

**М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, Г.А. Ивлев, Т.М. Рассказчикова**

## **Пространственно-временные характеристики циркуляции воздуха в котловине оз. Байкал**

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 5.03.2001 г.

Обнаружена зависимость возникновения и сохранения внутренней котловинной циркуляции воздуха в пограничном слое атмосферы оз. Байкал от синоптических условий и времени суток (по результатам измерений во время летних экспедиций 1991, 1995 гг. и наземных – с шаропилотными наблюдениями в 1997–1999 гг.). Получено подтверждение существования этой циркуляции при наличии западной составляющей в направлении основного потока, начиная с высоты изобарической поверхности 850 гПа. Замечено разрушающее воздействие фронтов на внутреннюю циркуляцию в котловине озера. Выявлен механизм вертикального распределения скорости и направления ветра для восточной ветви циркуляции на основе измерений, проведенных в п. Боярск.

Ветровой режим оз. Байкал, формируясь под влиянием многих факторов, отличается сложностью и разнообразием. Существенное влияние на формирование ветровых условий над Байкалом оказывает рельеф. Высокие горные хребты, со всех сторон окружающие озеро, имеют сложную изрезанную множественно широким набором местных ветров, таких как Сарма, Бора, Баргузин. В то же время они ограничивают проникновение внешних воздушных течений в котловину озера. Поэтому в течение почти целого года у берегов озера наблюдаются хорошо выраженные бризы и горно-долинные циркуляции.

Однако если перечисленные местные ветры достаточно хорошо изучены, то обнаруженное сравнительно недавно [1, 3] явление внутренней котловинной циркуляции (ВКЦ) воздуха на оз. Байкал нуждается в дальнейшем исследовании.

Суть этого явления заключается в том, что по всему периметру озера существует направленное движение воздуха: вдоль западного побережья с севера на юг (западная ветвь циркуляции), вдоль восточного с юга на север (восточная ветвь циркуляции), скорость которого вдоль различных участков берега колеблется в пределах 5–10 м/с. Это явление было отмечено в диапазоне высот 400–900 м при самолетном зондировании в ходе экспедиций 1991, 1995 гг. В наземной экспедиции 1997 г. была получена оценка вертикальной протяженности ячейки циркуляции. Для западного и восточного берегов она составляет 700–1000 м [1], а сами ячейки начинаются с высоты 200–400 м от уровня воды.

Следует отметить, что исследование ветрового режима в котловине озера выполнялось многими учеными. Так, например, Т.В. Шамшева в [5] использует значительный объем данных шаропилотного зондирования шести пунктов наблюдений, расположенных по периметру озера, привлекая дополнительно еще 7 пунктов наблюдений. Ею составлена детальная картина ветрового режима оз. Байкал. Тем не менее

выделить ВКЦ ей не удалось. Ближе всех к выделению ВКЦ подошел Г.А. Губарь [2], который дал примерную схему распределения потоков над озером, показав, что в котловине большую часть времени наблюдаются два прямо противоположных потока: «верховик» – дующий вдоль западного побережья с севера на юг, и «култук» – распрямляющийся вдоль восточного берега с юга на север.

Целью данной работы является изучение синоптических условий образования ВКЦ, ее пространственных характеристик и временной динамики. Материалами для работы служат данные о скорости и направлении ветра, полученные в двух самолетных экспедициях 1991, 1995 гг. и в двух наземных экспедициях 1998, 1999 гг., а также синоптические карты за эти периоды. Результаты наземной экспедиции 1997 г уже изложены в [1].

В 1991 г. во время летней экспедиции синоптические условия у поверхности земли обуславливались малоградиентным полем давления с неустойчивыми направлениями ветра. На картах АТ<sub>850</sub> общий перенос воздуха при этом имел хорошо выраженную западную составляющую [3]. В 1995-м, как и в 1991 г., в районе оз. Байкал наблюдались барические поля с небольшими градиентами – это седловина 9 июня и центральная часть антициклона – 14 июня. При этом для всех дней, в которые проводились полеты, на картах абсолютной топографии 850 гПа наблюдался устойчивый западный перенос.

