

УДК 551.554 551.510.522

О ВЫСОТЕ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ ВОЗДУХА ПО СОДАРНЫМ ДАННЫМ

М. А. Локощенко*

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, географический факультет,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: loko@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 11.03.2023 г.

После доработки 30.10.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

По данным многолетнего акустического зондирования атмосферы доплеровским содаром MODOS производства МЕТЕК (Германия) в Метеорологической обсерватории МГУ получены средние оценки высоты приземного слоя воздуха в Москве. Исходя из предположения о близости средних условий к безразличной стратификации, эта высота как вершина квазилинейного участка среднего многолетнего профиля скорости ветра в полулогарифмических координатах составляет 40–60 м. Высота обращения дневного и ночного профилей в среднем за год составляет ~95 м. Параметр шероховатости в условиях неплотной, но высокой городской застройки в районе МГУ в Москве равен ~5 м.

По критерию постоянства направления ветра в приземном слое воздуха его высота проявляется в среднемесечных профилях направления ветра поверх “мертвой зоны” содара (40 м) приблизительно в одном случае из трех и обычно составляет при этом 60 м, реже – 80 или 100 м. В остальных случаях она, видимо, маскирована “мертвой зоной”. Средняя высота приземного слоя в соответствии с этим подходом, вероятно, немногим менее 50 м, что близко к оценке, полученной на основе логарифмического распределения скорости ветра в этом слое с высотой. Суточный ход высоты приземного слоя воздуха отмечен наибольшими значениями в середине дня (80–100 м летом в условиях преобладающей неустойчивой стратификации и 60–80 м зимой) и наименьшими (менее 40 м) поздним вечером и ночью летом и с вечера до полудня зимой.

Ключевые слова: высота приземного слоя, эмпирические оценки, профили скорости и направления ветра, логарифмический закон, высота обращения, сила Кориолиса, правый поворот, слой Экмана, параметр шероховатости, содар

DOI: 10.31857/S0002351524010061

1. ВВЕДЕНИЕ

Высота приземного слоя воздуха H является важным показателем, имеющим как теоретическое, так и практическое значение и требующим экспериментальных оценок. Она непостоянна и зависит от времени суток, времени года, географических условий, определяющих степень шероховатости поверхности и ее термической однородности, стратификации атмосферы, а также влияющих на нее синоптических условий. Кроме того, поскольку сам по себе приземный слой определяется неоднозначно (как слой постоянных турбулентных потоков, постоянного направления ветра, больших значений вертикальных градиентов температуры воздуха T и скоро-

сти ветра V , логарифмического распределения V с высотой и пр.), это также ведет к разным трактовкам его высоты. Согласно известным оценкам, H составляет в среднем ~50 м по данным [Обухов, 1988]; ~50 м по данным [Монин, Яглом, 1965]; ~50–100 м, а в отдельных случаях – от 10–20 до 200–250 м по данным Л.Т. Матвеева [Матвеев, 1984; Хромов, Мамонтова, 1974]; 10–20 м по данным [Белинский, 1948]; ~25–35 м в среднем по данным [Будыко, 1948]; ~50 м при неустойчивой и ~5 м при устойчивой стратификации по данным [Зилитинкевич, 1970]. Подобные оценки, как правило, получены из условия приближенного постоянства потоков тепла, потоков импульса или динамической скорости у поверхности и на уров-

Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на IV Всероссийской конференции с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти академика А.М. Обухова (Москва, 22–24 ноября 2022 г.).

не H с точностью до 1, 5, 10 или 20%. Однако экспериментальных оценок H в литературе крайне мало. К их числу можно отнести результаты проведенных Л.Р. Орленко расчетов изменений теплосодержания на основе измеренных профилей T в Голодной степи в Приаралье. По ее данным, высота слоя с постоянным турбулентным потоком тепла (“квазистационарного подслоя” в терминах М.И. Будыко и Л.Р. Орленко) менялась там от 1–10 м утром и вечером до 200–300 м в середине дня [Орленко, 1955]. Модельные расчеты для условий середины лета в г. Одессе (Украина) показали модальные значения H в диапазоне 50–100 м [Степаненко и др., 2016], однако эта оценка менее надежна из-за использования авторами лишь наземных метеорологических данных, а также принятого ими постоянного отношения высот приземного и пограничного слоев как 1 : 10.

