

ТЕХНИЧЕСКИЕ
НАУКИ

УДК 621.315.1

ИЗМЕНЕНИЕ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ
И АВАРИЙНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

© 2021 г. Член-корреспондент РАН В. В. Клименко^{1,*}, О. Е. Кондратьева¹,
А. Г. Терешин¹, Е. В. Федотова¹, О. А. Локтионов¹, Е. М. Воронкова¹

Поступило 28.01.2021 г.

После доработки 28.01.2021 г.

Принято к публикации 02.02.2021 г.

Рассмотрены изменения ветрового режима на территории России и выполнен анализ влияния этих изменений на аварийность воздушных линий электропередач (ВЛ). Опираясь на актуальные данные метеорологических наблюдений Росгидромета и статистику ПАО “Россети”, авторы провели расчет наблюдаемых изменений экстремальных скоростей ветра в течение последних сорока лет и оценили их связь с числом аварий ВЛ для Кубани, Башкирии и Забайкалья. Установлено, что климатические изменения на территории России в последние десятилетия привели к снижению максимальных скоростей ветра в исследуемых регионах, что способствовало снижению аварийности ВЛ за счет ветрового воздействия. Однако анализ динамики этих изменений с привлечением данных климатических моделей CMIP5 указывает на недавнее изменение этой тенденции в ряде регионов, что может привести к увеличению числа аварий ВЛ. Необходимы дальнейшие исследования изменений ветрового режима на территории энергосистем России для обеспечения их надежного функционирования в условиях климатических изменений.

Ключевые слова: воздушные линии электропередач, аварийность, изменения климата, скорости ветра

DOI: 10.31857/S2686740021020048

Беспрецедентность в историческом масштабе наблюдающихся глобальных изменений климата и их влияния на деятельность человека подтверждена многочисленными научными исследованиями как в России [1], так и за рубежом [2] и вызывает серьезную озабоченность мирового сообщества.

Планы адаптации национальных экономик к ожидаемым изменениям климата стали неотъемлемыми частями национальных стратегий устойчивого развития. Россия не стала исключением [1].

За последние десятилетия был выполнен значительный объем исследований, направленных на оценку воздействия климатических изменений на различные отрасли отечественной экономики, среди которых важнейшее место занимает энергетика [1–5]. В опубликованных работах отмечается в целом благоприятный эффект изменений климата, главным образом обусловленный значительным снижением потребности в отоплении. Одновременно указывается и на ряд негативных последствий, связанных с повышением

температуры воздуха — таких как увеличение энергозатрат на кондиционирование, снижение эффективности работы ТЭС и АЭС, а также существенное изменение режимов работы энергетических объектов и систем по сравнению с проектными.

Одним из наиболее уязвимых к природным воздействиям секторов энергетики является электросетевой комплекс, и в первую очередь воздушные линии электропередач (ВЛ). Отключения потребителей, вызванные сетевыми авариями, ежегодно наносят ущерб в несколько миллиардов рублей.

По данным ПАО “Россети” (табл. 1), в настоящее время до половины технологических нарушений в электросетевом хозяйстве России происходит по природным причинам, из которых ведущую роль играет ветровое воздействие.

За рубежом опубликован целый ряд работ, в которых даются количественные оценки влияния изменений климата, в том числе ветрового режима, на электрические сети [6–8]. В нашей стране также ведется большая работа по метеорологическому и климатологическому сопровождению проектирования и эксплуатации электросетей [9, 10], однако оценки наблюдаемых и тем более ожидаемых изменений прикладных климатических характеристик [5] не сопровождаются необходимыми техническими расчетами.

