

В.А. Гладких, И.В. Невзорова, С.Л. Одинцов, В.А. Федоров

Анализ структуры поля ветра в нижнем слое атмосферы на побережье оз. Байкал

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 5.06.2002 г.

Обсуждаются результаты дистанционного акустического зондирования профилей скорости и направления ветра в нижней части тропосферы на юго-западном побережье оз. Байкал. Измерения проводились с 26 июня по 16 июля 2001 г. Рассмотрены особенности структуры потоков в различных ситуациях. Приводятся гистограммы направлений («розы ветров») на разных высотах, включая приземный слой. Выделяются характерные направления движения средних потоков за весь период измерений и отдельно для дневных и ночных условий.

В течение последнего десятилетия Институт оптики атмосферы СО РАН провел несколько комплексных экспедиций в районе оз. Байкал. Одна из целей этих экспедиций – изучение особенностей движения воздушных масс в котловине озера. В 1991 г. по результатам самолетного зондирования нижней тропосферы была обнаружена замкнутая циркуляция воздуха вдоль периметра озера [1]. Детальные самолетные и шаропилотные наблюдения проводились в последующие годы [2, 3]. По результатам измерений сформулирована гипотеза о структуре циркулирующего потока, представляющего собой вытянутый тор, движущийся вдоль всего побережья озера и вращающийся вокруг своей оси по часовой стрелке, если смотреть вниз по потоку [3]. Его характерный вертикальный размер составляет 700–1000 м, высота нижней границы – 200–400 м.

Для уточнения особенностей циркуляции летом 2001 г. вновь была проведена экспедиция на оз. Байкал. Локальная и дистанционная диагностика пограничного слоя атмосферы и прибрежного слоя воды осуществлялась техническими средствами ИОА СО РАН. Для детального исследования структуры нижней части тропосферы в состав экспедиционной аппаратуры был включен содар «Волна-3» [4], дополненный ультразвуковой метеостанцией «Метео-2», также изготовленной в ИОА СО РАН [5]. Содар работал с 26 июня по 16 июля 2001 г. Общая наработка составила около 400 ч. Регистрировалась структура температурной турбулентности в диапазоне высот 40–730 м над уровнем подстилающей поверхности. При наличии данного типа турбулентности измерялись профили скорости и направления ветра с дискретностью 13–15 м по высоте и примерно 15–17 с по времени. Ультразвуковая метеостанция, размещенная на высоте 4 м в 10 м от береговой линии, обеспечивала измерения скорости и направления ветра, температуры, влажности и давления воздуха с дискретностью примерно 10 отсчетов в секунду. Необходимо отметить,

что публикуемые ниже сведения о высотном-временном распределении вектора ветра на побережье оз. Байкал, по-видимому, являются единственными в своем роде. Нам неизвестны другие измерения с подобной дискретностью по высоте и по времени.

Пункт измерений находился на юго-западном побережье оз. Байкал с координатами около 51°54' с. ш. и 105°03' в. д. Береговая линия была близка к направлению СВ–ЮЗ (55–235°). Орография района измерений характеризовалась наличием горных склонов, окаймляющих побережье практически от береговой линии. Содар размещался в устье небольшого ущелья, длина пологой части которого была менее 1 км. Высота склонов, непосредственно окружающих пункт наблюдений, не превышала 200–250 м. На расстоянии нескольких километров от берега высота гор достигала 800–900 м. Более масштабное ущелье, охватывающее, по-видимому, существенное влияние на потоки в данной местности, располагалось примерно в 1,5 км к северо-востоку от пункта наблюдений. Протяженность его пологой части в глубь горной территории составляла не менее 10 км. Ширина в устье – до 800 м.

Синоптическая ситуация за период наблюдений претерпевала значительные изменения. Происходили существенные вариации атмосферного давления. В ясную погоду имел место достаточно большой размах суточного хода температуры воздуха. Относительная влажность воздуха за короткий период времени могла меняться на десятки процентов. Температура поверхностного слоя воды вблизи берега была относительно стабильна и изменялась в пределах $(8,5 \pm 2,5)$ °С. Для представления об изменчивости метеоусловий в пункте наблюдения на рис. 1 показаны графики приземного давления P , температуры воздуха T и относительной влажности u за период с 26 июня по 3 июля 2001 г.