Данные акустического зондирования атмосферы о скорости V и направлении ветра, благодаря своему высокому разрешению, позволяют уточнить известные оценки H . Важным показателем ветрового режима, помимо H , служит также параметр шероховатости z_0 в приповерхностном слое воздуха. Целью данной работы явились экспериментальные оценки H и z_0 для крупного города в условиях равнинной местности средних широт на примере Москвы по многолетним содарным данным. В работе использованы два подхода к оценке высоты H : она рассмотрена по результатам измерений в среднем за период 2004–2013 гг. в качестве верхней границы как слоя с логарифмическим распределением V с высотой, так и слоя с постоянным средним направлением ветра. Видимо, профили направления ветра для оценок высоты приземного слоя используются здесь впервые — во всяком случае, подобные исследования автору неизвестны.

2. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ

В Метеорологической обсерватории МГУ (МО МГУ), расположенной в парковой зоне университета с неплотной застройкой в юго-западной части Москвы в 8 км от центра столицы, с 2004 г. работает доплеровский трехканальный акустический локатор (содар) MODOS производства МЕТЕК, Германия (рис. 1). Рабочая частота его составляет 2 кГц; мощность и длительность импульса — соответственно 1.1 кВт и 120 мс; высотный диапазон данных — от 40 до 500 м; пространственное (вертикальное) разрешение — 20 м;

профили скорости ветра V доступны с осреднением 10 мин. Точность измерений скорости ветра V этим содаром равна ± 0.24 м/с при $V \leq 6$ м/с и $\pm 4\%$ при $V > 6$ м/с, а направления $\pm 3^\circ$ – 4° при $V > 5$ м/с. Отсев шумов в принятом эхо-сигнале производится автоматически в соответствии с комплексным показателем достоверности. В нем учитывается как отношение полезного сигнала к шуму (в принятых к анализу данных оно ≥ 3 дБ, т.е. полезный сигнал должен превышать по мощности шумы не менее чем в два раза), так и вид спектра эхо-сигнала: наличие в нем не слишком широкого и не слишком узкого основного максимума, его значительное превышение над вторичными максимумами, а также над основным максимумом в спектре шума. Столь строгий отсев приводит к частичной потере реального полезного сигнала ради более высокой достоверности принятых к анализу измерений.

Обеспеченность содарными данными о ветре уменьшается с высотой. Их реальная верхняя граница зависит от степени развития термической турбулентности, поскольку пассивными безынерционными поплавками-переносчиками ветра для содара служат мелкомасштабные неоднородности инерционного интервала турбулентного спектра, создающие рассеяние звука. С увеличением высоты атмосферная турбулентность, как динамическая, так и термическая, в целом ослабевает, поэтому реальных и надежных содарных данных о ветре становится меньше. Так, в нижнем слое воздуха до 120 м обеспеченность ими составляет в среднем 99%, до 160 м — не менее 90%, до 200 м — не менее 80%. На еще больших высотах обеспеченность данными быстро уменьшается и на уровне “потолка зондирования” 500 м составляет в среднем лишь 6% [Локощенко, 2014]. Анализ профилей ветра по содарным данным в приземном слое воздуха затруднен из-за наличия “мертвой зоны” эхо-сигнала в их нижней части. Наименьшей возможной ее величиной служит соотношение $(c \cdot \tau / 2)$, где c — скорость звука, τ — длительность импульса [Красненко, 2001]. Однако в реальности “мертвая зона” выше вследствие задержки переключения антенны в режим приема и реверберации мембраны громкоговорителя; в нашем случае она равна 40 м. Это означает, что самый нижний слой воздуха с доступными данными о ветре заключен в пределах от 30 до 50 м (результат осреднения в каждом 20-метровом слое соотносится с его серединой).



Рис. 1. Антенная система доплеровского содара MODOS (слева) и анемометрическая вышка с датчиками ветра (справа) в Метеорологической обсерватории МГУ. Стрелками показаны анемометры на двух высотах.