¹ Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

*E-mail: nilgpe@mpei.ru

Таблица 1. Распределение технологических нарушений в электросетевом хозяйстве России по причинам

Причины	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Конструкционные	16.0%	19.2%	32.0%	29.8%	35.2%	27.6%	36.0%	20.7%	23.0%	24.0%	21.0%
Эксплуатационные	6.3%	14.1%	11.0%	15.5%	13.7%	30.0%	8.0%	15.6%	12.1%	18.1%	18.0%
Внешние природные	50.9%	43.7%	33.0%	30.4%	28.9%	34.0%	45.0%	44.3%	47.0%	43.0%	43.0%
в т.ч. связанные с ветровым воздействием	38.9%	36.5%	26.0%	23.7%	22.3%	23.7%	34.0%	32.0%			
Внешние антропогенные	13.4%	8.3%	7.0%	5.2%	7.8%	6.5%	8.0%	12.6%	6.9%	3.9%	9.0%
Прочие причины (в т.ч. невыявленные)	13.4%	14.7%	17.0%	19.1%	14.4%	1.9%	3.0%	6.8%	11.0%	11.0%	9.0%

По данным ПАО “Россети”.

Настоящая работа призвана в известной мере восполнить этот пробел, сочетая анализ и прогноз изменений ветрового режима на территории России, с использованием данных по аварийности региональных электрических сетей. Для детального исследования были выбраны три территории, относящиеся к трем резко отличающимся климатическим зонам, для которых в открытых источниках доступны данные по надежности линий электропередач:

1. Республика Башкортостан (данные ООО “Башкирэнерго”),
2. Краснодарский край и Республика Адыгея (данные ПАО “Россети Кубань”),
3. Забайкальский край (данные ПАО “Россети Сибирь” – “Читаэнерго”).

1. ИЗМЕНЕНИЯ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Наиболее достоверно установленной на сегодня глобальной тенденцией ветрового режима является снижение приземной скорости ветра из-за уменьшения меридионального температурного градиента [11]. При этом существенную роль играет также естественная изменчивость скорости ветра. Именно влиянием естественных климатических факторов, по всей видимости, объясняется внезапно возникшая тенденция к увеличению скорости ветра, наметившаяся с начала 2010-х гг. [12].

Судя по нашим расчетам на основе результатов глобальных климатических моделей, для реалистических климатических сценариев можно ожидать, что для территории России сочетание этих двух тенденций приведет к увеличению скорости ветра в отдельных регионах к середине нынешнего столетия [4], что может повлиять на надежность электроснабжения. Однако недостаточное пространственное разрешение выполненных в [4] оценок требует выполнения более детальных расчетов.

Общепринятым современным подходом к исследованию ветрового режима является использование сеточных климатических баз данных высокого разрешения, обычно основанных на данных реанализа. Недостатком такого подхода является некоторая погрешность, вносимая при выполнении расчетных процедур реанализа, которая может быть существенна в регионах со сложным рельефом или в районах с недостаточным количеством данных наблюдений. Для территории России доступно ограниченное количество исследований, рассматривавших применимость данных реанализа для исследования климатических режимов на отдельных участках территории страны, и совсем нет специально подготовленных сеточных массивов высокого разрешения, рассчитанных на непосредственное практическое использование. Указанный недостаток данных привел авторов к необходимости разработки альтернативного подхода, основанного на непосредственном использовании данных наблюдений. При этом следует подчеркнуть, что использование этого подхода направлено на получение первоначальной, достаточно грубой, оценки особенностей ветрового режима, наиболее существенных для рассматриваемой практической задачи.

Были рассмотрены данные срочных станционных наблюдений сети Росгидромета 3-часового разрешения. Учет пространственных особенностей приповерхностной скорости ветра был выполнен с помощью иерархической кластеризации, результаты которой представлены на рис. 1.