Влияние ландшафта приводит к формированию весьма сложной пространственно-временной картины

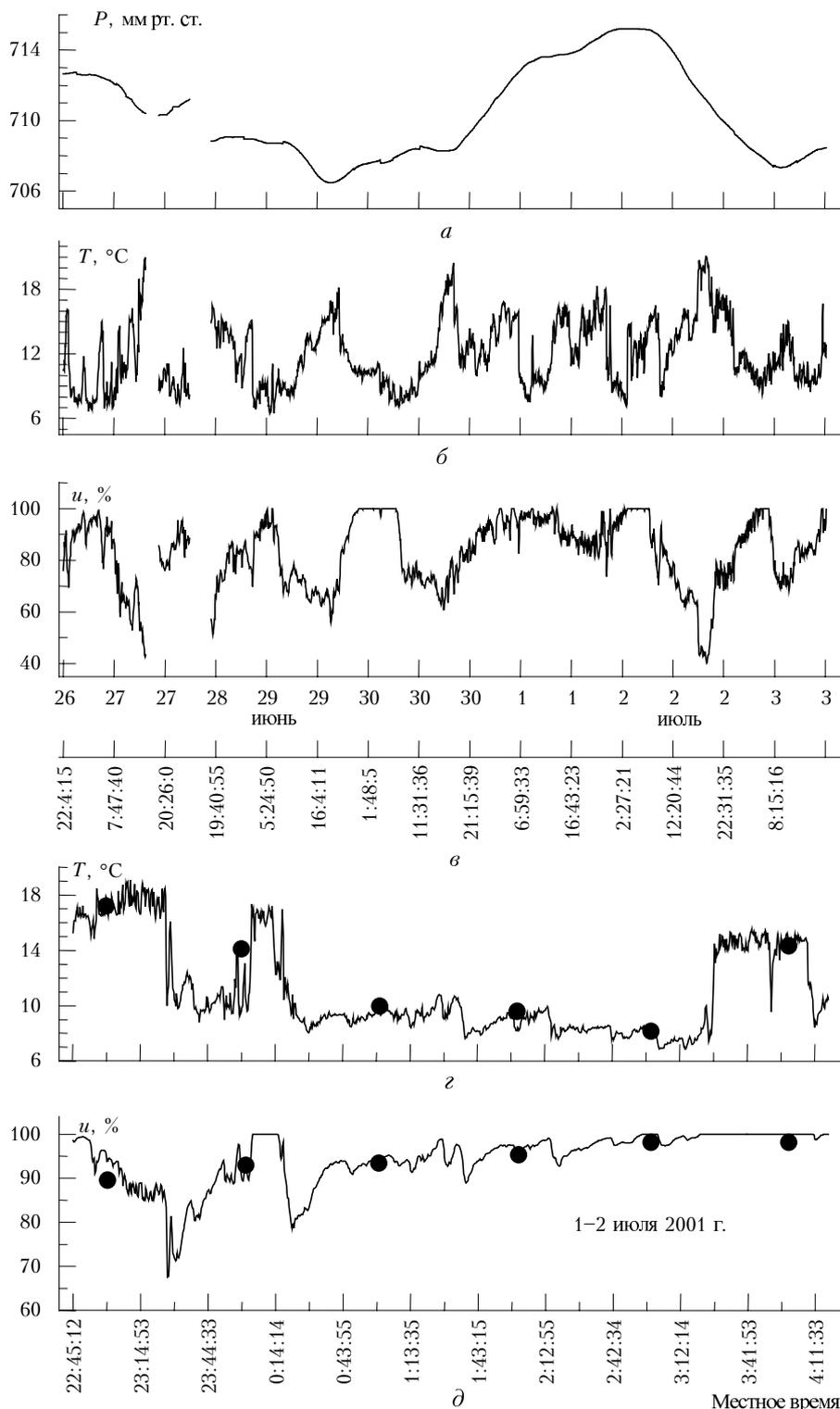


Рис. 1. Зависимость от времени метеопараметров, измеренных ультразвуковой метеостанцией «Метео-2»: развертка с 22:04 26/06/2001 по 18:22 3/07/2001 с 5-минутным усреднением атмосферного давления (а), температуры (б) и относительной влажности воздуха (в); развертка с 22:45 1/07/2001 по 4:17 2/07/2001 с 30-секундным усреднением температуры (г) и относительной влажности воздуха (д). Кружки – данные, полученные стандартными метеоприборами

потоков различных термодинамических параметров атмосферы. Возможность наблюдения их тонкой структуры непосредственно в приземном слое была реализована благодаря ультразвуковой метеостанции,

работавшей в непрерывном режиме. В частности, со стороны ущелья довольно часто регистрировались потоки воздуха длительностью 20–40 мин, температура в которых отличалась от окружающей на 6–8 °С.

