

Повторяемость слабых и сильных ветров в пограничном слое атмосферы на территории Российской Федерации, оцененная по данным многолетних аэрологических наблюдений

A.B. Хохлова

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации –
Мировой центр данных,
Россия, 249035, Обнинск, Королева, 6

Адрес для переписки: *anna_x@meteo.ru*

Реферат. Знание ветрового режима в нижнем слое атмосферы необходимо как для исследования климата и его изменчивости, так и для прикладных задач, в первую очередь, для задачи о распространения примеси. Климатические характеристики ветрового режима в пограничном слое, имеющиеся в ряде источников, получены по аэрологическим данным за 50-60-е годы прошлого века. Поэтому актуально получение их по более современным данным.

Характеристики ветрового режима, приведенные в статье, определены на основе аэрологических массивов Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД). Использованы данные более 100 российских аэрологических станций и станций с примыкающими территориями за период 1979-2022 гг. Для каждой станции на четырех уровнях высоты (поверхность земли, 100 м, 500 м и 1000 м) рассчитаны следующие величины: средние скорости ветра, повторяемость штилевых условий, повторяемость слабых и сильных ветров для четырех сезонов (зима, весна, лето, осень), а также построены временные ряды этих характеристик, осредненных по каждому последовательному году за весь исследуемый период. Представлены карты средних скоростей, повторяемостей штилевых условий, слабых и сильных ветров. Проанализированы особенности географических и сезонных распределений, а также характер зависимости характеристик от высоты. Показаны особенности ветрового режима на побережье океанов и в материковой зоне. Географическое распределение средней приземной скорости ветра в целом совпадает с распределением, приведенным в различных источниках. По временным рядам среднегодовых характеристик сделаны оценки их изменчивости. В силу значительной неоднородности временных рядов затруднительно сделать статистически обеспеченные оценки, поэтому численные значения коэффициентов линейных трендов в статье не приводятся. Рассмотрены только три градации – положительный тренд, отрицательный и близкий к нулю. Согласно полученным результатам можно сделать предположение об уменьшении скорости ветра в пограничном слое за последние 40 лет. Это проявляется прежде всего в увеличении повторяемости слабых ветров на большей части станций, а также в уменьшении средней скорости ветра и

повторяемости сильных ветров. С высотой эти особенности постепенно уменьшаются и на уровне 1000 м тенденции изменчивости практически не заметны. Это самая общая картина. На отдельных станциях временная изменчивость может иметь другие особенности.

Ключевые слова. Атмосфера, климат, пограничный слой, Россия, ветровой режим, изменчивость, аэрологические наблюдения.

The frequency of weak and strong winds in the atmospheric boundary layer on the territory of the Russian Federation assessed from data of long-term aerological observation

A. V. Khokhlova

Federal State Budgetary Establishment "Russian Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI-WDC)",
6, Korolyov street, 249035, Obninsk, Russian Federation

Corresponding author: anna_x@meteo.ru

Abstract. Knowledge of the wind regime in the lower layer of the atmosphere is necessary both for the study of climate and its variability, and for applied problems, primarily for the problem of impurity propagation. Climatic characteristics of the wind regime in the boundary layer, available in a number of sources, were obtained from aerological data for the 50-60s of the last century. Therefore, it is important to obtain them according to more modern data.

The characteristics of the wind regime given in the article are determined on the basis of the aerological datasets of the Russian Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI-WDC). The data of more than 100 Russian aerological stations and stations from adjacent territories for the period 1979-2022 were used. For each station at four altitude levels (ground surface, 100 m, 500 m and 1000 m), the following values are calculated: average wind speeds, frequency of calm conditions, frequency of weak and strong winds for four seasons (winter, spring, summer, autumn), and time series of these characteristics averaged by for each consecutive year for the entire study period. Maps of average speeds, frequencies of calm conditions, weak and strong winds are presented. The features of geographical and seasonal distributions are analyzed, as well as the nature of the dependence of characteristics on height. The features of the wind regime on the ocean coast and in the mainland zone are shown. The geographical distribution of the average surface wind speed generally coincides with the distribution given in various sources. Estimates of their variability are made based on time series of average annual characteristics. Due to the significant heterogeneity of time series, it is difficult to make statistically reliable estimates, therefore numerical values of linear trend coefficients are not given in the article. Only three gradations are considered – positive trend, negative trend and close to zero. According to the results obtained, it is possible to make an assumption about the decrease in wind speed in the boundary layer over the past 40 years. This is manifested primarily in

an increase in the frequency of weak winds at most stations, as well as in a decrease in the average wind speed and the frequency of strong winds. With altitude, these features gradually decrease and at the level of 1000 m, the trends of variability are practically not noticeable. This is the most general picture. At individual stations, the time variability may have other features.

Keywords. Atmosphere, climate, boundary layer, Russia, wind regime, variability, upper-atmosphere observations.

