

УДК 551.551

Зависимость скорости трения от скорости ветра в приземном слое атмосферы

В.А. Гладких, В.П. Мамышев, И.В. Невзорова, С.Л. Одинцов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 1.03.2021 г.

Рассматриваются эмпирические взаимосвязи скорости трения (динамической скорости) со скоростью горизонтального ветра для различных условий (по времени суток, по сезонам года, по типу стратификации, по месту и высоте измерений). Исходные экспериментальные данные для определения таких взаимосвязей получены ультразвуковыми метеостанциями, работающими в приземном слое атмосферы в различных пунктах наблюдения.

Ключевые слова: приземный слой, скорость ветра, скорость трения, турбулентность; surface air layer, wind velocity, friction velocity, turbulence.

Введение

Скорость трения u_* входит в вычислительные схемы, предназначенные для прогноза состояния атмосферы (см., например, [1–6] и список литературы в них). Для определения u_* необходимо знание смешанных моментов турбулентных составляющих компонентов вектора ветра. Однако такая информация (о турбулентности), как правило, отсутствует на начальной стадии прогноза, и для ее получения необходимо использовать некоторые «внешние» параметры, например вероятную горизонтальную скорость ветра V_h . В настоящей работе рассматриваются эмпирические взаимосвязи $u_*(V_h)$ для различных условий (по времени суток, по сезонам года, по типу стратификации). Экспериментальные данные для анализа таких взаимосвязей получены ультразвуковыми метеостанциями (УЗМ) «Метео-2» [7], работающими в приземном слое атмосферы в двух пунктах наблюдения: 1) «ИОА», окраина г. Томска (Академгородок), урбанизированная территория, крыша лабораторного корпуса ИОА СО РАН, 5 м от уровня крыши, 17 м от уровня подстилающей поверхности; 2) Базовый экспериментальный комплекс («БЭК») ИОА СО РАН, естественный ландшафт, большая поляна, окруженная лесом, высота измерений 5 и 10 м. Периодичность измерений – 10 раз в секунду (10 Гц). Анализируется экспериментальный материал, полученный в 2019 г. В измерениях были перерывы по техническим причинам. Представленные далее оценки величин рассчитаны по интервалам времени 10 мин.

* Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Владимир Петрович Мамышев (mvp78@iao.ru); Ирина Витальевна Невзорова (nevzorova@iao.ru); Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru).

Достаточно часто скорость трения определяется по формуле (см., например, [8–14]):

$$u_* = \sqrt[4]{(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2}, \quad (1)$$

хотя ее «классическое» определение имеет вид [15–17]:

$$u_* = \sqrt{-\overline{u'w'}}. \quad (2)$$

В (1, 2) u' , v' , w' – пульсационные составляющие продольной, поперечной и вертикальной скоростей соответственно. Черта сверху – усреднение по интервалу времени. Применяемая в работе процедура выделения пульсационных составляющих компонентов вектора ветра описана в [18].

Далее используются расчеты u_* по формуле (1). Сделаем еще одно замечание, связанное с «классическим» заданием скорости трения: эта величина должна определяться в непосредственной близости от подстилающей поверхности, соответствуя высоте (параметру) шероховатости z_0 , равной (ориентировочно) 5–15 см в пункте наблюдения «БЭК» и 0,5–1 м в пункте «ИОА» (по градиции [19] с учетом сезона года). Для оценок u_* на высотах $z > z_0$ часто применяется термин «локальные значения» [5]. Далее мы анализируем именно «локальные значения» u_* . Детальное изучение зависимости u_* от высоты измерений составляет отдельную задачу и в настоящей работе не проводится.

Основная цель исследования – рассмотрение возможности «грубой» оценки скорости трения в приземном слое атмосферы на основании известных (или прогнозируемых) данных о скорости горизонтального ветра в пункте наблюдения. Это может быть полезным, например, в тех случаях, когда в распоряжении исследователей имеется информация только о средней скорости ветра в этом пункте.