Иногда они напоминали фён. Как известно, фён возникает при переваливании воздушных масс через горный хребет. Для его возникновения необходимо такое влагосодержание воздуха, чтобы в процессе подъема воздушной массы к вершине хребта происходила конденсация водяного пара с выделением тепла. Тогда переваливший через хребет воздух будет иметь более высокую температуру и пониженную относительную влажность. На рис. 1,з,д показан эпизод, имевший место в ночь с 1 на 2 июля 2001 г. В нем хорошо выражены три относительно кратковременных потока нагретого воздуха, скатывавшегося вниз по ущелью (см. рис. 1,з). Первый из них сопровождался понижением влажности (см. рис. 1,д), т.е. предположительно эффектом фёна.

В процессе стандартных метеорологических наблюдений нашими коллегами из лаборатории оптической погоды ИОА СО РАН было проведено более 30 запусков шаров-пилотов для измерения структуры ветровых потоков до высот $H = 3\div 4$ км. На рис. 2 показан пример сравнения одного шаропилотного и трех содарных профилей скорости и направления ветра. Пуск данного шара-пилота состоялся ночью 3 июля 2001 г. в 3 ч 27 мин местного времени. Точка запуска находилась на берегу в 1,5 км к северо-востоку от места размещения содара. Нижняя точка профиля направления ветра при шаропилотном измерении (рис. 2,б) соответствует 367° вместо 7° , чтобы не нарушать гладкость высотного хода данного параметра. В профили ветра для интервала времени с центром в 3 ч 34 мин включены также данные ультразвуковой метеостанции (нижняя точка соответствующего профиля). Содарные данные усреднялись по 10-минутным интервалам, центры которых указаны на рис. 2. Для них приведены 90%-е доверительные интервалы. Можно полагать, что, несмотря на некоторые отличия, шаропилотные и содарные профили неплохо согласуются между собой.

Подробный анализ результатов измерений для уточнения особенностей мезомасштабной циркуляции вдоль береговой линии Байкала проводится нашими коллегами из лаборатории оптической погоды ИОА СО РАН. В данной статье представлены только некоторые результаты по выявленным особенностям структуры поля ветра, полученной с помощью акустического зондирования.

Турбулентный режим температурного поля, регистрировавшийся содаром, был сильно изменчив как по времени, так и по высоте. Нам не удалось выявить явного суточного хода в развитии турбулентных областей. Часто имела место слоистая структура, которая реализовывалась как днем, так и ночью. Наибольшая интенсивность турбулентности простиралась до высот порядка 300–350 м. Именно в этом диапазоне высот получены основные результаты зондирования. Сигналы принимались и с высот более 350–400 м, но их интенсивность была, как правило, невелика. Сodar располагался в зоне активной жизнедеятельности участников экспедиции, и уровень помех достигал в дневное время значительных величин, что снижало

высотный потенциал восстановления профилей скорости и направления ветра.