Введение

Ветер является важной климатической компонентой, поскольку ветром обусловлен перенос тепла, влаги, аэрозоля и различных примесей. Климатические характеристики скорости ветра в пограничном слое необходимы для различных задач, как исследовательских, так и прикладных. Примеры исследований ветрового режима нижнего слоя атмосферы и его изменчивости для отдельных регионов можно найти в работах (Алдухов, Черных, 2018; Дивинский и др., 2020; Москаленко и др., 2016; Lei et al., 2023) и других. Для определения скорости ветра в нижнем слое атмосферы разработан ряд методов (Федосов, 2006; Boro et al., 2019), в которых получены эмпирические законы изменения скорости ветра с высотой. Поскольку высотные измерения имеются далеко не везде, где нужно знание ветра в нижнем слое, то ряд исследований посвящен вопросу оценки скорости ветра на высотах по приземным измерениям (Бызова и др., 1987; Хохлова, 2019).

Одна из основных прикладных задач, для которых нужно знание характеристик скорости ветра, это распространение примеси (Алдухов, Брюхань, 2013; Свод правил..., 2012; Atmospheric Dispersion..., 1980). В состав предпроектной изыскательской документации входят различные характеристики ветрового режима, в том числе, средние скорости в пограничном слое, повторяемость штилей и слабых ветров, распределение по направлениям на нескольких высотах в пределах пограничного слоя. Средние скорости ветра и характеристики слабых ветров по данным наблюдений входят в справочное издание о климатических условиях рассеяния примеси (Климатические характеристики..., 1983). Приведенные там сведения получены по данным примерно 130 аэрологических станций за десятилетний период 1959–1968 гг. Последний аэроклиматический справочник (Новый аэроклиматический справочник, 1987) выполнен на основе данных за 1961–1970 гг. Представляет интерес оценка ветрового режима в пограничном слое по более современным данным.

Ветровой режим характеризуется большим количеством параметров, в том числе, средней и результирующей скоростью, распределением по направлениям, повторяемостью скорости ветра в разных диапазонах, и другими. В настоящей работе представлены средние скорости ветра и повторяемости штилей, сильных и слабых ветров в нижнем слое атмосферы, определенные по многолетним радиозондовым данным на территории Российской Федерации и ближайших окрестностей. Сделана также попытка оценить временную изменчивость этих характеристик.

Данные и метод

Значения средних скоростей ветра и повторяемости различных ветровых условий получены на основе аэрологических массивов, создаваемых в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (Казначеева, Руденкова, 1983; Руденкова, 2010). В нескольких массивах аэрологического банка хранятся данные, получаемые из глобальной аэрологической сети. В электронном виде имеются данные с июня 1978 г по российским станциям и станциям бывшего СССР и с 1984 по зарубежным станциям. Для расчетов отобраны более 100 действующих российских станций и несколько станций бывшего СССР и прилегающих территорий. За небольшим исключением наблюдения охватывают период 1978-2022 г. Основным требованием при выборе станций было минимальное количество пропусков в наблюдениях. В среднем при двухразовом зондировании и при отсутствии длительных пропусков общее количество зондирований составляет не менее 20000 для каждой станции.

Климатические характеристики скорости ветра получены для нескольких уровней высоты от приземного уровня до высоты 1000 м за весь период наблюдений, по сезонам за весь период наблюдений, и для каждого календарного года за период 1979-2022 гг. Под сезоном имеются в виду календарные времена года: зима – месяцы с декабря по февраль, весна – с марта по май, лето – с июня по август и осень – с сентября по ноябрь. В статье рассмотрены характеристики скорости ветра на приземном уровне, далее обозначаемом 10 м, и на высотах 100, 500 и 1000 м от уровня земли для летнего и зимнего сезонов. Последовательность обработки данных следующая.

- Для каждого зондирования выполняется вертикальная интерполяция скорости ветра на заданные высоты до 1000 м от уровня земли. Расчет скорости ветра на заданных высотах производится путем линейной интерполяции.

- Производится определение категории скорости ветра V по следующим условиям: штилевые условия $V \leq 1 \text{ м с}^{-1}$, слабый ветер $V \leq 2.0 \text{ м с}^{-1}$, сильный ветер $V \geq 10 \text{ м с}^{-1}$.

- Далее стандартным путем выполняется расчет средних значений и повторяемостей. Повторяемости определены как процент случаев выполнения заданного условия по отношению к общему количеству зондирований за рассматриваемый временной отрезок (весь период или сезон), при этом в расчетах участвуют только те случаи, в которых имеются данные на всех высотах.

Помимо средних характеристик ветрового режима представляет также интерес вопрос о его временной изменчивости – имеются ли какие-либо их систематические изменения. Для оценки изменчивости по времененным рядам средних за год характеристик ветра получены коэффициенты линейных трендов, рассчитанные с помощью метода наименьших квадратов.