Дополнительно ставилась задача в общих чертах рассмотреть влияние на скорость трения таких «внешних» параметров, как сезон года и время суток, направление ветра и вертикальные турбулентные потоки тепла.

Результаты

Для общего представления о диапазоне изменения u_* и V_h в течение периода измерений (2019 г.) приведем рис. 1, построенный для пункта «БЭК» на высоте 10 м («БЭК_10 м»), где показаны взаимосвязь $u_*(V_h)$ для всего периода и ее линейная

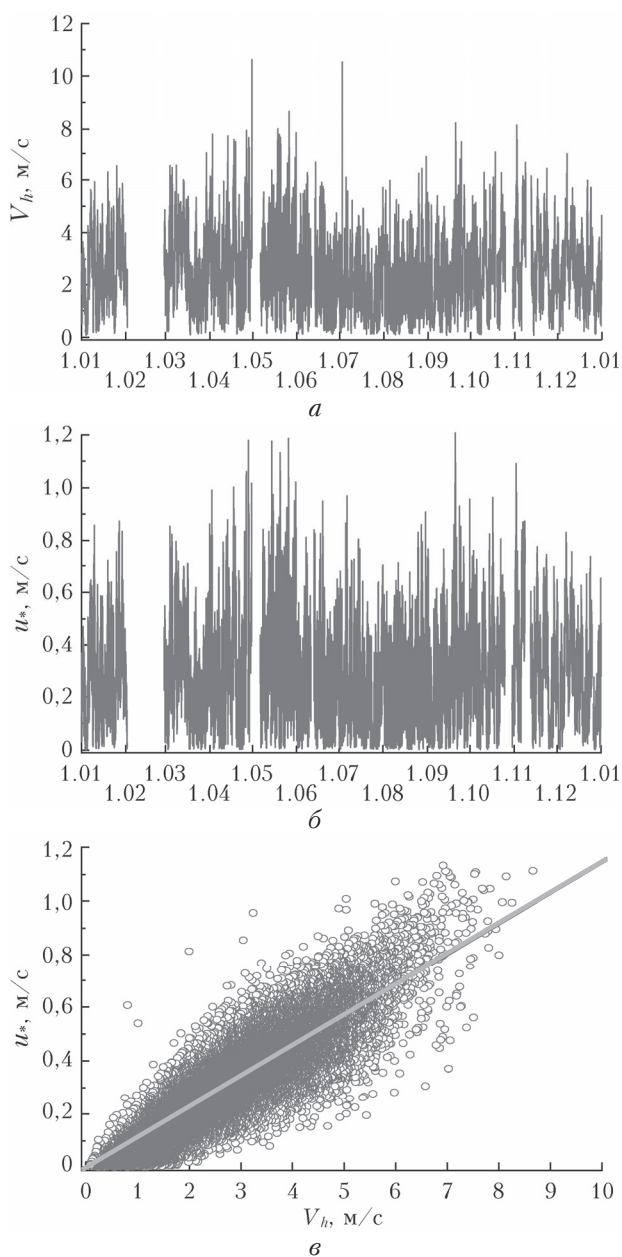


Рис. 1. Результаты измерений: скорости ветра (а); скорости трения (б) в пункте «БЭК_10 м» в течение 2019 г.; зависимости скорости трения от скорости ветра (в) за весь период измерений (прямая — линейная аппроксимация этой зависимости)

аппроксимация с коэффициентом детерминации (качеством аппроксимации) [20] $k_d \approx 0,94$. Значение k_d изменяется от 0 (плохое качество) до 1 (отличное качество).