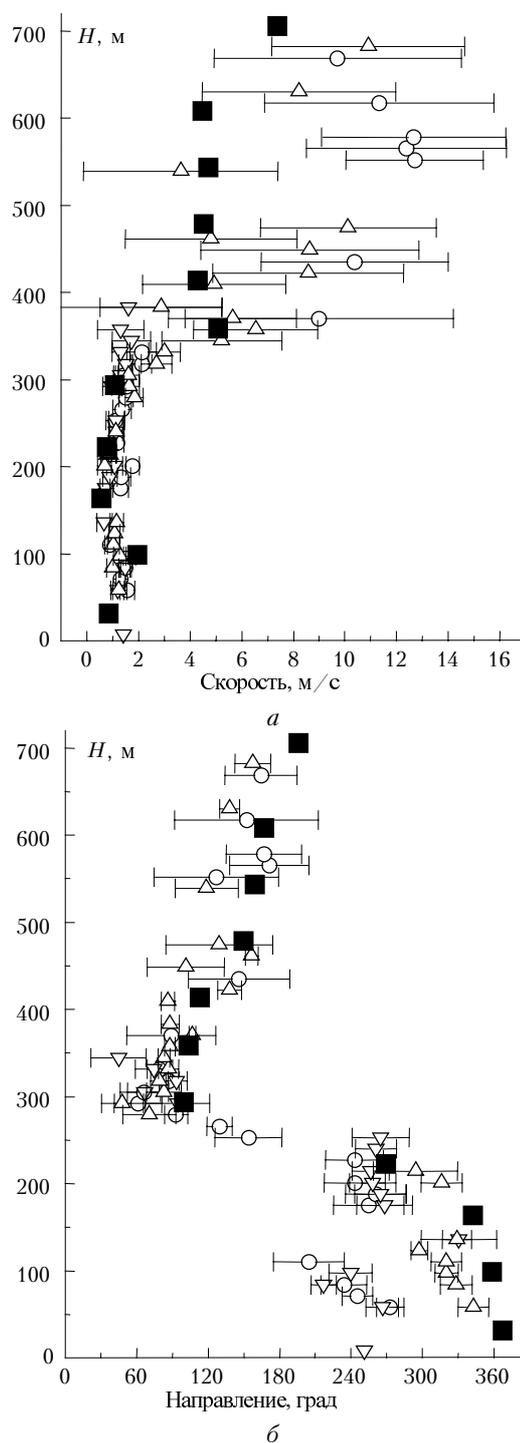


Рис. 2. Высотные профили скорости (а) и направления (б) ветра, полученные 3 июля 2001 г.; шаропилотные измерения – темный квадрат (момент запуска 3:27 местного времени), а содарные – светлые значки (О – 3:24, ∇ – 3:34, Δ – 3:43). Первые нижние точки в содарных профилях для момента времени 3:34 – это усредненные за 5 мин данные ультразвуковой метеостанции

Сложная структура турбулентного поля, регистрируемая содаром, отражает сложность процессов,

происходящих в пограничном слое на протяжении суток. Комбинация эффектов горно-долинных и бризовых циркуляций приводит к перемешиванию различных по термодинамическим свойствам воздушных масс и к установлению весьма специфических турбулентных полей и средних потоков. Например, по наблюдениям в Томске скачкообразные по высоте, но устойчивые по времени изменения направления ветра реализуются только при окклюзии фронтов. В условиях же байкальского побережья скачкообразные сдвиги направлений ветра регистрировались нами многократно.

Приведем несколько характерных примеров со сложными и достаточно устойчивыми профилями ветра. Основной сдвиг направления ветра в первом

эпизоде, приведенном на рис. 2, происходит на высотах 260–280 м. По мере удаления от границы раздела направление потока плавно меняется. Обратим также внимание на «дрейфы» направления во времени в нижней части профиля. Можно предположить, что таким образом проявляется влияние стоковых процессов в ущелье, в устье которого работал содар. Данная ситуация довольно типична для скачкообразного изменения направления потока. В частности, на рис. 3, *a, б* показаны два эпизода, один из которых (3 июля 2001 г.) является продолжением ситуации, представленной на рис. 2, что свидетельствует об устойчивости структуры потока во времени. Второй эпизод (30 июня 2001 г.) демонстрирует «трехслойную» структуру потока с небольшими скачками направления