Результаты

Географические распределения скорости ветра и повторяемостей представлены для каждой станции отдельно. Это связано с тем, что освещение

данными отличается неравномерностью, а в некоторых регионах оно просто скучное. Кроме того, поскольку речь идет о нижнем слое атмосферы, в котором существенную роль играют местные условия, в первую очередь, ландшафтные, представляется нецелесообразным интерполировать скорость ветра в областях, бедных освещением, по данным отдаленных станций и строить поле изолиний. Иллюстрации приведены в основном для высот 100 и 1000 м.

Средняя скорость ветра

Средняя скорость ветра на двух уровнях высоты 100 и 1000 м для зимнего и летнего сезонов представлена на рис. 1. Особенности географического распределения и изменения скорости по сезонам и с высотой различны для материковой зоны и побережья океанов. Средние значения скоростей ветра в зимний сезон у поверхности земли на побережье Северного Ледовитого океана составляют 6-7 м s^{-1} , в материковой зоне европейской части не превышают 4 м s^{-1} и, соответственно, 5-6 м s^{-1} и 3-4 м s^{-1} в летний сезон. Наименьшие средние скорости ветра 1-2 м s^{-1} отмечаются в Центральной и Восточной Сибири, то есть, в районе азиатского антициклона. С высотой скорость ветра увеличивается, но также различным образом: на побережье возрастание скорости ветра с высотой выражено слабее. На высоте 100 м скорости ветра в зимний сезон в среднем составляют 7-8 м s^{-1} в прибрежных регионах, 4-6 м s^{-1} в европейском регионе, и 3-4 м s^{-1} в сибирском регионе. На высотах 500 и 1000 м имеется примерно такое же распределение, но значения скорости значительно больше. В зимнее время практически на всей территории и на всех высотах скорости ветра больше, чем в летнее. Исключение составляет регион Центральной и Восточной Сибири, где летняя скорость ветра превышает зимнюю. Сезонные различия увеличиваются с высотой: летняя скорость составляет в среднем 80-90% от зимней у поверхности земли и 70-75% от зимней на высоте 1000 м.

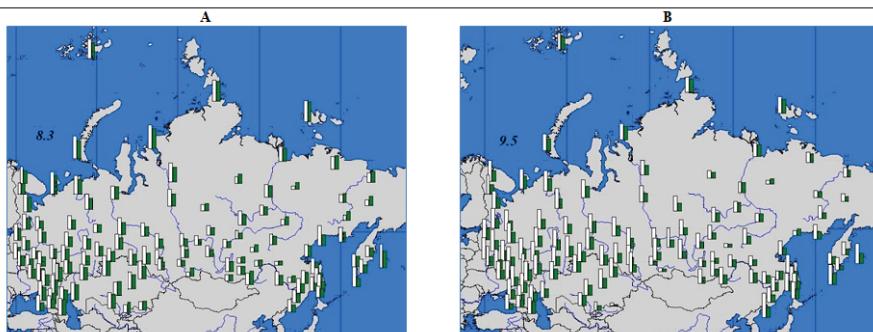


Рисунок 1. Средние скорости ветра для зимнего (белый цвет) и летнего (зеленый цвет) сезонов на высотах 100 м (А) и 1000 м (Б)
Для иллюстрации масштаба около станции Малые Кармакулы (*Новая Земля*)
показано значение скорости на этой станции в зимний период

Figure 1. Average wind speeds for the winter (white) and summer (green) seasons at altitudes of 100 m (A) and 1000 m (B)
To illustrate the scale near the station Malye Karmakuly (*Novaya Zemlya*),
the speed value at this station in winter is shown

Повторяемость штилей

На рис. 2 приведены карты повторяемости штилевых условий на высоте 10 м и 100 м. Повторяемость штилевых условий сильно различается для разных регионов. На побережье Северного Ледовитого океана штилевые условия наблюдаются редко, их повторяемость не превышает 4-6%. В материковой зоне на уровне земли повторяемость штилевых условий максимальна по сравнению с другими высотами. По распределению штилевых условий в материковой зоне можно выделить два больших региона: европейская часть и южная часть Центральной и Восточной Сибири. В европейской части повторяемость штилей в зимнее время у поверхности земли в среднем не превышает 10-15%, в летнее – 10-20%. Во втором регионе картина иная: повторяемость штилей достигает 40-50%, при этом в летнее время повторяемость штилей несколько меньше, чем в зимнее. В материковой зоне с высотой повторяемость штилевых условий падает, сохраняя примерно такое же географическое распределение.

