

СКОРОСТЬ ВЕТРА В ТРОПОСФЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Журавлев Г. Г., Горбатенко В. П.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

634050, Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: ggz50@mail.ru

В работе рассмотрены изменения скорости ветра в толще тропосферы юго-востока Западной Сибири. Используются аэрологические данные среднегодовой скорости ветра у поверхности земли и на стандартных изобарических поверхностях 850, 700, 500 и 300 гПа за период с 1973 по 2020 годы. Анализ данных показал, что в диапазоне географических широт 58 – 60° с.ш. зарегистрирован статистически значимый отрицательный тренд скорости ветра на 5 %-ном уровне. На станциях Западной Сибири, расположенных южнее 58° с.ш. такой тенденции не обнаружено. При этом скорость ветра у поверхности земли уменьшалась на всех станциях, ряды данных которых анализировались в работе.

Ключевые слова: скорость ветра у поверхности земли; скорость ветра в тропосфере.

WIND SPEED IN THE TROPOSPHERE OF WESTERN SIBERIA

Zhuravlev G. G., Gorbatenko V. P.

National Research Tomsk State University

634050, Tomsk, Lenin Ave., 36 E-mail: ggz50@mail.ru

The paper considers changes in wind speed in the troposphere in the southeast of Western Siberia. Upper-air data of the average annual wind speed near the earth's surface and on standard isobaric surfaces of 850, 700, 500 and 300 hPa for the period from 1973 to 2020 were used. In the range of geographic latitudes 58 – 60 ° N. a statistically significant negative trend (at a 5 % level) of wind speed was registered. At stations in Western Siberia located south of 58° N. no such tendency was found. In this case, the wind speed near the earth's surface decreased at all stations, the data series of which were analyzed in the work

Key words: wind speed near the earth's surface; wind speed in the troposphere.

Анализ многолетних изменений параметров ветра на территории России показал, что скорость приземного ветра почти на всей территории России имеет устойчивую тенденцию к уменьшению при увеличении повторяемости слабого ветра и уменьшении повторяемости более сильного [1 – 5] на протяжении примерно нескольких десятилетий. Результаты исследования многолетней изменчивости характеристик ветра в свободной атмосфере не столь однозначны, и над разными территориями тенденции изменения скорости воздушных потоков даже противоположны. Так в работе [6] выполнен анализ трендов средней годовой скорости ветра на изобарических поверхностях 850, 500 и 300 гПа по аэрологическим данным за 1961 – 2000 гг. и проведено их сравнение с трендами средней годовой скорости приземного ветра за тот же период. Уменьшения скорости ветра на высотах на севере

России во второй половине XX века, в отличие от скорости ветра у поверхности земли, не обнаружены. Результаты исследований скорости ветра над европейской территорией России в первое десятилетие текущего века [7], также не выявляют уменьшения средней скорости ветра на высотах. В то же время, исследования атмосферы над территориями космодромов Байконур и Восточный [8] показывают, что в период 1948 – 2014 гг. прослеживается статистически значимое увеличение скорости ветра в верхней тропосфере и нижней стратосфере. Над территориями космодрома Байконур на 0,5 м/с за 10 лет, над космодромом Восточный – на 0,4 м/с за 10 лет.

Результаты исследований, приведенные в [9] показывают, что тенденции изменчивости за период 1985 – 2018 гг. в разных регионах Северного полушария имели разнонаправленный знак. Наиболее сильные отрицательные тренды скорости ветра, достигающие значений 1,5 м/с за 10 лет имели место в нижней стратосфере севернее 55 – 60°с.ш. Это может свидетельствовать об ослаблении зимнего западно-восточного переноса в этом регионе. В поясе широт 30 – 45°с.ш. над европейско-азиатским регионом, напротив, имели место положительные тренды, достигающие значений 1,1 м/с за 10 лет. В тропосфере Причерноморского региона [10] выявлено устойчивое уменьшение скорости ветра во всей толще тропосферы за период 1973 – 2012 гг. Максимальные отрицательные аномалии характерны для слоя от 500 до 400 гПа. Выявленные тенденции свидетельствуют о формировании над этими районами Причерноморского региона динамически устойчивой тропосферы.

Исследование многолетних тенденций изменения скорости и направления ветра особенно актуально в условиях меняющегося климата. Центр Западной Сибири является районом, где замечен один из очагов наибольшей скорости потепления атмосферы за последнее тридцатилетие [11]. Причем даже на фоне обнаруженной в последние годы всеобщей тенденции замедления потепления, очаги потепления над Западной Сибирью сохраняются. С этой точки зрения актуален подробный анализ средних многолетних скоростей ветра в тропосфере Западной Сибири на разных ее уровнях и поиск причин этой изменчивости.