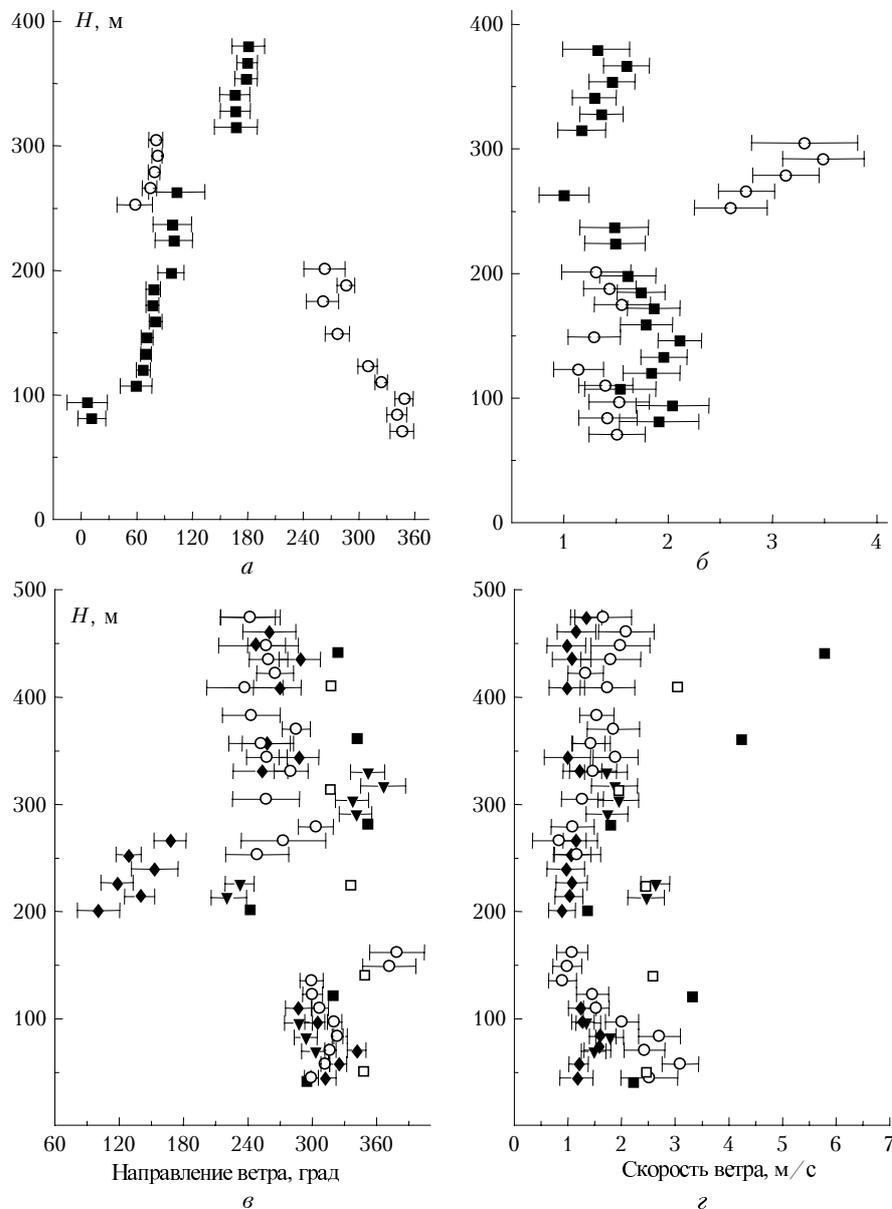


Рис. 3. Высотные профили скорости и направления ветра, полученные при шаропилотном и акустическом зондированиях: *a, б* – содарные измерения: \circ – 3/07/2001 в 6:55, \blacksquare – 30/06/2001 в 1:33; *в, г* – шаропилотные (\blacksquare – 1/01/2001 запуск в 00:00, \square – 11/07/2001 запуск в 6:00) и содарные измерения (\blacktriangledown – 1/07/2001 в 00:00, \blacklozenge – 11/07/2001 в 5:40, \circ – 11/07/2001 в 6:00). Все содарные профили получены с 10-минутным усреднением. На графиках указаны 90%-е доверительные интервалы

на высотах примерно 100 и 260 м. Характерно, что нижний и верхний слои в этом эпизоде имеют практически встречные направления движения, напоминающие режим бризовой циркуляции, в то время как средний слой движется примерно перпендикулярно к ним вдоль береговой линии. Подобная структура потока по основным признакам напоминает мезомасштабную циркуляцию, описанную в [3], но имеет существенно меньшие вертикальные размеры и реализована в ночное время.

В эпизодах от 3 июля 2001 г., представленных на рис. 2 и 3, а, б, также прослеживается упорядоченное движение вдоль береговой линии с одновременным признаком бризовой циркуляции. Но здесь отличительной чертой является практически встречное движение на высотах порядка 200 (в секторе углов 260–270°) и 300 м (в секторе углов 80–90°). Мы затрудняемся дать исчерпывающее объяснение причин формирования такой структуры потока. Можно только предположить, что заметную роль здесь играют процессы тепломассообмена между приводным слоем воздуха и долиной реки Б. Коты, имеющей значительные размеры.