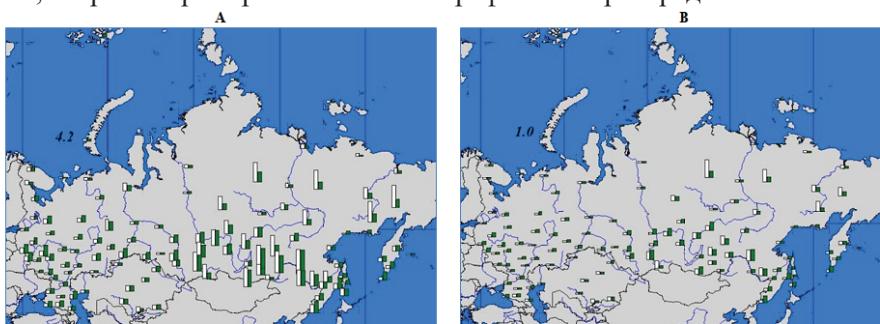


Рисунок 2. Повторяемость штилей в зимний (белый) и летний (зеленый) сезоны на высоте 10 м (А) и 100 м (Б)

Около станции Малые Кармакулы (Новая Земля) указана повторяемость в % для масштаба

Figure 2. The frequency of calms in the winter (white) and summer (green) seasons at an altitude of 10 m (A) and 100 m (B)

Near the station Malye Karmakuly (Novaya Zemlya), the frequency is indicated in % for the scale

Повторяемость слабых ветров

На рис. 3 приведены карты повторяемости слабых ветров на высоте 100 м и 1000 м. На побережье Северного Ледовитого океана слабые ветры наблюдаются редко и с высотой их повторяемость уменьшается. Уменьшение повторяемости с высотой имеет место во всех регионах. Во всех регионах в летнее время слабые скорости ветра наблюдаются чаще, чем в зимнее. Исключение составляет центральная и северная часть Якутии, где в зимнее время слабые ветры наблюдаются чаще, чем в летнее. Аналогично распределению штилей, в материковой части можно выделить два больших региона – европейский регион, где повторяемость слабых ветров на уровне земли составляет 20-30% в зимний период и 30-40% в летний, и южную часть Центральной и Восточной Сибири, где повторяемость слабых ветров существенно больше, чем в европейской части (50-70% и 45-60% соответственно). В области Восточно-Сибирского антициклона как штили, так и слабые ветры наблюдаются чаще в зимнее время. С высотой повторяемость слабых ветров падает, сохраняя примерно такое же географическое распределение.

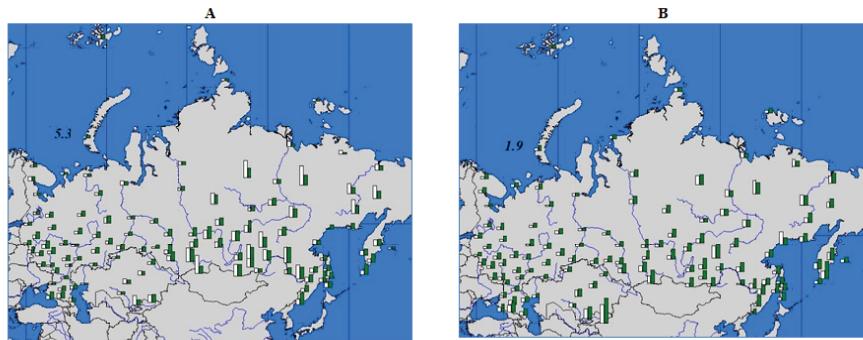


Рисунок 3. Повторяемость слабых ветров в зимний (белый) и летний (зеленый) на высотах 100 (А) и 1000 м (В)
Около станции Малые Кармакулы (Новая земля) указана повторяемость в % для масштаба
Figure 3. The frequency of weak winds in winter (white) and summer (green)
at altitudes of 100 (A) and 1000 m (B)
Near the station Malye Karmakuly (Novaya Zemlya), the frequency is indicated in % for the scale

Повторяемость сильных ветров

На рис. 4 показана карта повторяемости сильных ветров в зимний и летний период. Повторяемость сильных ветров на низких уровнях различна для разных регионов. На островах и побережье Северного Ледовитого океана и на побережье Камчатки на уровне земли она достигает 20-30% в зимнее время, в летнее же время она составляет не более 20%. В материковой зоне сильный ветер наблюдается только на юге европейской части на побережье Черного моря и вблизи него. На остальной территории в нижнем слое атмосферы сильный ветер наблюдается редко. С увеличением высоты их повторяемость возрастает, достигая в европейском регионе на высоте 500 м 40-50% в зимний период и 20-30% в летний. В области азиатского антициклона повторяемости сильных ветров на этой высоте существенно меньше: 15-20% в зимний сезон и 10-15% в летний.

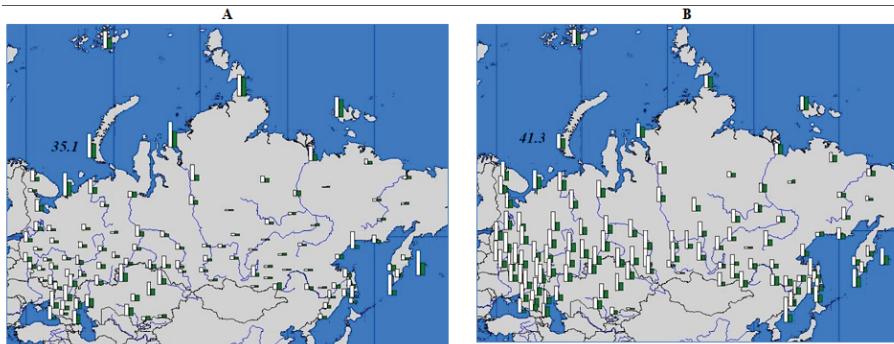


Рисунок 4. Повторяемость сильных ветров в зимний (белый) и летний (зеленый) на высотах 100 м (А) и 1000 м (В)
Около станции Малые Кармакулы (Новая земля) показана повторяемость в % для масштаба
Figure 4. The frequency of strong winds in winter (white) and summer (green) at altitudes
of 100 m (A) and 1000 m (B)
Near the station Malye Karmakuly (Novaya Zemlya), the frequency in % for the scale is shown