Для трех рассматриваемых в настоящей работе территорий на протяжении предыдущих сорока лет были характерны следующие тенденции изменения ветрового режима. В Башкирии тенденции изменения скорости ветра различны для ее северной и южной частей. Если в северной части средняя скорость ветра снижается при сохранении максимальных ее значений практически неизменными, то в южной части Башкортостана и соседней с ней Оренбургской области (кластер 12 для средней скорости и 11 – для максимальной)

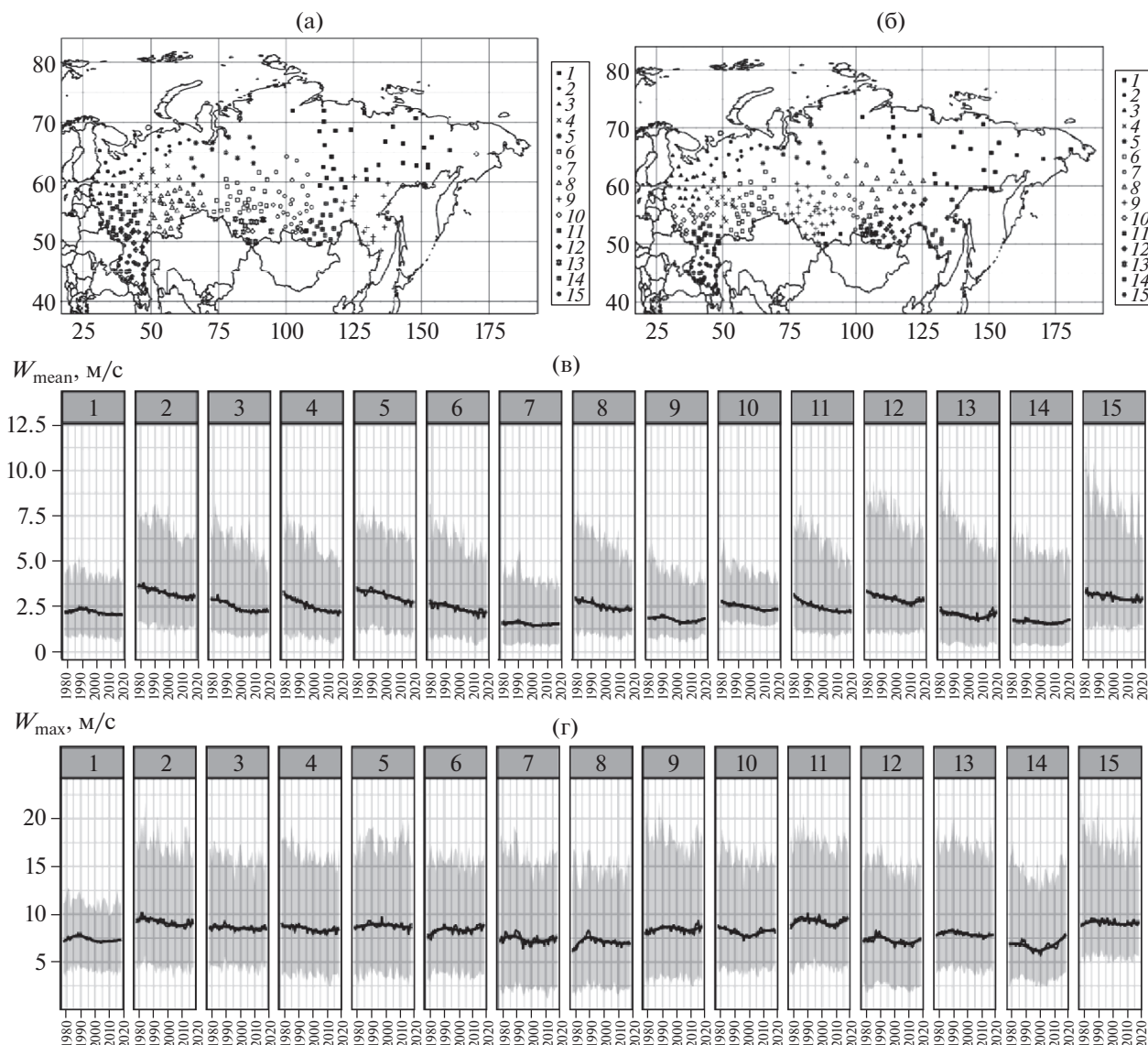


Рис. 1. Кластеризация пунктов измерения и тенденции изменения средней (W_{mean}) (а, в) и максимальной (W_{max}) (б, г) скоростей ветра на территории России в соответствии с данными метеорологических наблюдений. Черная линия – медиана распределения скоростей по станциям региона, светло-серым цветом выделен диапазон изменений значения скорости по всему региону на протяжении каждого отдельного года (по данным ВНИИГМИ-МЦД).