Еще одним примером сложной структуры ветрового потока с достаточно устойчивыми во времени характеристиками служат «затопленные струи», когда внутри некоторого движущегося примерно в одном направлении слоя атмосферы имеется поток с другим направлением движения. Два эпизода с подобными ситуациями приведены на рис. 3, в, г, причем в обоих случаях имеется сравнение содарных измерений с шаропилотными. Эпизод от 1 июля 2001 г. удачен тем, что шаропилотные наблюдения произведены именно в тот период времени, когда имела «затопленная струя». Эпизод от 11 июля 2001 г. (рис. 3, в, г) содержит два осредненных за 10 мин содарных профиля скорости и направления ветра, один из которых (5:40) показывает «струю» на высотах 200–270 м со сдвигом направления на 160–180°. Второй профиль (6:00) демонстрирует неплохое совпадение с полученными в это же время шаропилотными данными, но отчетливой «струи» не имеет. Анализ этих и других результатов измерений показывает, что длительность «затопленных струй» заметно меньше времени существования слоев со сдвигами направлений, рассмотренных выше. Ограниченность по времени отражает, видимо, локальность источников, генерирующих такую структуру ветрового потока.

Короткий период наблюдений не позволяет в полном объеме изучить закономерности, присущие процессам формирования и разрушения сложных структур ветрового потока над пунктом, где проводились измерения. Тем не менее мы попытались систематизировать полученные материалы и выделить наиболее характерные направления потоков в нижней части пограничного слоя атмосферы. С этой целью по результатам наблюдений были построены гистограммы направлений ветра («розы ветров») на разных высотах, включая приземные измерения ультразвуковой метеостанцией «Метео-2».

На рис. 4 приведены гистограммы для набора высот от 4 до 400 м. При построении «розы ветров» содарные данные сначала усреднялись по 10-минутным интервалам, а затем заносились в гистограммы. По оси ординат отложены частоты попадания направлений

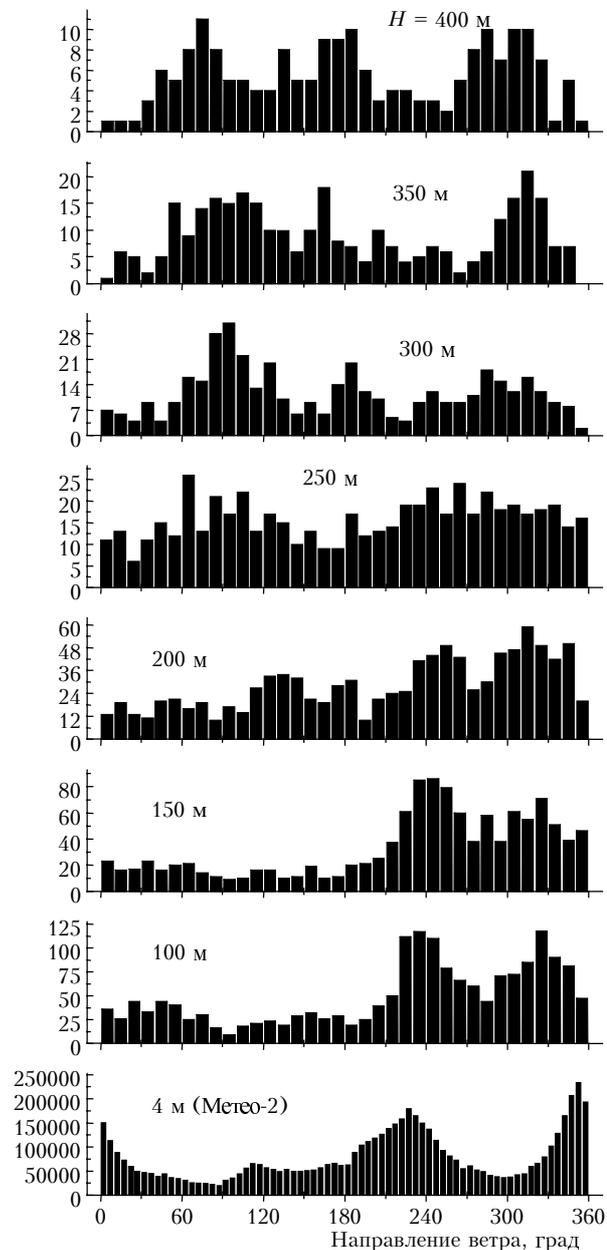


Рис. 4. Гистограммы направления ветра, построенные по содарным измерениям с 10-минутным усреднением и с шагом 10° за период наблюдений с 26/06/2001 по 16/07/2001 и по измерениям на ультразвуковой метеостанции «Метео-2» с 26/06/2001 по 3/07/2001 с частотой измерений 10 Гц и шагом по направлению 5°

потока в тот или иной сектор углов. Шаг гистограммы по оси абсцисс составляет для содара 10°, а для ультразвуковой метеостанции 5°. Результаты измерений «Метео-2» использованы без усреднения, поэтому по оси ординат фигурируют такие большие частоты. В качестве исходного материала при обработке

выбирались случаи только с большим значением отношения сигнал-шум, чтобы гарантировать надежность восстановления направления ветра. Поэтому на больших высотах экспериментальных результатов, попавших в гистограммы, оказалось существенно меньше.