Целью настоящих исследований является анализ многолетней изменчивости средних годовых значений скорости ветра в тропосфере на уровнях стандартных изобарических поверхностей в юго-восточной части Западной Сибири.

Исходным материалом для исследования характеристик ветра у поверхности земли являлись материалы фактических наблюдений за ветром. Для изучения характеристик ветра в слое от поверхности земли до высоты, примерно, 9000 м (300 гПа) использованы данные аэрологического зондирования атмосферы на пяти станциях, (таблица 1) юго-востока Западной Сибири, регистрирующих параметры атмосферы в диапазоне географических широт 54 – 61°с.ш. за период 1973 – 2020 гг.

Таблица 1 – Средние многолетние значения скорости ветра на станциях (1973 – 2020 гг.)

Аэрологическая станция/ номер	Географические характеристики			Средняя многолетняя скорость ветра на уровне, м/с				
	φ°	λ°	Высота станции н.у.м., м	Флюгера	850 гПа	700 гПа	500 гПа	300 гПа
Александровское/23955	60,43	77,89	49	3,2	10,4	12,3	17,1	23,5
Колпашево/ 29231	58,32	82,95	75	2,4	10,2	12,4	17,3	23,8
Барабинск/29612	55,33	78,37	120	3,5	10,3	12,5	17,7	23,8
Новосибирск/29630	54,9	82,95	131	3,2	9,9	12,5	17,3	23,9
Барнаул /29839	55,39	78,4	255	2,0	9,7	12,1	17,0	23,9

Для определения степени выраженности связи между временными рядами рассчитывались коэффициенты корреляции Пирсона. При оценивании значимости коэффициента применялось преобразование Фишера с последующим двусторонним t-тестом нулевой гипотезы при $\alpha = 0,05$ [12]. Определение коэффициентов трендов величин проводилось методами множественного регрессионного анализа [13].

Ветровой режим региона определяется не только макромасштабной циркуляцией атмосферы, но и его орографией и мезо климатическими особенностями, вносящими коррективы в процессы переноса воздушных масс. Увеличение значений скорости ветра с высотой является климатической закономерностью и происходит вследствие уменьшения влияния орографических неоднородностей подстилающей поверхности. Тем не менее, в свободной атмосфере, на которую не влияют силы трения, скорость ветра в разных слоях может как возрастать, так и убывать. Эти особенности вызывают перестройки барических полей, вызванные влиянием горизонтальных градиентов температуры. Ветровой режим тропосферы Западной Сибири мог несколько измениться в последние десятилетия как в связи с глобальным потеплением, изменившим температурные градиенты, так и в связи с изменчивостью макроциркуляционных процессов, определяющих основные элементы климата. Кроме того, на территории Западной Сибири расположен комплекс болот, являющийся источником поступления метана в атмосферу Земли [14]. Высокая скорость потепления атмосферы Западной Сибири по времени совпадает с резко увеличившимся ростом содержания метана, что безусловно могло привести к перераспределению давления атмосферы над регионом и повлиять на скорость ветра.

В работе представлено исследование среднегодовых значений скорости ветра у поверхности земли и на изобарических поверхностях 850, 700, 500 и 300 гПа в районе аэрологических станций юго-востока Западной Сибири, таблица 1. Поля скоростей ветра на всем пространстве практически одинаковы. Средняя многолетняя скорость ветра от поверхности земли до высоты 9000м постепенно увеличивается от 2 м/с до 24 м/с на всех станциях.

Для исследования динамики изменений сравнивались значения скоростей ветра на разных уровнях. На рисунке 1 показана динамика среднегодовой скорости ветра и тренды на уровне флюгера для северных станций Александровское и Колпашево. Тенденция снижения скорости ветра за рассматриваемый период наблюдается отчетливо, с высокими значениями коэффициентов детерминации R^2 . Аналогичные уменьшения среднегодовой скорости ветра на уровне флюгера отмечены и на станциях расположенных южнее: Барабинск, Барнаул, Новосибирск.