Во время обеих экспедиций в ВКЦ скорость переноса воздуха равнялась 5–7 м/с при направлении вращения вдоль берега против часовой стрелки. Интересными представляются результаты, полученные 9 июня 1995 г., когда в восточной ветви циркуляции были зафиксированы скорости воздуха в диапазоне 10–17 и 5–7 м/с в западной ветви циркуляции. Такая ситуация объясняется присутствием высотной ложбины, направление переноса в которой совпадает с направлением движения воздуха в восточной ветви, что приводит к увеличению скоростей в восточной ветви

циркуляции. Из этого следует, что барические образования, определяющие синоптическую ситуацию в данном регионе, могут существенно влиять на процесс существования циркуляции вплоть до ее разрушения.

В 1998 г. экспедиция проходила в период с 20 июля по 5 августа. Запуски шаров-пилотов проводились на двух берегах озера: восточном – от п. Слюдянка до мыса Кабаний, и западном – от мыса Покойники до мыса Малая Коса. Всего было сделано 29 измерений. При анализе синоптической ситуации по приземным синоптическим картам и картам абсолютной топографии 850 и 700 гПа выяснилось, что большую часть времени в районе озера наблюдались малоградиентные поля, обуславливающие неустойчивое направление и малую скорость переноса в районе исследования. Из всех дней, в которые проходили измерения, только 22 июля погоду в районе измерений определяла восточная часть циклона. За весь период шаропилотного зондирования также наблюдалось прохождение только одного фронта. С учетом данных зондирования и карт абсолютной топографии были посчитаны направления основного потока во время измерений (см. первые две цифровые колонки табл. 1).

Таблица 1

**Повторяемость (%) направления основного потока в период запуска шара-пилота в 1998 и 1999 гг.**

Направление переноса	1998 г., 29 запусков		1999 г., 28 запусков						
	АТ <sub>850</sub>	АТ <sub>700</sub>	АТ <sub>850</sub>	АТ <sub>700</sub>					
Северное	0	3,4	0	7,1					
Северо-восточное	3,5	0	0	0					
Восточное	3,4	0	0	0					
Юго-восточное	0	3,5	0	0					
Южное	6,9	3,4	0	0					
Западная четверть	Юго-западное	3,5	3,5	17,8	7,1				
	Западное	0	6,9	3,4	13,8	35,6	85,7	25	92,9
	Северо-западное	3,4	6,9	32,1	60,8				
Неустойчивое	79,3	75,9	14,3	0					

Из табл. 1 видно, что на изобарической поверхности 850 гПа на направление западной четверти приходится примерно 7% от общего числа возможных направлений, на поверхности 700 гПа примерно 14%, в то время как процент неустойчивого направления на этих поверхностях равен примерно 79 и 76 соответственно.

В ходе измерений в 1998 г. не удалось выявить наличие ВКЦ, имевшей место во время экспедиций 1991, 1995 и 1997 гг. Отсутствие циркуляции объясняется сложившейся синоптической ситуацией, когда на котловину озера в течение продолжительного времени не оказывал влияния западный устойчивый перенос. В этот период в котловине озера в районе побережья ветровой режим полностью определялся местными ветрами: горно-долинной циркуляцией и бризами с выраженным суточным ходом. Из этого следует, что при отсутствии механизма поддержания циркуляции, которым можно считать западно-восточный перенос, ВКЦ распадается и прекращает свое существование.

Экспедиция проводилась на восточном берегу озера в районе п. Боярск в период с 10 по 20 августа 1999 г. На этот раз измерения велись в одном пункте наблюдений на стационарной базе. Всего в ходе экспедиции было произведено 28 запусков шаров-пилотов. У поверхности земли в это время преобладал антициклонический тип погоды. В течение 4 дней из семи погода определялась той или иной частью антициклона, двух дней – малоградиентным полем повышенного давления и лишь в первый день погода была обусловлена циклоном, центр которого располагался в Монголии.

Два фронта, связанные с этим циклоном, проходили через пункт наблюдения в период ветрового зондирования. Прохождение второго из них привело к разрушению циркуляционной ячейки. Фронты, проходящие через Боярск 13 и 17 августа, наблюдались на фоне малоградиентного поля давления. В период экспедиции на уровне 850 гПа в течение трех дней наблюдалась юго-западная часть циклона, в течение одного дня – седловина и двух дней – малоградиентное поле, одного дня – северо-западная периферия антициклона. На высоте примерно 3000 м преобладала контрастная зона, которая обуславливала западный либо северо-западный перенос.