В соответствии с представленными на рис. 4 данными можно сделать следующие выводы относительно ветрового режима за весь период наблюдения:

выявлены характерные направления ветра, т.е. те направления, которые наиболее часто встречаются в процессе зондирования;

характерные направления ветра меняются с высотой;

чем больше высота, тем менее выражены характерные направления (правда, это может быть следствием малого количества экспериментальных данных).

Дальнейший анализ «розы ветров» проводился с разделением измерений по принципу «день – ночь». К классу «день» относились измерения ветра в период с 6 до 20 ч местного времени, а к классу «ночь» – остальной интервал суток. Такая градация была достаточно условной, но тем не менее позволила сделать некоторые выводы о суточном ходе характерных направлений на разных высотах.

На рис. 5,а представлены гистограммы направлений ветра в дневных условиях. Для них характерно следующее:

на небольших высотах выделяется основное направление потока в секторе углов 220–250° (выделенные здесь и далее секторы носят ориентировочный характер); с увеличением высоты «однонаправленность» потока размывается;

на высоте 300 м выделяется направление потоков в секторе углов 80–100°;

в слое атмосферы ниже 100 м имеют место потоки со стороны озера (сектор углов 100–180°);

днем одновременное присутствие на разных высотах потоков с направлений 220–250 и 80–100° маловероятно.

Классической дневной бризовой циркуляции в данном случае нет. Возможно, содар не смог достичь той высоты, где имеется движение воздушных масс от суши в сторону озера (сектор углов 330–360°).

На рис. 5,б представлены гистограммы направлений ветра в ночных условиях. Для них характерно следующее:

ультразвуковая метеостанция отчетливо фиксирует стоковые течения вдоль ущелья в сторону озера (сектор углов 340–360–20°);

в нижних слоях атмосферы ночью ветер со стороны озера практически отсутствует;

на небольших высотах выделяются два сектора направлений потоков: 220–270 и 300–350°;

с увеличением высоты «роза ветров» становится более равномерной;

на высоте 300 м отчетливо просматриваются три характерных диапазона направлений – 80–120, 180–200 и 280–340°;

одновременно на разных высотах могли присутствовать только потоки из секторов 80–120 и 220–250 или 80–120 и 300–350°; остальные комбинации характерных направлений реализовывались существенно реже и имели кратковременные периоды.