средняя суточная скорость ветра снижалась до 2005–2010 гг., после чего начала возрастать со скоростью около 1 м/с за декаду. Одновременно достаточно резко начала увеличиваться максимальная скорость (~2 м/с за декаду). Указанные особенности динамики могут объясняться естественной изменчивостью, поскольку для этого региона известно наличие корреляции сеточных массивов ветра с индексами атмосферной циркуляции [12].

Для Краснодарского края и Адыгеи (кластер 15) наблюдалось снижение и средней, и максимальной скоростей вплоть до 2010 г., после чего наме-

тилась некоторая тенденция к увеличению обоих параметров.

Наконец, для Забайкальского края (кластер 14 для средней скорости ветра и 12 – для максимальной) основные закономерности изменения скорости ветра схожи с отмеченными для юга Башкортостана и Оренбургской области: вплоть до начала 2000-х гг. наблюдалось снижение средней и максимальной скорости ветра, после чего начался рост обоих параметров, сильнее выраженный для максимальной скорости.

Для более детального исследования региональных особенностей изменения ветрового режима за последние десятилетия по данным ме-

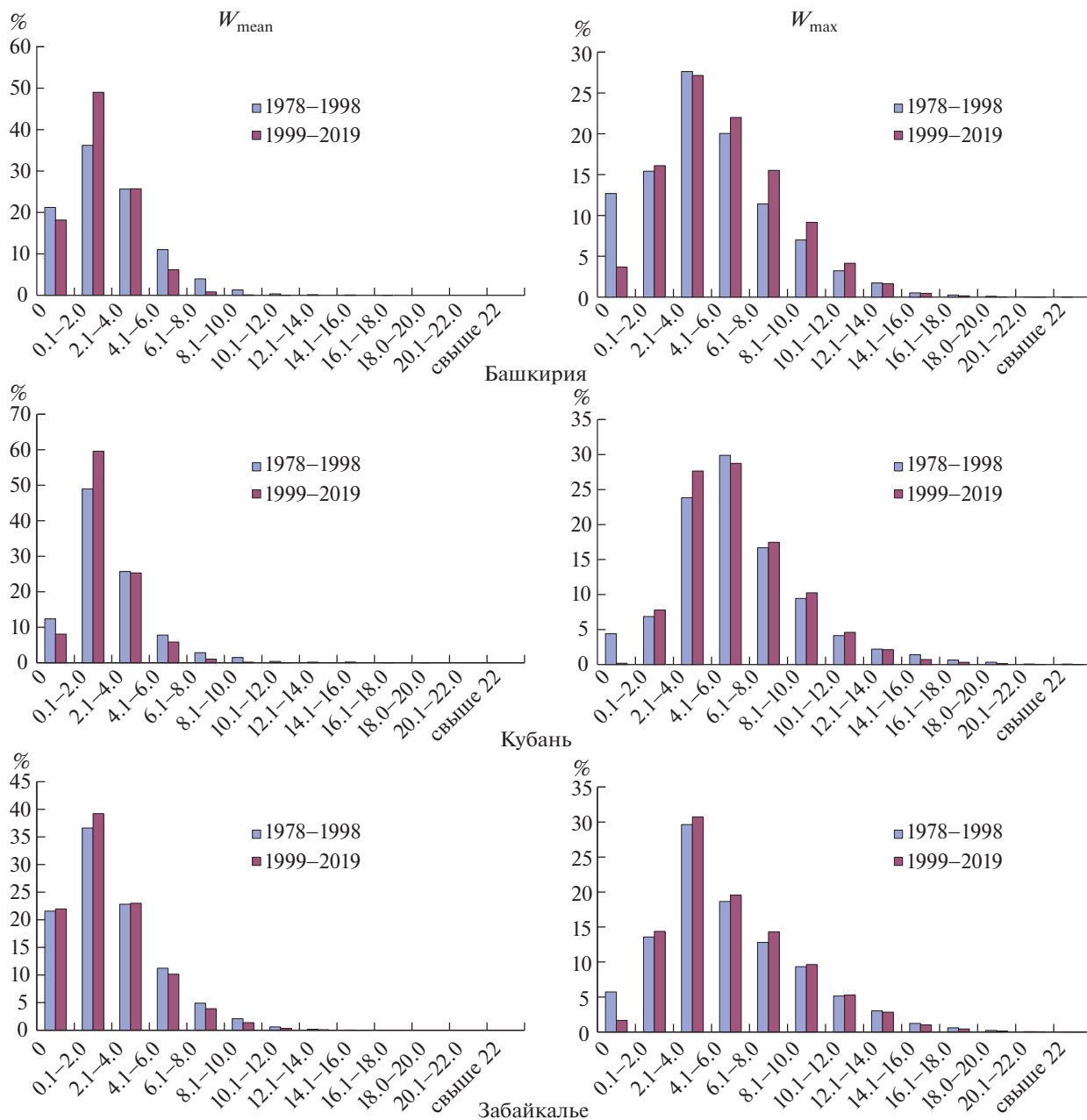


Рис. 2. Распределение средних (W_{mean}) и максимальных (W_{max}) (за три часа между сроками наблюдений) скоростей ветра по градациям в 1978–1998 гг., 1999–2019 гг. (по данным ВНИИГМИ-МЦД).

теорологических наблюдений ВНИИГМИ-МЦД за период 1966–2020 гг. (информация по ветру приведена в них с конца 1978 г.) получены оценки

распределения средних (W_{mean}) и максимальных (W_{max}) (за три часа между сроками наблюдений) скоростей ветра по градациям в 1978–1998 гг. и

Таблица 2. Перечень метеостанций и средние значения по регионам для средних (W_{mean}) и максимальных (W_{max}) за три часа между сроками наблюдений скоростей ветра