Помимо содара MODOS, скорость и направление ветра измеряются в МО МГУ двумя контактными датчиками: анеморумбометром М-63М на высоте 15 м, а также анемометром “Vantage Pro 2”, установленным над крышей поста ГПБУ “Мосэкомониторинг” на нестандартной для метеостанций высоте 6.9 м (рис. 1). Сам пост находится в 54 м, а вышка — в 57 м от антенной системы MODOS; расстояние по горизонтали между стойками обоих датчиков ~3 м. Прибор М-63М представляет собой четырехлопастную крыльчатку; измерения с его помощью традиционно производятся каждые 3 ч с осреднением 10 мин. Таким образом, период осреднения станционных и содарных данных о скорости ветра совпадает. Погрешность измерений М-63М не превышает $\pm(0.5 + 0.05 \cdot V)$ м/с [Справочник, 1971].

Анемометр “Vantage Pro 2” представляет собой классический четырехчашечный “крест Робинзона”, период автоматического осреднения данных составляет 20 мин. Как видно на рис. 1, он установлен вблизи станционной вышки, однако она ажурная, поэтому занижение V можно считать незначительным. Привлечение результатов контактных измерений обоими приборами позволяет дополнить профили V по данным содара значениями в пределах его “мертвой зоны”.

3. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ СКОРОСТИ ВЕТРА С ВЫСОТОЙ

На рис. 2 приведен сводный профиль V как в линейных, так и в полулогарифмических коор-

динатах в среднем за первые 8 лет зондирования содаром MODOS в МО МГУ (с ноября 2004 г. по декабрь 2012 г.). Он включает данные как содара, так и датчиков на высотах 7 и 15 м в пределах “мертвой зоны”. В рассмотренный период времени ряды данных всех трех приборов безусловно однородны. Размер выборки всех принятых к анализу отдельных содарных измерений V с шагом 20 м по высоте и 10 мин во времени составил 3372851.

Видно, что высота обращения в Москве как пересечение ночного и дневного профилей V составляет в среднем ~95 м. Ранее автором в ходе анализа среднегодового суточного хода V по тем же данным был сделан вывод о наличии переходного слоя на высотах 80–120 м, приблизительно соответствующего высоте обращения ветра [Локощенко, 2014]. Как видим, полученная оценка из сравнения средних профилей V за 0–3 и 12–15 ч хорошо согласуется с этим выводом. Соотношение ночного и дневного профилей (значение $\partial V/\partial z$ больше ночью) вполне ожидаемо с учетом преобладания устойчивой стратификации в середине ночи и неустойчивой в середине дня. В полулогарифмических координатах приблизительно линейный участок функции прослеживается до 40–60 м; выше наблюдаются уже явные отклонения от логарифмической зависимости. Т.о., значение ~60 м (по меньшей мере, 40 м) можно считать средней многолетней высотой приземного слоя атмосферы [Лайтман, 1961; Монин, Яглом, 1965; Матвеев, 1984], предполагая при этом бли-