Таким образом, синоптическая ситуация в экспедиционный период характеризовалась преобладанием западно-восточного переноса. В двух колонках справа табл. 1 показано, что для АТ<sub>850</sub> и АТ<sub>700</sub> большинство наблюдений проводилось при направлении переноса, находящемся в западной четверти. Из 28 запусков наличие циркуляции было подтверждено 20 запусками, а из 8 оставшихся 4 запуска были проведены во время прохождения атмосферных фронтов при смене типа воздушных масс, один запуск был проведен в условиях неустойчивого направления переноса на высоте 1500 м, и три запуска были сделаны в период с 15.00 по 21.00 местного времени (табл. 2).

Полученное подтверждение существования циркуляции в 20 случаях объясняется тем, что в период измерений наблюдался основной перенос с западной составляющей. Было также зафиксировано, что при установлении в районе исследования малоградиентного поля происходят ослабление и распад циркуляции, например 13.08.99 в 9.00 (см. табл. 2). Однако меха-

Таблица 2

**Наличие (+) и отсутствие (-) круговой циркуляции в период с 11 по 19 августа 1999 г.**

Дата	Время запуска шара-пилота (местное)							
	03	06	09	12	15	18	21	24
11.08.99			(+)		(-)			
12.08.99						(±)	(+)	
13.08.99			(-)		(-)		(-)	
16.08.99	(+)			(+)	(±)	(±)	(±)	(+)
17.08.99	(+)		(+)	(+)		(-)	(-)	
18.08.99						(±)		(+)
19.08.99	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(±)	(+)

Примечание. (±) означает ситуацию, когда нижняя часть ячейки размыта.

низ циркуляции обладает и инерционными характеристиками. При установлении 17.08.99 в 12.00 малоградиентного поля с момента предыдущего измерения 17.08.99 в 9.00 не произошло видимого ослабления циркуляции. Остальные случаи, в которых циркуляция не фиксировалась, будут подробно рассмотрены нами ниже.

Из анализа влияния синоптической обстановки на развитие и существование ВКЦ можно сделать вывод, что наличие западного переноса на уровне верхней границы хребтов, окаймляющих Байкал с западной стороны, является обязательным условием существования внутренней циркуляции в котловине озера. Мы рассматриваем этот перенос как основной механизм, приводящий в движение всю систему циркуляции. Он передает часть своей энергии западной ветви циркуляции сразу после переваливания через хребты западного побережья и оказывает влияние на восточную ветвь перед выходом из котловины в восточном направлении.

Принимая во внимание то, что ВКЦ не ограничена летним периодом действия, а также отмечается зимой и является устойчивым явлением во времени [1], важно подчеркнуть, что циркуляционные ячейки имеют ряд особенностей, связанных с их внутренней физикой. Так, из второй теоремы Гельмгольца, условия которой хорошо выполняются в атмосфере, следует, что вихревая трубка не может иметь разрыва внутри атмосферы и может быть замкнута либо сама на себя, либо на земную поверхность [4]. В нашем случае это первый вариант, а именно: ветви циркуляции замыкаются сами на себя, обеспечивая тем самым баланс количества движения. Этот факт требует от циркуляции отсутствия разрывов в местах ее перехода от западной к восточной ветви и наоборот, что отличает ее от таких явлений, как продольные ветры. Сохранение и поддержание существования такого сложного и значительного образования возможны

только при внутренней закрутке ветвей циркуляции, подобно схеме, изображенной на рис. 1.

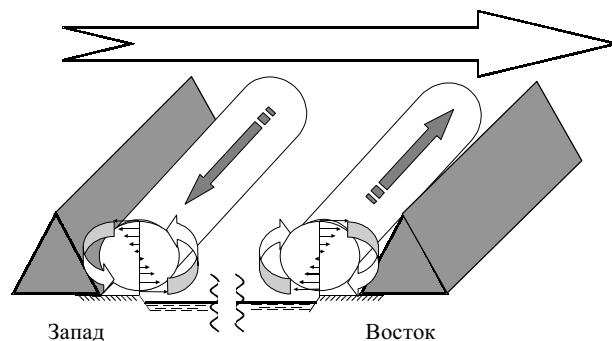


Рис. 1. Схема вращения воздуха в восточной и западной ветвях ВКЦ:  $\Rightarrow$  - основной перенос;  $\rightarrow$  - продольное направление движения воздуха;  $\curvearrowright$  - направление закрутки ветвей ВКЦ

Поэтому представляет интерес исследование внутренней структуры циркуляционной ячейки. Эту работу предполагалось произвести в ходе экспедиции 1998 г. Для этого был использован метод запуска шаров-пилотов из трех пунктов, лежащих на одной прямой, перпендикулярной линии берега, непосредственно от уреза воды и с двух равноудаленных от этого места точек - с поверхности озера и с берега. Но сложившаяся синоптическая ситуация не позволила решить поставленные задачи.