Тенденции изменчивости

Для оценки тенденций изменчивости ветрового режима построены временные ряды средних значений скорости и повторяемостей за каждый год. По этим рядам сделаны оценки коэффициентов линейных трендов. Тенденции изменчивости для отдельных сезонов (только зима или только лето) не рассматривались.

В силу неоднородности рядов и естественной изменчивости ветрового режима затруднительно сделать статистически обеспеченные оценки. Неоднородность рядов в значительной мере обусловлена ухудшением качества зондирования в 90-е годы прошлого века, а также изменением локальных условий – переносом станции, сменой приборов, изменением окружающих условий и т.д. В связи с этим далее рассматриваются не количественные значения коэффициентов линейных трендов, а только три их градации: положительные, отрицательные и близкие к нулю.

На рис. 5 приведено географическое распределение тенденций изменчивости режима ветра на высоте 100 м. Коричневым цветом обозначены положительные коэффициенты линейных трендов, синим – отрицательные, белым – отсутствие заметных тенденций.

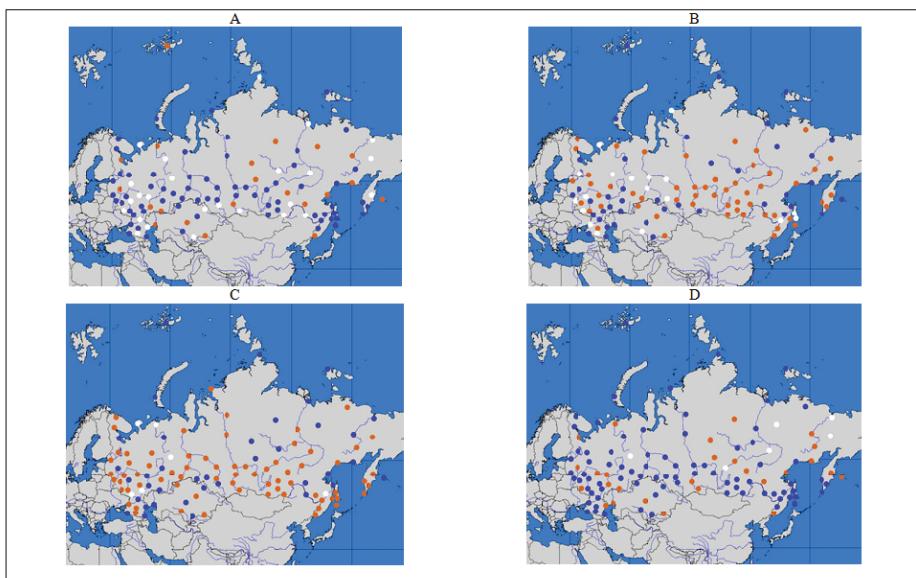


Рисунок 5. Тенденции изменчивости характеристик скорости ветра на высоте 100 м за период 1979-2022 гг.: средней скорости (А), повторяемости штилей (Б), повторяемости слабых ветров (С), повторяемости сильных ветров (Д)
Коричневый цвет обозначает положительную тенденцию, синий – отрицательную, белый – близкую к нулю

Figure 5. Trends in the variability of wind speed characteristics at an altitude of 100 m for the period 1979-2022: average speed (A), repeatability of calm (B), repeatability of weak winds (C), repeatability of strong winds (D)

Brown color indicates a positive trend, blue – negative, white – close to zero

Как можно видеть из рисунка, тенденции изменчивости характеристик скорости ветра имеют разнонаправленные знаки, но при этом можно отметить

некоторые общие закономерности, наблюдаемые на большом числе станций: увеличение повторяемости слабых ветров (рис. 5, С) и уменьшение повторяемости сильных ветров (рис. 5, D). В табл. 1 приведены преимущественные тенденции изменчивости характеристик ветрового режима на всех рассматриваемых высотах. Знак «+» означает увеличение, знак «-» уменьшение, 0 – отсутствие заметных тенденций. Знаки, перечисленные через запятую, означают наличие всех тенденций, начиная с преимущественной, знаки в скобках означают наличие тенденции в незначительной степени. С определенной степенью осторожности можно предположить, что в среднем в пограничном слое на рассматриваемой территории за последние 40 лет происходило замедление скорости ветра.