Основная задача настоящей работы — изучение характеристик (наклонов) аппроксимирующих линий взаимосвязи

$$u_*(V_h) \approx \gamma \cdot V_h, \quad (3)$$

т.е. анализ зависимостей безразмерных коэффициентов γ от различных условий. При этом предполагалось, что на любой высоте скорость трения равна нулю, если $V_h = 0$. Пример аппроксимации зависимости $u_*(V_h)$ по формуле (3) для пункта «БЭК_10 м» (совокупно по 2019 г.) приведен на рис. 1, в (прямая). Для этого случая $\gamma = \gamma_{B10} \approx 0,115$; для «БЭК_5 м» $\gamma = \gamma_{B05} \approx 0,100$; для «ИОА» $\gamma = \gamma_A \approx 0,133$ (эти выводы оставим без иллюстраций). Подобный анализ, но с добавлением свободного члена в правой части (3), проводился, например, в [13, 14]. В частности, в [13] приведены оценки, соответствующие параметру γ для высот 5 и 10 м в диапазоне $\sim 0,05-0,1$ (измерения в октябре 1999 г. во время эксперимента CASES-99).

Приведем далее результаты для некоторых частных случаев. Сначала рассмотрим оценки γ в различные сезоны 2019 г.: зимой (январь, февраль, ноябрь, декабрь), весной (март—май), летом (июнь—август) и осенью (сентябрь—октябрь). Полученные после такого разделения величины γ собраны в таблице. Время суток дополнительно разделено на темное и светлое. Предполагалось, что для всех сезонов

Значения коэффициентов γ , k_d и длительность выборки T (в часах), по которой сделана оценка

Пункт	Время	Параметр	Зима	Весна	Лето	Осень
БЭК_5 м	00:00–24:00	γ	0,097	0,100	0,104	0,103
		k_d	0,95	0,94	0,90	0,94
		T	2616	2042	2072	595
	10:00–17:00	γ	0,0958	0,101	0,103	0,103
		k_d	0,95	0,94	0,91	0,95
		T	758	595	607	374
22:00–05:00	γ	0,099	0,098	0,106	0,103	
	k_d	0,96	0,93	0,88	0,93	
	T	770	594	603	391	
БЭК_10 м	00:00–24:00	γ	0,112	0,114	0,116	0,118
		k_d	0,95	0,95	0,91	0,94
		T	2071	1909	2035	1190
	10:00–17:00	γ	0,112	0,117	0,121	0,121
		k_d	0,96	0,96	0,92	0,95
		T	603	554	594	339
22:00–05:00	γ	0,113	0,108	0,100	0,114	
	k_d	0,96	0,93	0,86	0,93	
	T	611	561	596	359	
ИОА	00:00–24:00	γ	0,129	0,129	0,141	0,139
		k_d	0,93	0,91	0,93	0,93
		T	2674	1953	2129	1342
	10:00–17:00	γ	0,128	0,128	0,144	0,138
		k_d	0,93	0,91	0,93	0,93
		T	783	573	620	383
22:00–05:00	γ	0,132	0,13	0,13	0,138	
	k_d	0,93	0,92	0,93	0,93	
	T	780	570	626	400	

светлое время суток 10:00–17:00, а темное – 22:00–05:00 по местному времени.

Согласно приведенным в таблице результатам качество линейной аппроксимации зависимости $u_*(V_h)$ в целом можно считать удовлетворительным, за исключением измерений в летнее ночное время в пункте «БЭК», когда $k_d < 0,9$. Статистическую обеспеченность оценок (суммарную длительность выборок T , по которым получена статистика) также можно считать удовлетворительной.

Для большей наглядности на рис. 2 построены зависимости коэффициентов γ_A , γ_{B05} , γ_{B10} от сезона