Частично эту задачу удалось решить в рамках экспедиции 1999 г. На этот раз ставилась задача исследовать вертикальную структуру восточной циркуляционной ячейки, ее пространственные характеристики и временную динамику. В результате проведенной работы удалось получить схематическое представление вертикального поперечного сечения вихревой трубки (рис. 2), маленькими стрелками обозначены векторы

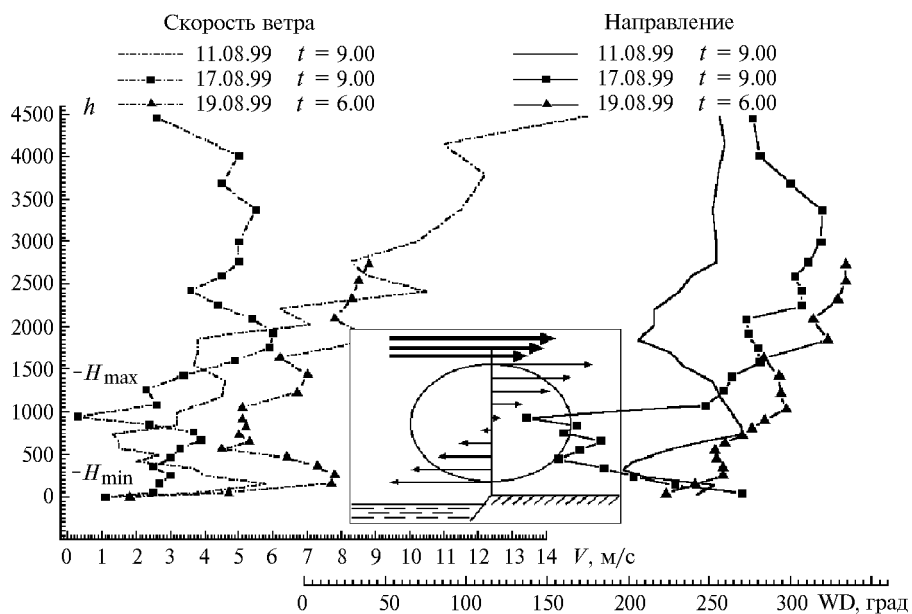


Рис. 2. Вертикальное распределение скорости и направления ветра в районе п. Боярск в августе 1999 г.

скоростей внутри циркуляционной ячейки, перпендикулярные линии берега, а большими – основной перенос.

Для наглядности на рисунке представлено также несколько высотных профилей скорости и направления ветра, хорошо иллюстрирующие общую картину изменения скорости ветра с высотой и поведение шара-пилота в пределах циркуляционного вихря, нижняя граница –  $H_{\min}$  соответствует 250–300 м, верхняя граница –  $H_{\max}$  находится в пределах 1400–1500 м. Такую форму кривых скорости ветра, где ее минимальное значение приходится на высоту порядка 800 м, а максимальное находится в районе верхней и нижней границ, можно объяснить уменьшением перпендикулярной к линии берега составляющей скорости ветра в срединной части циркуляционной ячейки. Проекция траектории полета шара-пилота на поверхность земли показана на рис. 3, из которого хорошо