Таблица 1. Тенденции изменчивости характеристик ветрового режима в пограничном слое на территории Российской Федерации

Table 1. Trends in variability of wind regime characteristics in the boundary layer on the territory of the Russian Federation

Высота, м	Средняя скорость	Повторяемость штилей	Повторяемость слабых ветров	Повторяемость сильных ветров
10	-,(0,+)	-,+,-	+,(-)	-,+,(0)
100	-,(0,+)	+,-,(0)	+,(-,0)	-,+,(0)
500	-,0,+,-	+,-,0,-	+,-(0)	-,+,(0)
1000	0,-,(+,-)	0,(+,-)	-,+,(0)	-,+,(0)

При этом тенденции изменчивости в отдельных регионах могут иметь свои особенности. Так, можно отметить уменьшение повторяемости штилевых условий у поверхности земли на некоторых северных станциях, например, Малые Кармакулы, Тикси, Салехард. На этих станциях во вторую половину рассматриваемого периода у поверхности земли нулевая скорость ветра практически не наблюдалась, хотя в первую половину периода, примерно до 2000 г., повторяемость штилевых условий у поверхности земли на этих станциях была в пределах 5-30%. Возможно, это связано со сменой измерительных условий.

Дискуссия

В работе представлены средние характеристики ветрового режима в нижней части пограничного слоя атмосферы на территории Российской Федерации. Они получены по многолетним аэрологическим наблюдениям российских станций и станций, расположенных на окрестных территориях, за период 1979-2022 гг. Рассмотренные характеристики ветрового режима включают средние скорости и повторяемости штилевых условий, слабых и сильных ветров на нескольких уровнях до высоты 1000 м. Представляет интерес сравнение характеристик ветрового режима с аналогичными характеристиками, полученными по более ранним наблюдениям. В целом особенности распределения средней скорости ветра у поверхности земли совпадают с описанными ранее (Климат России, 2001; Климатические характеристики..., 1983; Национальный

атлас, 2004-2021 и др.). Отдельные детали могут не совпадать, поскольку в приведенных источниках использованы данные приземных станций, которых существенно больше, чем аэрологических. В ряде изданий (Климатические характеристики..., 1983) имеются данные о повторяемости слабых ветров на территории Сибири и Дальнего Востока. Сравнение показало, что по отдельным станциям имеются расхождения. Например, повторяемость приземных ветров со скоростью $V \leq 1 \text{ м с}^{-1}$ по станции Якутск составляет в зимний сезон 53.0% (настоящая работа) и 60.8% (Климатические характеристики..., 1983). В летний, соответственно, 15.2% и 34.2%. Соответствующие цифры по станции Владивосток: зима 28.8% и 11.2%, лето 40.5% и 11.2%.

Помимо средних характеристик получены оценки их временной изменчивости. Следует отметить, что построение тенденций изменчивости ветровых характеристик в нижнем слое атмосферы представляет собой определенную проблему. В значительной степени это связано с неоднородностью рядов, пропусками и уменьшением количества зондирований в 90-е годы, также, возможно, со сменой приборов. На отдельных станциях имеют место различные особенности. Например, на станции Ростов-на-Дону, начиная примерно с 2010 года, приземная скорость ветра существенно уменьшилась по сравнению с более ранним периодом. Это уменьшение прослеживается и на высотах, но на уровне 500 м оно уже не наблюдается. Можно предположить, что в этот период произошло изменение окрестных приземных условий. На ряде северных станций, как было сказано выше, во вторую половину рассматриваемого периода у поверхности земли практически не наблюдалась нулевая скорость ветра. Причины этого могут быть связаны как с естественной изменчивостью, так и с особенностями измерений.

В целом, согласно сделанным оценкам временной изменчивости характеристик ветрового режима, можно сделать предположение о замедлении скорости ветра в пограничном слое за последние 40 лет. Это проявляется прежде всего в увеличении повторяемости слабых ветров, а также в уменьшении средней скорости ветра и повторяемости сильных ветров. С высотой эти особенности постепенно уменьшаются и на уровне 1000 м тенденции изменчивости практически не заметны. Эти особенности отражают общую картину. На отдельных станциях могут проявляться другие закономерности.

Список литературы

Алдухов, О.А., Брюхань, А.Ф. (2013) Оценка условий атмосферной дисперсии для размещения и проектирования атомных станций, *Атомная энергия*, т. 115, вып. 1, с. 44-47.

Алдухов, О.А., Черных, И.В. (2018) Долгопериодные изменения скорости ветра в слое атмосферы 0-2 км над российской Арктикой по данным радиозондирования за 1964-2016 гг., *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 52-66.

Бызова, Н.Л., Шнайдман, В.А., Бондаренко, В.Н. (1987) Расчет вертикального профиля ветра в пограничном слое атмосферы по наземным данным, *Метеорология и гидрология*, № 11, с. 75-83.

