлением в 90 % случаев являлось северное и северо-западное (рис. 2).

Увеличение летней температуры с 1980-х гг. хорошо согласуется с интенсивным сокращением площадей ледников в конце XX — начале XXI в. [1, 2, 10, 11]. Эти климатические изменения в значительной мере объясняются механизмами атмосферной циркуляции в начале XXI в. Наиболее теплые летние периоды (2001–2002 гг.) обусловлены усилением антициклонального поля с малооблачной погодой, которая способствовала интенсивной абляции ледников и снежников. Ранее аналогичная связь между летней абляцией и макроциркуляционными механизмами в атмосфере была установлена при исследовании баланса массы ледника на северо-востоке Сибири [12]. Авторы пришли к выводу, что положительные аномалии летней температуры (на фоне антициклонального типа барического поля) были вызваны материковым (не арктическим) антициклоном либо малоградиентной областью пониженного давления.

Суммы положительных температур на Байкальском хребте за исследованный период демонстрируют отрицательный тренд, что, по всей видимости, приводит к снижению интенсивности абляции в ледниковой зоне. За этот же период наблюдений в Восточном Саяне также прослеживается отрицательный тренд СПТ [13]. Замедление темпов роста продолжительности неблагоприятных для ледников элементарных циркуляционных механизмов летнего периода в последнее десятилетие было зафиксировано на северо-востоке Сибири [12]. Здесь уменьшение температуры тоже связано либо с активной циклонической деятельностью (приток холодного воздуха, облачность, осадки и затраты тепла на испарение), либо с вторжениями арктического воздуха. Схожий отрицательный тренд абляции после 2000 г. установлен на леднике Джанкуат (Центральный Кавказ) [14]. В начале XXI в. наблюдается сильная межгодовая изменчивость меридиональной циркуляции, которая заметно влияет на изменения летней температуры и такие экстремальные метеорологические процессы в горах, как ливневые осадки, оползни и сели [15, 16].

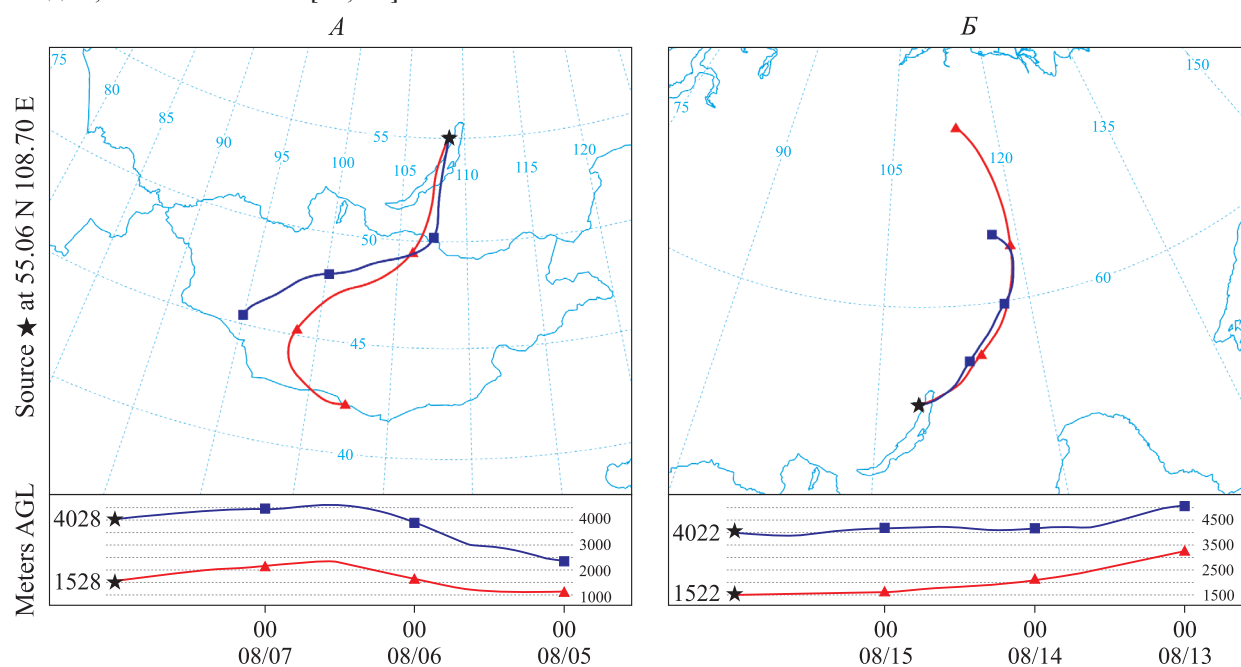


Рис. 2. Трехдневные обратные траектории воздушных масс, приходящих на ледник Байкальского хребта на высоте 2,5 км (красная линия) и 5 км (синяя линия) 8 августа 2002 г. (А) и 16 августа 2013 г. (Б).