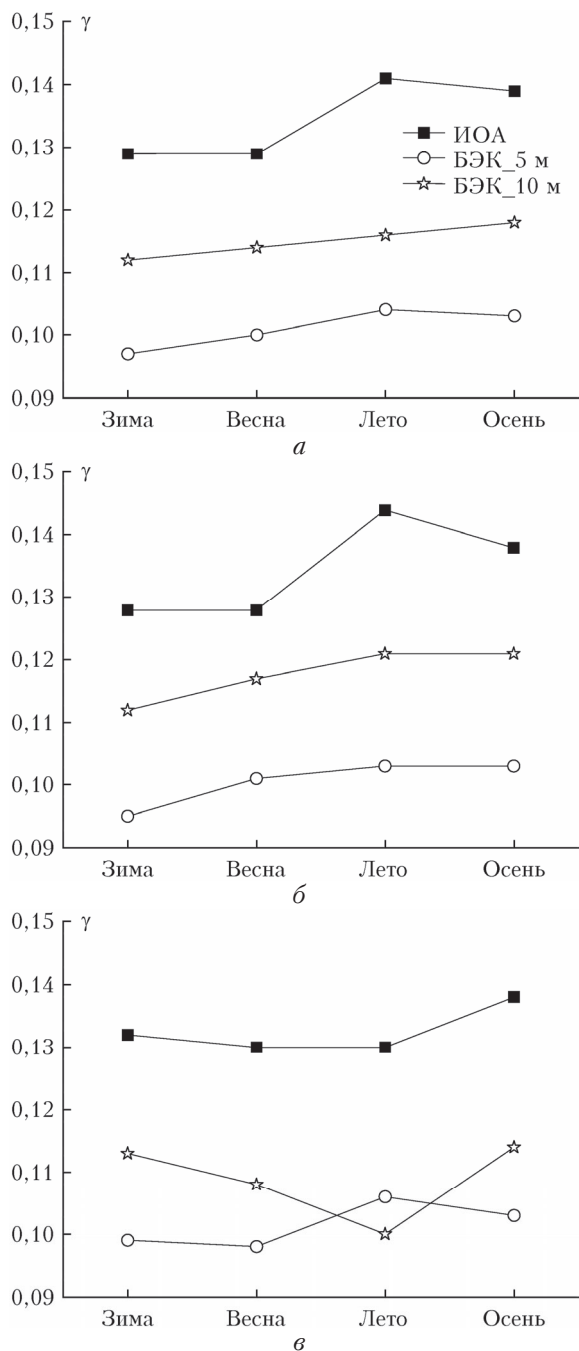


Рис. 2. Зависимость коэффициента аппроксимации от сезона по суточным (00:00–24:00) (а), дневным (10:00–17:00) (б) и ночным (22:00–05:00) (в) измерениям 2019 г.

и времени суток по результатам из таблицы. Согласно рис. 2 увеличение скорости трения с ростом скорости ветра наиболее активно происходит в пункте «ИОА» ($\gamma_A > \gamma_{B05}, \gamma_{B10}$), причем во все сезоны и в любое время суток. В свою очередь, в пункте «БЭК_10 м» скорость трения с усилением скорости ветра увеличивается быстрее, чем в «БЭК_5 м», за исключением ночного периода в летнее время. Отметим также, что летом и осенью «скорость нарастания» u_* при увеличении V_h выше, чем зимой и весной. Это в первую очередь относится к дневному времени и к оценкам γ в целом за сутки.

Представленный выше материал связан только с общими оценками характеристик линейной аппроксимации функции $u_*(V_h)$ в формуле (3) и их зависимости от места измерения, сезона года и времени суток. Для более детального изучения зависимости скорости трения от ветра в приземном слое атмосферы следует ввести в рассмотрение и другие его характеристики помимо модуля V_h , например направление ветра φ . Естественно, что в этом случае получить адекватную параметризацию функции $u_*(V_h)$ значительно сложнее, хотя это может заметно улучшить оценку (прогноз) величины u_* на основе известных (прогнозируемых) данных скорости и направления ветра. Подобный подход был ранее использован нами при параметризации взаимосвязи кинетической энергии турбулентности со скоростью ветра [21] и показал свою эффективность.

В настоящей работе мы не стремились получить возможные параметризации функции $u_*(V_h, \varphi)$, а только оценили ее «общие закономерности» совокупно за весь 2019 г. для пунктов наблюдения «ИОА» и «БЭК_10 м» (рис. 3, цветная вкладка).

Очевидно, что в обоих пунктах наблюдения есть определенные закономерности во взаимосвязи $u_* \leftrightarrow \varphi$, которые, в принципе, могут быть параметризованы. Однако на данном этапе анализ этих зависимостей не проводился.