Дивинский, Б.В., Кубряков, А.А., Косьян, Р.Д. (2020) Межгодовая изменчивость параметров режима ветра и волнения Черного моря, *Морской гидрофизический журнал*, т. 36, № 4, с.367-382, URL: https://www.researchgate.net/publication/344713362_Mezgodovaa_izmencivost_parametrov_rezima_vetra_i_volneniya_Cernogo_mora (дата обращения 22.08.2023)

Казначеева, В.Д., Руденкова, Т.В. (1985) Организация текущих аэрологических данных на магнитных лентах ЕС, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 115, с. 91-108.

Климат России (2001) Под ред. Н.В. Кобышевой, СПб, Гидрометеоиздат, 655 с.

Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере. Справочное пособие (1983) Под ред. Э.Ю. Безуглой, Л., Гидрометеоиздат, 328 с.

Москаленко, Л.В., Мельников, В.А., Кузеванова, Н.И., Подымов, О.И. (2016) Разномасштабная изменчивость ветрового режима на прибрежной акватории северо-восточной части Черного моря, *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, № 1, с. 74-86. URL: <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-1-74-86> (07.06.2023), (дата обращения 22.08.2023).

Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология (2004-2021), 495 с.

URL: Ветровой режим , Том 2 @ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АТЛАС РОССИИ (nationalatlas.ru), (дата обращения 22.08.2023).

Новый аэроклиматический справочник пограничного слоя атмосферы над СССР. Статистические характеристики ветра. (1987) Т. 2, Москва, Гидрометеоиздат, 184 с.

Руденкова, Т.В. (2010) Формат архивации текущих аэрологических данных, поступающих по каналам связи для ПЭВМ, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 174, с. 41-63.

Свод правил Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС. Часть I. Инженерные изыскания для разработки предпроектной документации (выбор пункта и выбор площадки размещения АЭС) (2012). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103171?ysclid=licuvb9qk-534398427> (дата обращения 22.08.2023).

Федосов, А.А. (2006) Аппроксимация профиля скорости ветра в пограничном слое атмосферы при неустойчивых и нейтральных состояниях атмосферы, *Фундаментальные исследования*, № 7, с. 64-64. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=5195> (дата обращения 22.08.2023).

Хохлова, А.В. (2019) Определение климатических характеристик скорости ветра на высотах до 600-650 м по приземным измерениям, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 185, с. 175-186.

Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting, a Safety Guide (1980) *IAEA Safety Series*, N 50-SG-S3, Vienna IAEA, 108 pp.

Boro, D., Venance, D.H., Kossi, I., Bado, N., Kieno, F., Bathiebo, J. (2019) Vertical profile of wind speed in the atmospheric boundary layer, assessment of wind resource on the Bobo Dioulasso Site in Burkina Faso, *Smart Grid and*

Renewable Energy, vol. 10, pp. 257-278, available at: <http://10.4236/sgre.2019.1011016> (дата обращения 22.08.2023).

Lei, L., Zhou, Chan, P.W., Zhou, Q., Yang, H.-L. (2023) Variation of virtual temperature and wind in the atmospheric boundary layer over the pearl river estuary during 2011-2020, *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, available at: https://www.researchgate.net/publication/366908109_Variation_of_virtual_temperature_and_wind_in_the_atmospheric_boundary_layer_over_the_pearl_river_estuary_during_2011-2020 (дата обращения 22.08.2023).

References

Alduxov, O.A., Bryuxan, A.F. (2013) Ocenna uslovij atmosfernoj dispersii dlya razmeshheniya I proektirovaniya atomny'x stancij [Assessment of atmospheric dispersion conditions for the placement and design of nuclear power plants], *Atomnaya energiya*, vol. 115, issue 1, pp. 44-47.

Alduxov, O.A., Cherny'x, I.V. (2018) Dolgoperiodny'e izmeneniya skorosti vetra v sloe atmosfery' 0-2 km nad rossijskoj Arktikoj po danny'm radiozondirovaniya za 1964-2016 gg. [Long-period changes in wind speed in the atmospheric layer 0-2 km above the Russian Arctic according to radiosonding data for 1964-2016], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 52-66.

By'zova, N.L., Shnajzman, V.A., Bondarenko, V.N. (1987) Raschet vertikal'nogo profilya vetra v pogranichnom sloe atmosfery' po nazemnym danny'm [Calculation of the vertical wind profile in the boundary layer of the atmosphere based on ground data], *Meteorologiya i hidrologiya*, no. 11, pp. 75-83.

Divinskij, B.V., Kubryakov, A.A., Kos'yan, R.D. (2020) Mezhgodovaya izmenchivost' parametrov rezhima vetra i volneniya Chernogo moray [Interannual variability of the parameters of the wind regime and waves of the Black Sea], *Morskoy hidrofizicheskij zhurnal*, vol. 36, no. 4, pp. 367-382. Available at URL: https://www.researchgate.net/publication/344713362_Mezgodovaa_izmencivost_parametrov_rezima_vetra_i_volneniya_Cernogo_mora (07.06.2023) (accessed 22.08.2023).

Kaznacheeva, V.D., Rudenkova, T.V. (1985) Organizaciya tekushhix aerologicheskix dannyx na magnitnyx lentax ES [Organization of current aerological data on EU magnetic tapes], *Trudy VNIGMI-MCzD*, issue 115, pp. 91-108.