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ циркуляционных механизмов и температурного режима ледниковой зоны Байкальского хребта позволил выделить синоптические условия, способствующие различной интенсивности таяния ледников Прибайкалья. Наибольшее таяние наблюдалось при антициклоническом барическом поле и частных антициклонах, сопровождающихся положительными температурами и ясной погодой. Минимальное таяние происходило на фоне циклонического барического поля и арктических циклонов, прохождение которых в летний сезон приводит к понижению температуры воздуха, особенно в области холодного фронта. Умеренное таяние отмечалось при малоградиентных барических полях циклонического и антициклонического типов. Существенное преобладание меридиональных процессов над зональными привело к необычной структуре циркуляции атмосферы в XXI в., что в дальнейшем может повлиять на температурный режим и, следовательно, на баланс массы ледников Байкальского хребта.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (15–05–04525–а).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Osipov E. Yu., Osipova O. P.** Mountain glaciers of southeast Siberia: current state and changes since the Little Ice Age // *Annals Glaciol.* — 2014. — Vol. 55 (66). — P. 167–176.
2. **Осипов Э. Ю., Осипова О. П.** Динамика оледенения в горах юга Восточной Сибири за последние 160 лет // *Лед и снег.* — 2015. — № 2 (130). — С. 33–41.
3. **Алёшин Г. В.** Современные ледники и их рельефообразующее значение на Байкальском хребте // *География и природ. ресурсы.* — 1982. — № 4. — С. 133–136.
4. **Плюснин В. М., Китов А. Д.** Динамика нивально-гляциальных систем юга Восточной Сибири // *Лед и снег.* — 2010. — № 2 (110). — С. 5–11.
5. **Плюснин В. М., Китов А. Д., Иванов Е. Н., Шейнкман В. С.** Особенности формирования и динамики нивально-гляциальных геосистем на юге Восточной Сибири и в Монгольском Алтае // *География и природ. ресурсы.* — 2013. — № 4. — С. 5–19.
6. **Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Candin 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 // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* — 1996. — Vol. 77. — P. 437–471.
7. **Кац А. Л.** Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1960. — 270 с.
8. **Осипова О. П.** Количественная оценка интенсивности атмосферной циркуляции на юге Восточной Сибири // *География и природ. ресурсы.* — 2011. — № 1. — С. 154–158.
9. **Кононова Н. К.** Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому. — М.: Воентехиниздат, 2009. — 372 с.
10. **Ананичева М. Д., Капустин Г. А., Корейша М. М.** Изменение ледников гор Сунтар-Хаята и хр. Черского по данным Каталога ледников СССР и космическим снимкам 2001–2003 гг. // *Материалы гляциол. исследований.* — 2006. — Вып. 101. — С. 163–169.
11. **Ерисковская Л. А., Пиманкина Н. В.** Колебания климата и баланс массы ледника Туйыксу (Иле-Алатау) // *Гидрометеорология и экология.* — 2009. — № 3. — С. 78–84.
12. **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 гляциол. исследований.* — 2007. — Вып. 103. — С. 58–67.
13. **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 // *Environ. Earth Sciences.* — 2015. — Vol. 74 (3). — P. 1947–1956.
14. **Shahgedanova M., Popovnin V., Aleynikov A., Petrakov D., Stokes C.** Long-term change, interannual and intra-seasonal variability in climate and glacier mass balance in the central Greater Caucasus, Russia // *Annals Glaciol.* — 2007. — Vol. 46. — P. 355–361.
15. **Malneva I. V., Kononova N. K.** The activity of mudflow processes in mountains of Russia and adjacent countries in 20 century // *Intern. Symp. on Latest Natural Disasters, September 5–8, 2005. Sofia, Bulgaria. Topic VI: Case studies. Conclusions and recommendations.* — P. 787–800. — CD-диск.
16. **Мальнева И. В., Кононова Н. К.** Активность селей на территории России и ближнего зарубежья в 21 веке // *ГеоРиск.* — 2012. — № 4. — С. 48–54.

*Поступила в редакцию 6 апреля 2016 г.*