Влияние типа стратификации в приземном слое на взаимосвязь $u_*(V_h)$ можно оценить по рис. 2, поскольку на нем приведены значения γ для ночных (преимущественно устойчивая стратификация) и дневных (преимущественно неустойчивая или безразличная стратификация) условий. Очевидно некоторое различие в «скорости нарастания» величины u_* с ростом скорости ветра V_h в выделенных случаях.

Более подробную картину взаимосвязи $u_*(V_h, Q_z)$, где Q_z – вертикальный турбулентный поток тепла ($Вт/м^2$) в пункте «БЭК_10 м», демонстрирует рис. 4 (цв. вкладка). При отрицательных значениях Q_z имеет место устойчивая стратификация, при положительных – неустойчивая (или близкая к безразличной). Особого влияния величины Q_z на u_* этот пример не демонстрирует. Особенности графика вблизи его «границ» при слабом ветре могут быть связаны с недостаточной статистической обеспеченностью оценок в данных условиях. В этой связи можно сделать вывод об отсутствии явной необходимости в учете Q_z при простейшей параметризации взаимосвязи $u_*(V_h)$.

Заключение

Сформулируем основные выводы по проделанной работе. Напомним, что основной целью анализа была проверка возможности «грубой» оценки «локальной» скорости трения (динамической скорости) в приземном слое атмосферы на основе измеренного (или прогнозируемого) модуля скорости горизонтального ветра. Для такой оценки использовалась линейная связь между этими величинами. В результате рассчитаны и проанализированы «градиенты приращения» скорости трения в различные сезоны года и различное время суток на территории с естественным ландшафтом на уровнях 5 и 10 м, а также на урбанизированной территории на высоте 17 м от уровня подстилающей поверхности. Качество аппроксимации исследуемой зависимости линейной функцией можно считать удовлетворительным практически во всех рассмотренных случаях. Полученные оценки «градиентов приращения» по порядку величин совпадают с результатами работы других авторов.

Коротко рассмотрено влияние и необходимость учета направления ветра и приземных вертикальных турбулентных потоков тепла при оценках скорости трения как функции от скорости ветра. В результате установлено, что направление ветра желательно принимать во внимание, а влияние турбулентного потока тепла в приземном слое при таком подходе можно не учитывать.

Естественно, что полученные результаты соответствуют только конкретным пунктам наблюдения. Однако можно ожидать, что общий подход к возможности «грубого» оценивания скорости трения по средней скорости ветра будет применим и для других пунктов наблюдения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН. Экспериментальный материал получен с использованием оборудования ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН.