Klimat Rossii [The climate of Russia] (2001) in N.V. Koby'sheva (ed), St. Petersburg, Russia, 655 pp.

Klimaticeskie xarakteristiki uslovij rasprostraneniya primezej v atmosfere. Spravochnoe posobie [Climatic characteristics of the conditions for the propagation of impurities in the atmosphere. Reference manual] (1983) in E'.Yu. Bezugloj (ed.), Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 328 pp.

Moskalenko, L.V., Mel'nikov, V.A., Kuzevanova, N.I., Pody'mov, O.I. (2016) Raznomasshtabnaya izmenchivost' vetrovogo rezhma na pribreznnoj akvatorii severo-vostochnoj chasti Chernogo moray [Multi-scale variability of the wind regime in the coastal waters of the northeastern part of the Black Sea],

Izvestiya Rossiskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya, no. 1, pp. 74-86.
Available at URL: <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-1-74-86> (07.06.2023)
(accessed 22.08.2023).

Nacional'nyj atlas Rossii. Vol. 2. Priroda. E'kologiya (2004-2021) [National Atlas of Russia, vol. 2. Nature. Ecology], 495 p. Available at URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/172.html> (accessed 22.08.2023).

Novyj ae'roklimaticeskij spravochnik pogranichnogo sloya atmosfery nad SSSR. Vol. 2. Statisticheskie xarakteristiki vетра (1987) [New ae'agroclimatic reference of the boundary layer of the atmosphere over the USSR. Vol. 2. Statistical characteristics of the wind], Gidrometeoizdat, Moscow, Russia, 184 p.

Rudenkova, T.V. (2010) Format arxivacii tekushhix ae'rologicheskix danny'x, postupayushhix po kanalam svyazi dlya PE'VM [Format for archiving current aerological data received via communication channels for a PC], *Trudy' VNIIGMI-MCzD*, issue 174, pp. 41-63.

Svod pravil (2012) Inzhenerny'e izy'skaniya dlya razmeshheniya, proektirovaniya I stroitel'stva AE'S. Chast' I. Inzhenerny'e izy'skaniya dlya razrabotki predprojektnoj dokumentacii (vy'bor punkta i vy'bor ploshhadki razmeshheniya AE'S) [Code of Rules. Engineering surveys for the placement, design and construction of nuclear power plants. Part I. Engineering surveys for the development of pre-project documentation (selection of the point and selection of the NPP site)]. Available at URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103171?ysclid=licuwvb9qk534398427> (accessed 22.08.2023)

Fedosov, A.A. (2006) Approximaciya profilya skorosti vетра v pogranichnom sloe atmosfery pri neustojchivyyx i nejtral'nyyx sostoyaniyax atmosfery [Approximation of the wind velocity profile in the atmospheric boundary layer under unstable and neutral atmospheric conditions], *Fundamental'nye issledovaniya*, no. 7, pp. 64-64. Available at URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=5195> (accessed: 22.08.2023).

Xoxlova, A.V. (2019) Opredelenie klimaticeskix xarakteristik skorosti vетra na vy'sotax do 600-650 m poprimeyny'm izmereniyam [Determination of climatic characteristics of wind speed at altitudes up to 600-650 m by surface measurements], *Trudy' VNIIGMI-MCzD*, issue 185, pp. 175-186.

Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting, a Safety Guide (1980) *IAEA Safety Series*, N 50-SG-S3, Vienna IAEA, 108 pp.

Boro, D., Venance, D.H., Kossi, I., Bado, N., Kieno, F., Bathiebo J. (2019) Vertical profile of wind speed in the atmospheric boundary layer and assessment of wind resource on the Bobo Dioulasso Site in Burkina Faso, *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 10, pp. 257-278, available at: <http://10.4236/sre.2019.1011016> (дата обращения 22.08.2023).

Lei, L., Zhou, Chan, P.W., Zhou, Q., Yang, H.-L. (2023) Variation of virtual temperature and wind in the atmospheric boundary layer over the pearl river estuary during 2011-2020, *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, available at: https://www.researchgate.net/publication/366908109_Variation_of_virtual_

temperature_and_wind_in_the_atmospheric_boundary_layer_over_the_pearl_river_estuary_during_2011-2020 (дата обращения 22.08.2023).

Поступила в редакцию: 29.08.2023 г.

Доработана после рецензирования: 15.09.2023 г.

Принята к публикации: 06.11.2023 г.

Для цитирования / For citation:

Хохлова, А.В. (2023) Повторяемость слабых и сильных ветров в пограничном слое атмосферы на территории Российской Федерации, оцененная по данным многолетних аэрологических наблюдений, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 4, с. 506-519, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-506-519.

Khokhlova, A.V. (2023) The frequency of weak and strong winds in the atmospheric boundary layer on the territory of the Russian Federation assessed from data of long-term aerological observation, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 4, pp. 506-519, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-506-519.