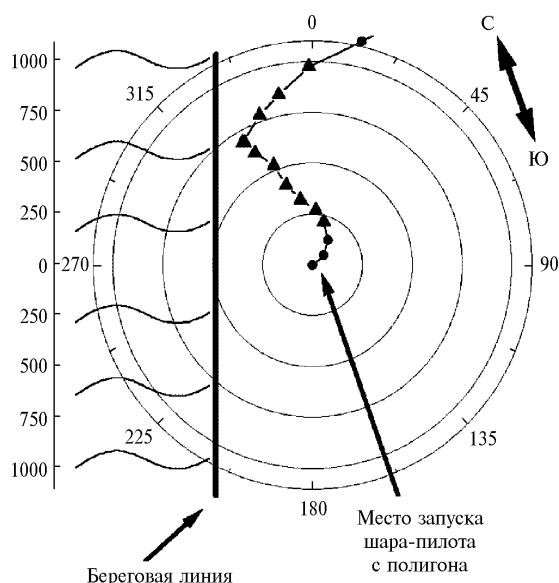


Рис. 3. Горизонтальная проекция положения шара-пилота в зоне действия циркуляционной ячейки: 17 августа 1999 г. 09.08 местного времени: (—●—) –  $h < 301$  м и  $h \geq 1513$  м – за границами ячейки; (—▲—) –  $301 \text{ м} \leq h < 1513 \text{ м}$  – в пределах ячейки

видно, что после попадания в зону действия циркуляционной ячейки шар-пилот до достижения половины высоты вихря отклоняется от направления, параллельного линии берега, влево, после чего начинает отклоняться вправо, приобретая на выходе из зоны действия вихря направление основного переноса. В центральной части ячейки мы наблюдаем только направление движения воздуха, параллельное линии берега и направленное к северной оконечности озера.

*M. Yu. Arshinov, B. D. Belan, G. A. Ivlev, T. M. Rasskazchikova. Spatial-temporal characteristics of the air circulation in the hollow of Lake Baikal.*

The dependence of the initiation and conservation of the in-hollow air circulation in the boundary atmospheric layer of Lake Baikal on synoptic conditions and the time of day (by aircraft measurements of 1991 and 1995 years and balloon measurements of 1997–1999) is found. The existence of such a circulation in the presence of the west component in the direction of the main flow, beginning at the height of the isobar surface of 850 gPa, is proved. A destructive impact of the fronts on the in-hollow circulation is noticed. The mechanism of vertical distribution of the wind speed and direction in the east branch of the circulation is clarified based on the measurements conducted in Boyarsk settlement.

Отдельно нужно выделить результаты, связанные с ослаблением и разрушением ВКЦ. Помимо установления в районе озера ситуации, когда отсутствует западный перенос, циркуляция также может распадаться под воздействием фронтов. Из пяти фронтов, проходивших в период измерений в районе п. Боярск, в четырех случаях циркуляция была разрушена. К сожалению, нам не удалось выяснить, как быстро восстанавливается циркуляционная ячейка после прохождения фронтов, так как их прохождение было связано с усилением облачности и появлением осадков, что в свою очередь препятствовало производству запусков шаров-пилотов. После прохождения фронтов, приводящих к разрушению циркуляционной ячейки, измерения удавалось возобновить не ранее чем через сутки.

В 1999 г. были получены данные по поведению циркуляции в дневное время, к 15 ч местного времени происходит ослабление или разрушение вихревой трубки в ее нижней части от 300 до 600 м над уровнем озера, к 16 ч обычно происходит ее полное разрушение. Восстановление вихревой трубки начинается с ее верхней части от 700 до 1400 м и завершается около 21 ч (см. табл. 2). Именно на период с 15.00 по 21.00 приходятся измерения, в которых циркуляция фиксируется в размытой форме либо не фиксируется вовсе. Пока рано давать этому явлению какие-либо объяснения, но можно предположить, что это происходит из-за развивающихся в дневное время восходящих конвективных потоков, разрушающих или отодвигающих ветвь циркуляции над местом запуска шара-пилота. Дать более точное объяснение, что является причиной разрушения ячейки – конвекция либо какие-то другие механизмы, можно, только имея данные радиозондирования, которые дают возможность определить устойчивость температурной стратификации атмосферы.

В заключение мы выражаем свою признательность всем участникам экспедиций, работникам Томского гидрометеоцентра, без помощи которых было бы невозможно проведение этой работы, и Президиуму СО РАН за финансовую поддержку в рамках конкурса - экспертизы молодежных проектов.

1. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А. и др. // Метеорология и гидрология. 1999. № 8. С. 66–71.
2. Губарь Г.А. // Сборник работ Иркутской ГМО. 1967. Вып. 2. С. 1–51.
3. Зуев В.Е., Антонович В.В., Белан Б.Д. и др. // Доклады РАН. 1992. Т. 325. № 6. С. 1146–1150.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
5. Шамшева Т.В. // Сборник работ Иркутской ГМО. 1967. Вып. 2. С. 52–79.