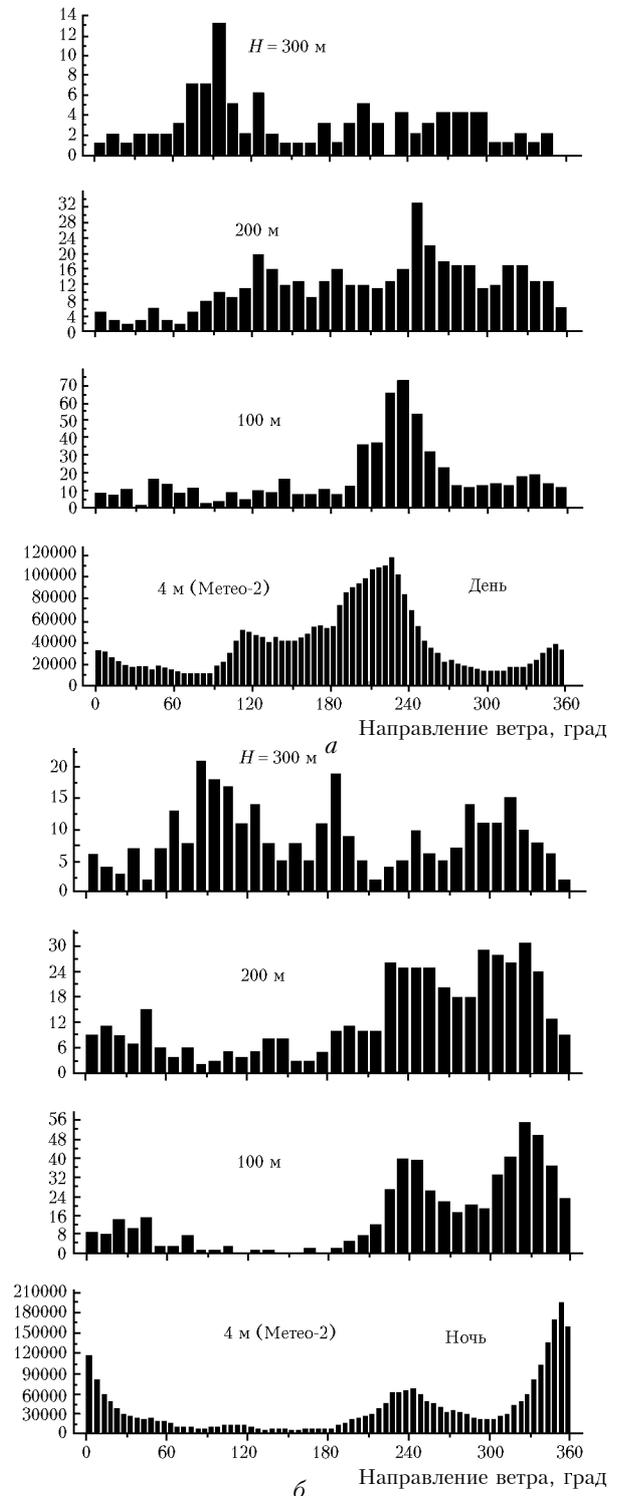


Рис. 5. Гистограммы направления ветра на разных высотах, рассчитанные для дневных (а) и ночных (б) условий. Режимы обработки аналогичны рис. 4

Сопоставление дневных и ночных гистограмм направлений ветра показывает, что имеются существенные различия в структуре потоков в дневное и ночное время. Особенно на высотах до 200–250 м. Возможно, это связано с орографией местности, поскольку именно такую высоту имели горы, окружающие пункт наблюдения. Напомним, что береговая линия в точке наблюдений соответствовала направлению примерно 55–235°.

Приведенные выше результаты акустического зондирования скорости и направления ветра в нижней части пограничного слоя могут послужить не только для уточнения структуры мезомасштабной циркуляции вдоль береговой линии оз. Байкал, но и стать основой для разработки моделей движения воздушных масс в системе «озеро – прибрежные ущелья».

Мы благодарим сотрудников лаборатории оптической погоды ИОА СО РАН за предоставленную возможность сравнения данных акустического зондирования с шаропилотными измерениями ветрового потока.

V.A. Gladkikh, I.V. Nevzorova, S.L. Odintsov, V.A. Fedorov. Analysis of wind field structure in the lower atmosphere at Lake Baikal shore.

The paper discusses the results of remote acoustic sensing of wind speed and direction profiles in the lower troposphere at the southwestern shore of Lake Baikal. Measurements were conducted since June 26 till July 16 of 2001. Peculiarities of the flow structure in various situations are considered. Wind direction histograms (wind roses) at different heights, including the surface layer, are presented. Characteristic directions of mean flows are revealed for the whole period of measurements and for daytime and nighttime separately.

Работа выполнена при финансовой поддержке Междисциплинарного гранта СО РАН № 56, Экспедиционного гранта СО РАН за 2001 г.

1. Зуев В.Е., Антонович В.В., Белан Б.Д., Жбанов Э.Ф., Микушев М.К., Панченко М.В., Поданев А.В., Толмачев Г.Н., Щербатова А.В. Феномен круговой циркуляции в котловине озера Байкал // Докл. РАН. 1992. Т. 325. № 6. С. 1146–1150.
2. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Поданев А.В., Покровский Е. В., Рассказчикова Т.М., Скляднева Т.К. Некоторые характеристики циркуляции воздуха вдоль береговой линии оз. Байкал // Метеорол. и гидрол. 1999. № 8. С. 66–71.
3. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Рассказчикова Т. М. Пространственно-временные характеристики циркуляции воздуха в котловине оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 4. С. 290–293.
4. Гладких В.А., Макиенко А.Э., Федоров В.А. Акустический доплеровский локатор «Волна-3» // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 437–444.
5. Гладких В.А. Комплекс «Метео-2» в экспедиции «Байкал-2001»: Тезисы докл. // Аэрозоли Сибири. VIII Рабочая группа. Томск, ноябрь, 2001. Томск: Изд-е ИОА СО РАН. 2001. С. 108.