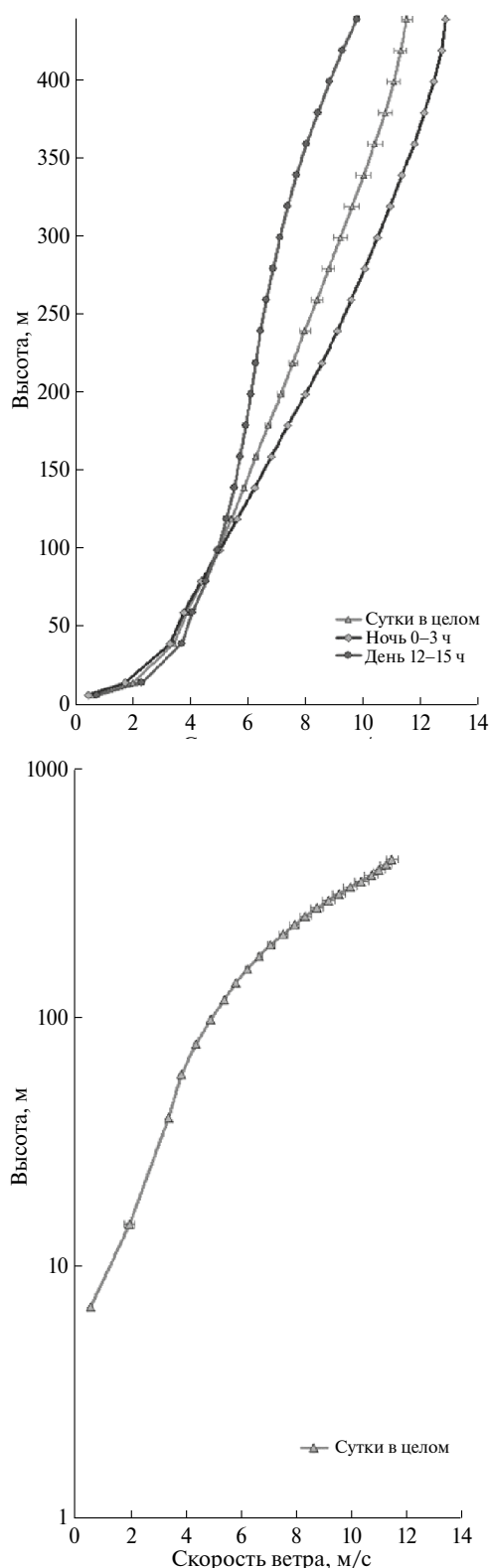


Рис. 2. Профиль скорости ветра в слое от 7 до 440 м по данным доплеровского содара MODOS и контактных измерений в среднем за 2004–2012 гг. в Метеорологической обсерватории МГУ.

Доверительные интервалы рассчитаны с доверительной вероятностью 0.95.

зость среднего многолетнего градиента температуры $\partial T/\partial z$ к адиабате. Разумеется, представленные данные получены в условиях реальной городской застройки, далекой от условий горизонтальной термической однородности.

Параметр шероховатости z_0 как результат экстраполяции нижнего квазилинейного участка функции в полулогарифмических координатах на рис. 2 вплоть до нулевого значения V составляет ~ 5 м (от 4.8 до 5.2 м в зависимости от использования при экстраполяции участка функции до 40 или до 60 м). Как известно, данный параметр характеризует слой воздуха, в пределах которого направленная скорость ветра в среднем отсутствует. Обычно он равен приблизительно $1/30$ [Хромов, Мамонтова, 1974] или от $1/5$ до $1/100$ долей [Лайтман, 1961] средней высоты неровностей поверхности. Как видим, полученная нами оценка согласуется по порядку значений с приведенными долями высот окружающих МО МГУ в радиусе 1 км соседних зданий, составляющих от 25 м (биолого-почвенный корпус, Институт физико-химической биологии и корпус нелинейной оптики) до 250 м (главное здание МГУ). С учетом частичной закрытости анемометра “Vantage Pro 2” величина z_0 может быть немного завышенной, однако она отражает условия реальной городской застройки при наличии естественных препятствий и неровностей, включающих окружающие здания, отдельные деревья и пр. Именно с точки зрения соответствия реальным условиям большого города полученная экспериментальная оценка представляет практический интерес. Заметим, что условия измерений в Метеорологической обсерватории МГУ с неплотной средней и высокой застройкой в ее окрестностях вполне типичны для большей части городской территории за исключением лишь глубоких городских каньонов, с одной стороны, и незастроенных пустырей и пойменных лугов в долине р. Москвы, с другой. Таким образом, можно предположить, что полученная оценка z_0 показательна для города в целом.

В естественных условиях открытой местности значение z_0 обычно менее 10 см [Лайтман, 1961; Матвеев, 1984], в лесах — от 1 до 6 м [Оке, 1982]. В крупных городах, по данным Г. Ландсберга, оно также на порядок больше, нежели над сельскохозяйственными угодьями, т.е. может достигать нескольких метров. Так, в Париже z_0 составляет от 2 до 5 м, в Киеве — 4.5 м, в Токио — 1.7 м

[Ландсберг, 1983]. Согласно оценкам Т. Оке, величина z_0 вблизи “средних” зданий высотой 20 м составляет 0.7 м, а вблизи высоких зданий высотой 100 м — 10 м [Оке, 1982]. Как видим, полученный нами результат для условий Москвы согласуется с известными в литературе оценками.

4. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА С ВЫСОТОЙ

Как известно, в приземном слое воздуха вследствие малости силы Кориолиса $F = -2 \cdot [\Omega \times V]$ (где Ω — угловая скорость вращения Земли, V — скорость рассматриваемой воздушной частицы) наблюдается приблизительно постоянство направления ветра с высотой. Это свойство приземного слоя также может быть использовано для экспериментальных оценок H , поскольку начало устойчивого поворота ветра в вышележащем слое Экмана означает вершину приземного слоя. По данным [Матвеев, 1984], изменения направления ветра в приземном слое обычно не превышают 2° – 5° . Они возможны с учетом влияния стратификации и связанной с ней атмосферной турбулентности, неоднородности подстилающей поверхности, а также различных течений воздуха локального или среднего масштаба. Однако подобные изменения, как правило, ненаправленные и при осреднении во времени по большим выборкам данных сходят на нет.