1. Dai Y., Basu S., Maronga B., de Roode S.R. Addressing the grid-size sensitivity issue in large-eddy simulations of stable boundary layers // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2021. V. 178, iss. 1. P. 63–89.
2. Barbano F., Brattich E., Di Sabatino S. Characteristic scales for turbulent exchange process in a real urban canopy // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2021. V. 178, iss. 1. P. 119–142.
3. Tian G., Conan B., Calmet I. Turbulence-kinetic-energy budget in urban-like boundary layer using large-eddy simulation // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2021. V. 178, iss. 2. P. 201–223.
4. Курбацкая Л.И., Курбацкий А.Ф. О вычислении турбулентной скорости трения в численной модели городского острова тепла в устойчиво стратифицированной атмосфере // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 6. С. 512–515. DOI: 10.15372/АОО20160611; Kurbatkaya L.I., Kurbatkii A.F. Calculation of the turbulent friction velocity in a mathematical model of an urban heat island in a stably stratified environment // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 5. P. 561–564.
5. Курбацкий А.Ф. Введение в моделирование турбулентного переноса импульса и скаляра. Новосибирск: ГЕО, 2007. 331 с.
6. Панасенко Е.А., Старченко А.В. Определение городских районов-загрязнителей атмосферного воздуха по данным наблюдений. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 3. С. 279–283; Panasenko E.A., Starchenko A.V. Determination of urban district atmospheric air pollution in accordance with observational data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 2. P. 186–191.
7. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // *Приборы.* 2009. № 7. С. 21–25.
8. Castellvi F., Suvočarev K., Reba M.L., Runkle B.R.K. Friction-velocity estimates using the trace of a scalar and the mean wind speed // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2020. V. 176, iss. 1. P. 105–123.
9. Mukherjee S., Lohani P., Kumar K., Chowdhuri S., Prabhakaran T., Karipot A.K. Assessment of new alternative scaling properties of the convective boundary layer: Application to velocity and temperature spectra // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2020. V. 176, iss. 2. P. 271–289.
10. Maronga B., Knigge C., Raasch S. An improved surface boundary condition for large-eddy simulations based on Monin–Obukhov similarity theory: Evaluation and consequences for grid convergence in neutral and stable conditions // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2020. V. 174, iss. 2. P. 297–325.
11. Martins L.G.N., Degrazia G.A., Acevedo O.C., Puhales F.S., De Oliveira P.E.S., Teichrieb C.A., Da Silva S.M. Quasi-experimental determination of turbulent dispersion parameters for different stability conditions from a tall micrometeorological tower // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2018. V. 57, iss. 8. P. 1729–1745.
12. Berg L.K., Newsom K.R., Turner D.D. Year-long vertical velocity statistics derived from Doppler lidar data for the continental convective boundary layer // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2017. V. 56, iss. 9. P. 2441–2454.
13. Sun J., Lenschow D.H., LeMone M.A., Mahrt L. The role of large-coherent-eddy transport in the atmospheric surface layer based on CASES-99 observations // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2016. V. 160, N 1. P. 83–111.
14. Sun J., Takle E.S., Acevedo O.C. Understanding physical processes represented by the Monin–Obukhov bulk formula for momentum transfer // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2020. V. 177, N 1. P. 69–95.
15. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 1. Теория турбулентности. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 695 с.
16. Атмосферная турбулентность и моделирование пространства примесей / под ред. Ф.Т.М. Ньистадта, Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 353 с.
17. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Т. 2. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 320 с.
18. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Статистика внешних масштабов турбулентности в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2019. Т. 32, № 3. С. 212–220. DOI: 10.15372/АОО20190307; Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L. Statistics of outer turbulence scales in the surface air layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 4. P. 450–458.
19. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 779 с.
20. Колемаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1991. 400 с.

21. Мамышева А.А., Одинцов С.Л. Анализ зависимости нормированной кинетической энергии турбулентности от направления ветра и типа стратификации в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 4.

C. 374–381; Mamysheva A.A., Odintsov S.L. Analysis of the dependence of the normalized turbulent kinetic energy on the wind direction and type of stratification in the near-ground atmospheric layer over urbanized territory // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 5. P. 377–386.

V.A. Gladkikh, V.P. Mamyshev, I.V. Nevzorova, S.L. Odintsov. **Dependence of the friction velocity on the wind velocity in the surface air layer.**

The friction velocity (dynamic velocity) u_* enters into nearly all computational schemes used for forecasting the state of the atmosphere. To find this velocity, it is necessary to know the mixed moments of turbulent components of the wind vector. However, the information about turbulence is lacking at the initial stage of forecast. That is why model equations are usually used for u_* . These equations are based on the relation of the friction velocity to the horizontal wind velocity V_h . In this work, we consider the empirical relations $u_*(V_h)$ for various conditions (different time of the day, seasons, types of stratification, observation sites, and measurement altitudes). Initial experimental data used to derive these relations were obtained by ultrasonic meteorological stations operating in the surface air layer at different observation sites.