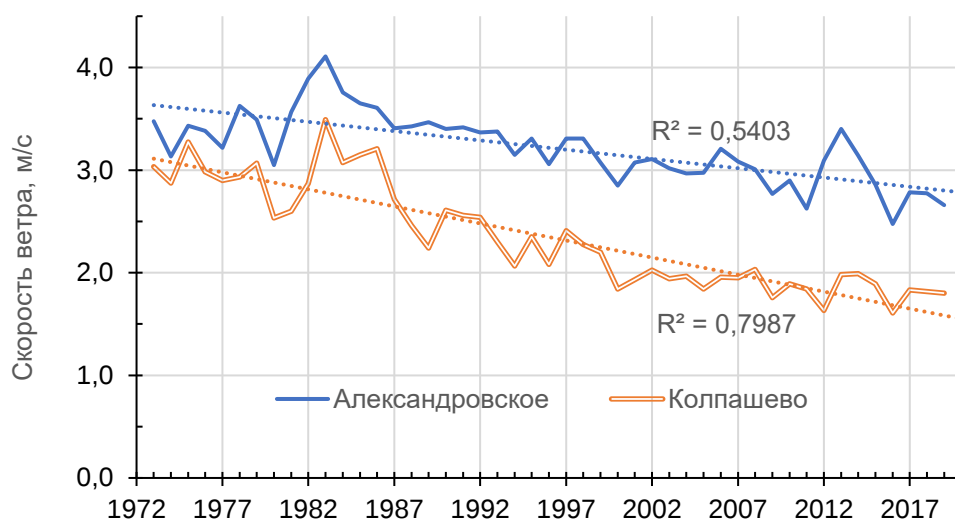


Рисунок 1 – Динамика среднегодовой скорости на ст. Александровское и Колпашево.

На рисунке 2 показана динамика среднегодовых скоростей ветра и тренды на уровнях 850 и 300 гПа. Также отмечается тенденция к снижению среднегодовой скорости ветра. Коэффициенты детерминации невелики в силу большой естественной изменчивости. Такое же изменение отмечено и на станции Колпашево.

Очевидна временная синхронность изменчивости скорости ветра во всех слоях тропосферы, обусловленная, по-видимому, вариативностью макроциркуляционных процессов. Тенденция к постепенному уменьшению среднегодовых значений скорости ветра в тропосфере более заметна на высотах ≥ 5 км. На станциях Барабинск, Барнаул и Новосибирск тенденции уменьшения скорости ветра не отмечается, временные ряды практически стационарны.

Особый интерес представляет связанность процессов у поверхности земли и в толще тропосферы. В таблице 2 представлены величины коэффициентов корреляции средних годовых значений скорости ветра на уровне флюгера и на уровне стандартных высот до 300 гПа на анализируемых станциях юго-востока Западной Сибири. Коэффициенты корреляции скорости ветра у земли и в толще тропосферы статистически значимы с вероятностью на уровне $p < 0,05$. Согласованность значений скорости ветра у земли и на высотах свидетельствует о том, что уменьшение их значений вряд

ли является только местной особенностью. В результате наблюдавшегося потепления климата Западной Сибири, особенно заметного в северных ее территориях уменьшились значения давления атмосферы между северной частью региона и умеренными широтами. Уменьшение градиентов давления неизбежно привело к уменьшению значений скорости ветра.

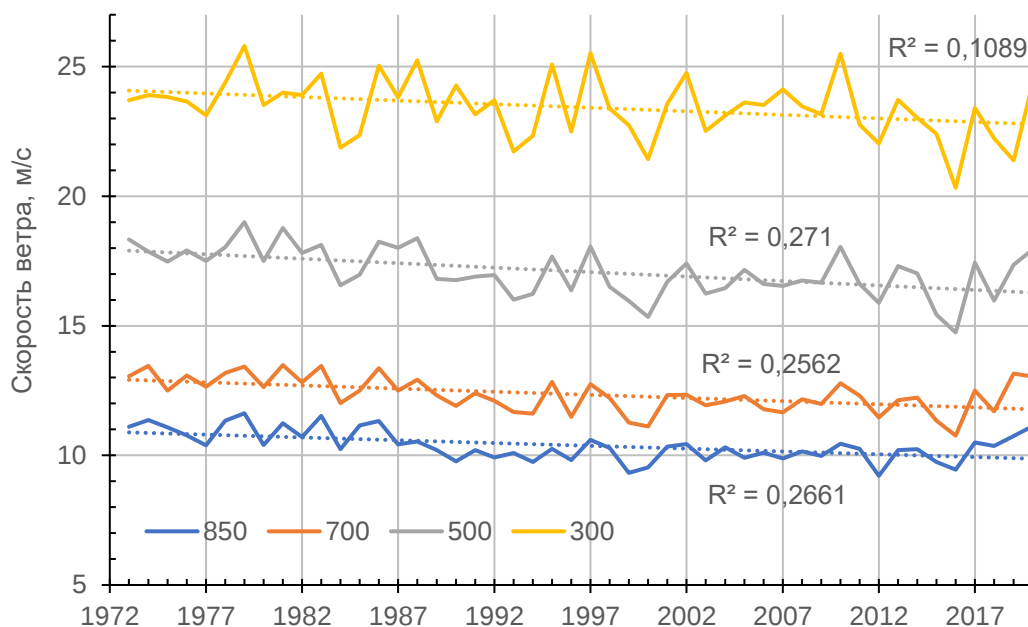


Рисунок 2 – Динамика среднегодовой скорости на уровнях 850 - 300 гПа.
(ст. Александровское)