Было предположено, что период осреднения длиной в месяц достаточен для исключения влияния случайных факторов; этот период взят за основу анализа. Расчеты профилей направления ветра по данным содара MODOS проведены по данным 83 месяцев за 8 лет зондирования (с 2004 по 2013 г.). Предварительные результаты опубликованы в [Lokoshchenko, Nikitina, 2012].

С использованием логических формул был разработан численный алгоритм расчетов для исключения возможной цикличности, т.е. перехода значений направления за пределы $\pm(2 \cdot \pi)$. Не вдаваясь в подробности, отметим, что подобный переход с увеличением высоты бывает многократным, так что создание алгоритма оказалось непростой задачей. Именно в силу цикличности направления ветра в литературе мало примеров представления данных в виде профилей в координатах “направление — высота”.

Заметим, что в очень редких случаях возможны чрезвычайно резкие реальные повороты ветра с высотой, которые автоматический алгоритм может принять за проявление цикличности. Встречные потоки противоположного направления, одновременно существующие один поверх другого в нижнем 500-метровом слое, возможны при прохождении обостренного атмосферного фронта, наклоне проходящей оси гребня или ложбины, а также в условиях седловин [Локощенко и др., 2016]. Для выявления подобных случаев требуется дополнительный критический контроль данных.

Наиболее показательные примеры полученных профилей направления ветра приведены на рис. 3. Как видим, в ряде случаев в нижней их части прослеживается участок с почти одинаковым направлением с точностью до $\pm 1^\circ$, отмеченный жирными кружками. Как правило, такой участок охватывает лишь первый промежуток между двумя нижними уровнями измерений вплоть до 60 м (рис. 3б, в), хотя иногда достигает 80 м (рис. 3д). Один раз, в октябре 2006 г., он прослеживался даже вплоть до 100 м. Однако в большинстве случаев (приблизительно в двух

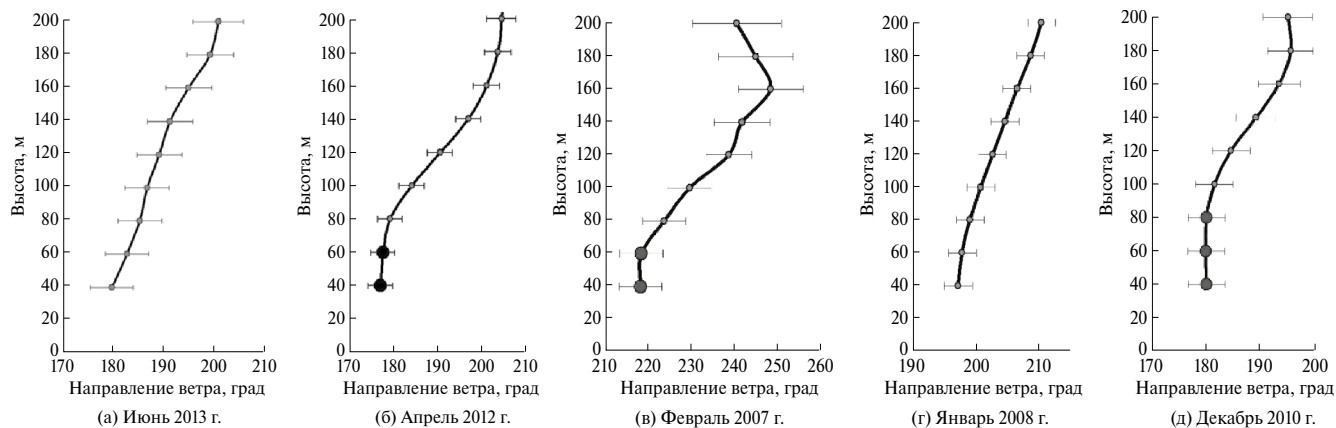


Рис. 3. Профили направления ветра по содарным данным в среднем за отдельные месяцы зондирования. Доверительные интервалы рассчитаны с уровнем значимости 5%.