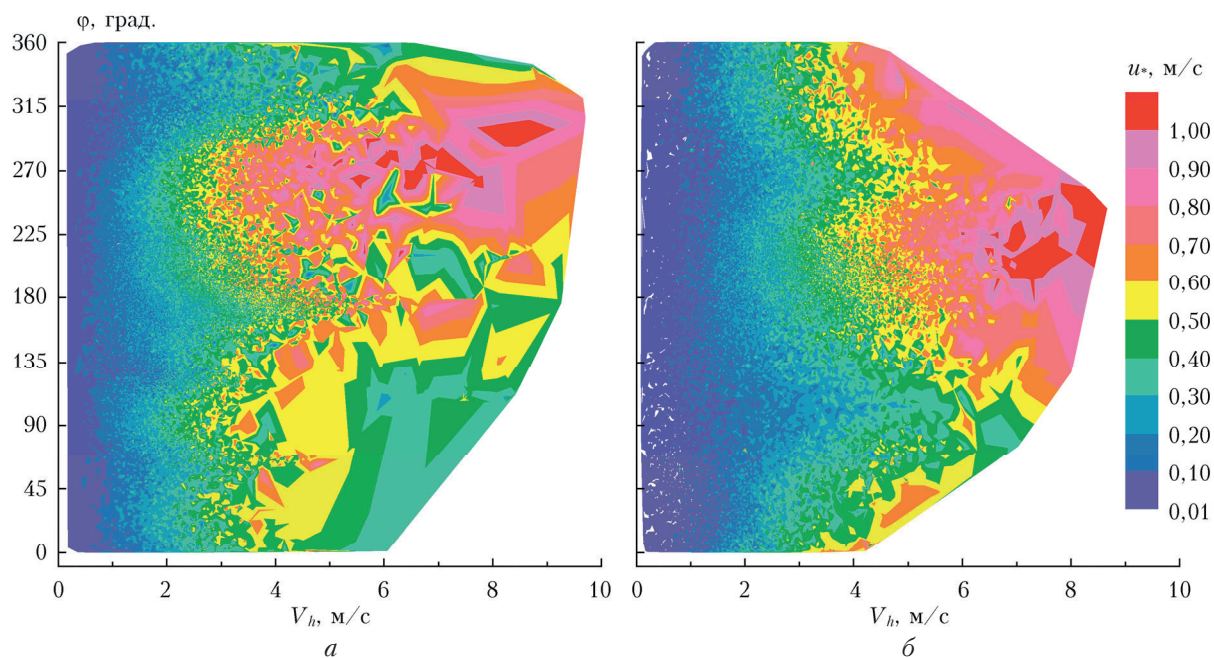


Рис. 3. Взаимосвязь скорости трения со скоростью и направлением ветра в пунктах «ИОА» (а) и «БЭК_10 м» (б) (φ – азимут, откуда дует ветер)

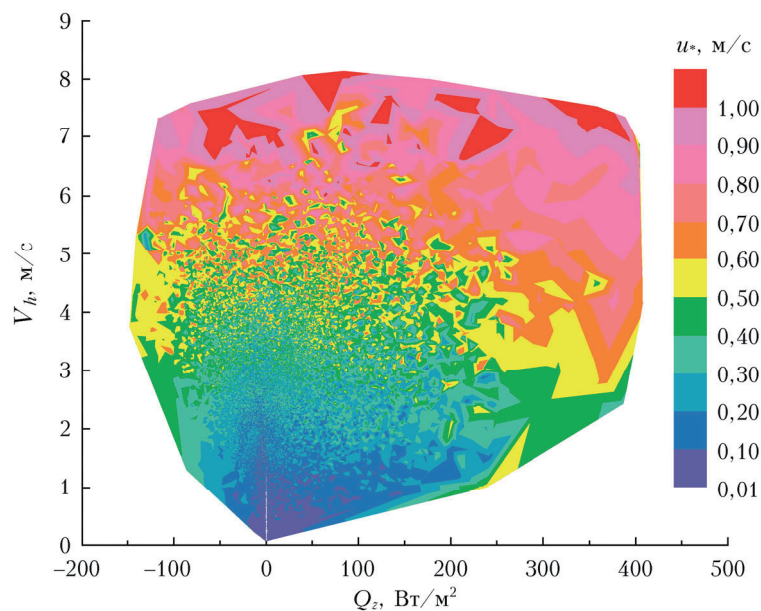


Рис. 4. Взаимосвязь скорости трения со скоростью ветра и вертикальным турбулентным потоком тепла в пункте «БЭК_10 м»