Таблица 2 – Коэффициенты корреляции скорости ветра на разных высотах со скоростью ветра у поверхности земли

Станции	Коэффициент корреляции между уровнем флюгера и уровнем на высотах АТ			
	АТ-850	АТ-700	АТ-500	АТ-300
Александровское	0,55	0,52	0,52	0,45
Колпашево	0,44	0,56	0,53	0,39
Новосибирск (Огурцово)	0,61	0,54	0,38	0,29
Барабинск	0,60	0,49	0,30	0,26
Барнаул	0,77	0,69	0,54	0,55

Анализируя полученные результаты, можно заметить, что:

- на всех рассмотренных станциях отмечается тенденция к снижению среднегодовой скорости ветра у поверхности земли;
- в диапазоне географических широт 58 – 60° с.ш. зарегистрировано статистически значимое на 5%-ном уровне уменьшение скорости ветра на высотах до уровня 300гПа;
- на станциях Западной Сибири, расположенных южнее 58° с.ш. направленных тенденций изменения скорости ветра не обнаружено;
- наибольшие тенденции уменьшения скорости ветра замечены на высотах более 5 км;

– уменьшение скорости ветра в толще тропосферы северных широт может быть обусловлено наблюдающимся потеплением атмосферы, особенно заметном в северных районах Западной Сибири, повлекшим за собой уменьшение градиентов давления между северными и центральными районами Западной Сибири;

– повсеместное уменьшение скорости ветра у поверхности земли обусловлено, по-видимому другими процессами, изучение которых остается актуальным.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-45-700010 р_а).

Библиографические ссылки

1. Мониторинг скорости ветра на водосборе Волги и Урала в XX веке. / А.В. Мещерская [и др.] // Метеорология и гидрология, 2004. – №3. – С. 83–95.
2. Булыгина, О.Н. Изменения режима ветра на территории России в последние десятилетия. / О.Н. Булыгина, Н.Н. Коршунова, В.Н. Разуваев // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, 2013 – Вып. 568 – С. 156–172.
3. Журавлев, Г.Г. Оценка ветроэнергетического потенциала Томской области / Г.Г. Журавлев // Вестн. Томского гос. ун-та, 2001. – № 274. – С. 141–147.
4. Журавлев, Г.Г. Оценка ветроэнергетического потенциала Кемеровской области / Г.Г. Журавлев, Г.О. Задде // Вестн. Томского гос. ун-та, 2013. – № 376. – С. 175–181.
5. Zhuravlev, G.G. Wind energy potential in the southeastern part of Western Siberia / G.G. Zhuravlev, V.V. Sevastyanov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. – Vol. 232(012020) – P. 1-7.
6. Изменение скорости ветра на севере России во второй половине XX века по приземным и аэрологическим данным. / А.В. Мещерская [и др.] // Метеорология и гидрология, 2006. – № 9. – С. 46–58.
7. Хохлова, А.В. Многолетние изменения ветрового режима в свободной атмосфере над европейской территорией России. / А.В. Хохлова, А.А. Тимофеев // Метеорология и гидрология, 2011. – № 4. – С. 21-33.
8. Горбатенко, В.П. Интегральные характеристики ветра и их динамика над космодромами Байконур и Восточный. / В.П. Горбатенко, О.И. Золотухина, С.Ю. Золотов // Метеорология и гидрология, 2018. – № 4 – С. 94-103
9. Лавров, А.С. Климатический мониторинг ветра в свободной атмосфере северного полушария: многолетние характеристики и тенденции изменчивости. / А.С. Лавров, А.В. Хохлова // Фундаментальная и прикладная климатология, 2020 – Том 2 – С. 58–75.
10. Данова, Т.Е. Современные изменения скорости ветра в теплый период года в тропосфере причерноморского региона. / Т.Е. Данова // Географ. вестн., 2017. – 2(41). – С. 71-80.
11. Роль циркуляционных факторов в потеплении климата Сибири. / В.П. Горбатенко [и др.] // Вестн. Томского гос. ун-та, 2011. – № 346. – С. 174 –180.
12. Von Storch, H. Statistical Analysis in Climate Research. / H. Von Storch, F.W. Zwiers. – Cambridge: Cambridge University Press, 2003 – 484 p.
13. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ. В 2-х кн. / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.
14. Кароль, И.Л. Парниковые газы, аэрозоли и климат. / И.Л. Кароль, А.И. Решетников // Тр. Главной Геофизической Обсерватории им. А.И. Воейкова, 2014. – Вып. 573. – С.5-38.