Таблица 1. Высота приземного слоя воздуха H (м) в Москве по данным содара MODOS о направлении ветра в среднем за отдельные месяцы

Месяц/год:	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2004	нет данных										≤40	60
2005	60	нет данных										≤40
2006	60	≤40	≤40	≤40	≤40		≤40	≤40	≤40	100	нет данных	
2007		60	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40	60	≤40	60
2008	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40		≤40	≤40	≤40	60	60
2009	≤40	≤40	60	≤40	≤40	60	60	60	≤40	80	80	60
2010	≤40	≤40	60	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40	80	80
2012	60	60	60	60	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40	60	≤40	≤40
2013	60	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40	≤40	80	60

Таблица 2. Суточный ход высоты приземного слоя воздуха H (м) в Москве по данным содара MODOS о направлении ветра в разные сезоны

Часы:	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24
Июнь–август 2009 г.	≤40	≤40	60	80	80–100	80	80	≤40
Декабрь 2009 – февраль 2010 гг.	≤40	≤40	≤40	≤40	80	60	≤40	≤40

из трех) изменение направления в сторону роста его значений, то есть правый поворот, наблюдается уже в самом нижнем интервале высот от 40 до 60 м (рис. 3а, 3г). Полученные результаты можно интерпретировать в качестве данных о высоте приземного слоя H , поскольку участок с приблизительно постоянным направлением, если он был, всегда наблюдался в нижней части диапазона, а поворот в среднем за месяц всегда оказывался правым, в соответствии с классической “спиралью Экмана” – во всяком случае, в нижней части слоя Экмана. Исключением служит лишь средний левый поворот в слое выше 160 м на рис. 3в). Вероятно, он отражает особенности барического поля и направления термического ветра в феврале 2007 г. Заметим, что среднее за отдельные месяцы направление ветра заключено в пределах от южного до юго-западного в приземном слое и от южно-юго-западного до западно-юго-западного на высоте 200 м. Это подтверждает наличие главной юго-западной моды в многолетней розе ветров по данным содара MODOS во всем диапазоне зондирования [Локощенко, 2015]. Средняя величина правого поворота ветра в приведенных на рис. 3 примерах в слое воздуха до 200 м составляет от 15° до 20° , что также подтверждает среднюю многолетнюю оценку этой величины для условий Москвы: $\sim 20^\circ$ [Локощенко, 2015].

Можно считать, что при отсутствии на профилях участка с одинаковыми значениями на-

правления поверх “мертвой зоны” он, вероятно, существовал ниже в ее пределах и не мог быть выявлен по содарным данным ($H \leq 40$ м). Привлечь к анализу направления ветра данные анемометров на высотах 7 и 15 м, в отличие от профиля V , невозможно ввиду неизбежной невязки в ориентировании трех разных приборов по странам света. Ошибка в выставлении нулевого значения направления (на север) составляет по меньшей мере $\pm 1^\circ$. Это делает их показания несравнимыми, а выявление столь тонких эффектов (изменений в направлении ветра величиной менее 1°) невозможным. Вероятно, именно это обстоятельство (случайная ошибка в ориентировании разных приборов – например, анемометров на разных уровнях высотных мачт) не позволяло в прошлом провести подобный анализ. Лишь данные доплеровских содаров с одинаково заданным направлением оси луча вдоль всего диапазона каждой из антенн открывают возможность точного сравнения направления ветра на разных высотах.

Различия между приведенными профилями на рис. 3 вполне наглядны, однако для большей объективности анализа были использованы два количественных критерия изменений направления ветра – прежде всего, сама величина поворота:

$$\Delta\alpha = \alpha_{i+1} - \alpha_i, \tag{1}$$

где α_i и α_{i+1} – направление ветра на двух соседних уровнях, а также предложенный автором коэффициент изменения поворота ветра K с высотой:

$$K = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{\alpha_i - \alpha_{i-1}}, \quad (2)$$

характеризующий относительное изменение направления ветра в любом вышележащем слое по сравнению с соседним нижележащим. Предварительный визуальный анализ профилей уточнялся с учетом значений $\Delta\alpha$ и K . В случаях почти постоянного направления ветра (т.е. в пределах приземного слоя) $\Delta\alpha$ составляет в среднем 0.4° , тогда как величина K — в среднем от 1.0 до 1.5 (в большинстве случаев ≤ 2). Поверх же приземного слоя $\Delta\alpha$ обычно превышает 1° в каждом отдельном интервале высот с шагом 20 м, т.е. средний вертикальный градиент направления ветра d в слое Экмана $dd/dz > 0.05 [^\circ/\text{м}]$. На уровне вершины приземного слоя значение коэффициента K в большинстве случаев > 3 (в среднем 4.2). Таким образом, значительный разрыв в значениях как $\Delta\alpha$, так и K ниже и выше предполагаемой высоты H подтверждает объективную основу проведенного анализа.

Результаты его обобщены в табл. 1. Как видим, в 27 из 83 месяцев высота приземного слоя воздуха достигала 60 м, а порой 80 или даже 100 м. В остальных случаях она не превышала 40 м. Однозначных сезонных закономерностей не видно: случаи $H > 40$ м отмечены в разные месяцы года. Получить среднюю многолетнюю оценку H по критерию постоянства направления ветра трудно из-за неопределенности ее значений при $H \leq 40$ м. Если предположить, что во всех пятидесяти шести таких случаях $H = 20$ м или $H = 30$ м, то средняя по всей выборке величина H составляет соответственно 35 и 41 м. Считая же $H = 40$ м во все месяцы, когда ее значение было маскировано “мертвой зоной” содара, средняя $H = 48$ м. Последняя максимально возможная оценка, скорее всего, завышена. С другой стороны, исходя из физических соображений, среднемесячные значения $H < 20$ м маловероятны. Следовательно, средняя высота приземного слоя воздуха, видимо, близка к 40 м. Примечательно, что предварительные оценки H по данным 59 месяцев вплоть до 2010 г. оказались такими же [Lokoshchenko, Nikitina, 2012; Локощенко, 2015]. Следовательно, они обладают устойчивостью во времени. Получить более точные оценки H по критерию постоянства направления ветра можно с использованием малых содаров (т.н. “мини-содаров”), работающих на более высоких частотах и имеющих значительно меньшую “мертвую

зону” по сравнению с содарами обычного диапазона, к числу которых относится MODOS.

Очевидно, значение H закономерно увеличивается с ростом атмосферной неустойчивости и в среднем должно быть больше днем, нежели ночью, и летом больше, чем зимой. Рассмотрим суточный ход H в разные сезоны. Для этого был проведен отдельный расчет профилей направления ветра за отдельные часы в среднем за три летних и три зимних месяца 2009–2010 гг. Как видно из табл. 2, наибольшие значения H действительно отмечены в дневные часы (вплоть до 80–100 м летом и 60–80 м зимой), а наименьшие — поздним вечером и ночью летом и с вечера до полудня зимой. Данный вывод подтверждает влияние температурной стратификации на структуру пограничного слоя атмосферы.

5. ВЫВОДЫ

1. Средний многолетний профиль скорости ветра по содарным данным в Москве отмечен квазилинейным участком в полулогарифмических координатах вплоть до высоты 40–60 м. С учетом близости средних условий к безразличной стратификации эту оценку можно принять в качестве средней высоты приземного слоя воздуха.

2. Высота приземного слоя как слоя с приблизительно одинаковым направлением ветра в среднем за месяц в одном случае из трех превышает по содарным данным 40 м, составляя, как правило, 60 м, а порой 80–100 м; в остальные месяцы она ≤ 40 м. Таким образом, в соответствии с данным критерием, высота приземного слоя составляет в Москве в среднем менее 50 м (40 ± 8 м).

3. В суточном ходе летом наибольшая высота приземного слоя как слоя с постоянным направлением ветра наблюдается в середине дня (в среднем 80–100 м), а наименьшая — поздним вечером и ночью (не более 40 м). Зимой наибольшие значения в суточном ходе этой высоты составляют в среднем 60–80 м.

4. Параметр шероховатости в условиях городской периферии Москвы с неплотной жилой застройкой и высотой соседних зданий до 250 м равен ~ 5 м.

5. Высота обращения дневного и ночного профилей ветра в среднем за несколько лет составляет для условий Москвы приблизительно 100 м.

6. В верхней части приземного слоя на высотах от 40 до 60 или до 80 м разность направления ветра в слое толщиной 20 м составляет $\sim 0.4^\circ$

в среднем за месяц. В вышележащем слое Экмана средний вертикальный градиент направления ветра превышает $5^\circ/100$ м (правый поворот происходит обычно быстрее 1° на 20 м подъема).

Автор сердечно благодарит В. Г. Перепёлкина, А. П. Медведева, А. М. Мотылёва и Х.-Ю. Киртцеля за большую помощь в осуществлении многолетнего зондирования в МО МГУ, Н. Г. Никитину за помощь в обработке первых данных, А. П. Попикова за предоставление данных о ветре поста сети Мосэкомониторинг в МО МГУ. Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 23-27-00279.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белинский В. А. Динамическая метеорология. М.-Л.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1948. 703 с.
- Будыко М. И. Испарение в естественных условиях. Л.: Гидрометеиздат, 1948. 136 с.
- Зилитинкевич С. С. Динамика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 292 с.
- Красненко Н. П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: изд-во ИОМ СО РАН, 2001. 280 с.
- Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 254 с.
- Ландсберг Г. Е. Климат города. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 248 с.
- Локощенко М. А. О ветровом режиме нижней атмосферы над Москвой по данным многолетнего акустического зондирования // Метеорология и гидрология. 2014. № 4. С. 19–31.
- Локощенко М. А. Направление ветра в Москве // Метеорология и гидрология. 2015. № 10. С. 5–15.
- Локощенко М. А., Алексеева Л. И., Ахиярова К. И. О связи ветрового режима нижней атмосферы с синоптическими условиями и явлениями погоды // Метеорология и гидрология. 2016. № 7. С. 15–28.
- Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 751 с.
- Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Часть 1. М.: Наука, 1965. 640 с.
- Обухов А. М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 414 с.
- Оке Т. Р. Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 360 с.
- Орленко Л. Р. Анализ экспериментального материала по суточному ходу температуры воздуха. Труды ГГО, выпуск 53(15) под ред. Д. Л. Лайхтмана. С. 14–25. Л.: Гидрометеиздат, 1955.
- Справочник по гидрометеорологическим приборам и установкам. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 372 с.
- Степаненко С. Н., Волошин В. Г., Курышина В. Ю., Агайар Е. В. Определение высоты пограничного слоя атмосферы по наземным метеорологическим наблюдениям // ScienceRise. 2016. № 7/1 (24). С. 6–10.
- Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
- Lokoshchenko M. A. and Nikitina N. G. Profiles of wind direction and studying of the ground air layer height by use of the sodar sounding // Extended Abstracts of Presentations from the 16th ISARS, Boulder, Colorado, USA, 5–8 June 2012. 2012. P. 130–132.

About Height of the Surface Air Layer by Sodar Data

M. A. Lokoshchenko*

Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119992, Russia

*e-mail: loko@geogr.msu.su

Average empirical estimations of the surface air layer height in Moscow have been received by the data of long-term acoustic remote sensing of the atmosphere using MODOS Doppler sodar of METEK (Germany) production. Based on the assumption that the average conditions are close to neutral stratification, this height, as the top of the quasi-linear section of the average long-term wind velocity profile in semi-logarithmic coordinates, is 40–60 m. The wind rotation height, i.e. the height of intersection of day and night wind profiles is on average 95 meters per year. The roughness length in conditions of loose but high urban development in vicinity of Moscow State University in Moscow is 5 m.

According to the criterion of the constant wind direction in the surface air layer, its height appears in the average monthly wind direction profiles over the “dead zone” of the sodar (40 m) in approximately one case out of three and usually amounts to 60 m, less often 80 or 100 m. In the rest cases, it is apparently masked by “dead zone”. The average height of the surface layer according to this approach is probably a little less than 50 m, which is close to the estimate obtained from the logarithmic distribution of wind velocity with height in this layer. The daily course of the surface air layer height is noted by the largest values in the afternoon (80–100 m in summer under conditions of prevailing unstable stratification and 60–80 m in winter) and the smallest ones (less than 40 m) in the late evening and at night in summer and from evening to noon in winter.

Keywords: surface air layer height, empirical estimations, profiles of wind velocity and wind direction, logarithmical law, wind rotation height, Coriolis force, clockwise wind shear, Ekman layer, roughness length, sodar