Регион	Метеостанции	W_{mean} , м/с		W_{max} , м/с	
		1978–1998	1999–2019	1978–1998	1999–2019
Башкирия	Уфа, Стерлитамак, Зилаир	2.5	2.0	4.6	5.2
Кубань	Краснодар, Приморско-Ахтарск, Сочи	2.5	2.3	5.9	6.4
Забайкалье	Чита, Сретенск, Сосново-Озерское	2.3	1.9	5.7	5.2

Таблица 3. Вероятность аварий ВЛ в зависимости от максимальной скорости ветра W_{max} (расчет настоящей работы по данным ПАО “Россети” и ВНИИГМИ-МЦД за 2014–2018 гг.)

Регион	Метеостанции	Градации скорости ветра W_{max} , м/с					
		0.1–5.0	5.1–10.0	10.1–15.0	15.1–20.0	20.1–25.0	более 25
Башкирия	Уфа, Стерлитамак, Зилаир	0.1%	0.1%	0.4%	4.4%	25.3%	69.7%
Кубань	Краснодар, Приморско-Ахтарск, Сочи	0.01%	0.01%	0.1%	1.5%	16.0%	82.4%
Забайкалье	Чита, Сретенск, Сосново-Озерское	0.2%	0.2%	0.4%	2.2%	4.6%	92.4%

1999–2019 гг. для Кубани, северной части Башкирии и Забайкалья (рис. 2). Перечень метеостанций, по которым проводились расчеты, приведен в табл. 2.

Как видно из результатов расчетов, за минувшие 40 лет произошли заметные изменения в ветровом режиме исследуемых территорий. С одной стороны, во всех трех исследованных регионах наблюдается снижение дисперсии средних скоростей ветра — частота как штилей, так и штормовых значений заметно снижается в 1999–2019 гг. по сравнению с 1978–1998 гг. В то же время метеорологические наблюдения свидетельствуют о сдвиге распределения максимальных скоростей ветра за тот же период в сторону больших значений. В целом по исследованным регионам для

средних за двадцатилетия значений (табл. 2) наблюдается снижение средних скоростей ветра W_{mean} и увеличение скорости максимальных порывов W_{max} . Полученные результаты согласуются с результатами проведенного кластерного анализа и полностью соответствуют данным анализа Росгидромета [13].

2. АВАРИЙНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ В МЕНЯЮЩИХСЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

По данным региональных сетевых компаний ПАО “Россети”, для Кубани, Башкирии и Забайкалья за период 2014–2018 гг. и метеорологиче-

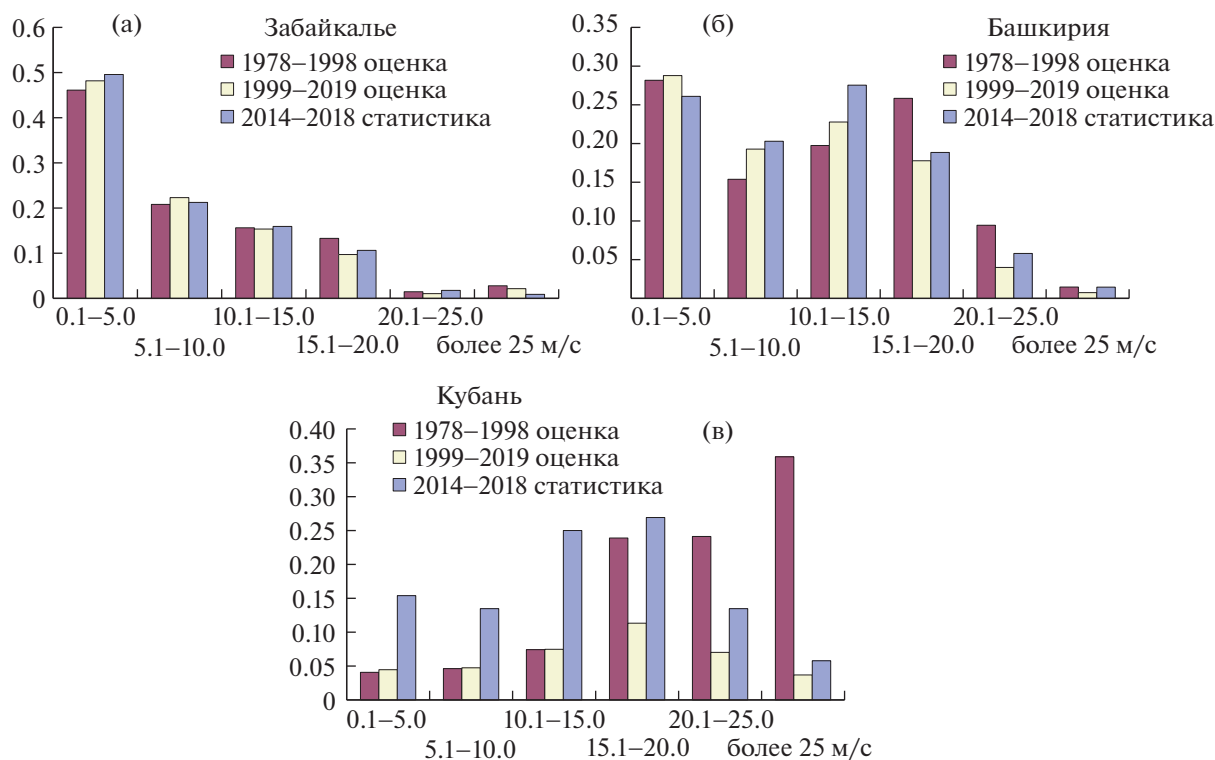


Рис. 3. Аварийность ВЛ в 1978–2019 гг. (изменения относительного числа аварий ВЛ от воздействия ветра различных градаций скорости W_{max}).

Таблица 4. Параметры кривой вероятности аварий $P_a(W_{\max})$ для рассматриваемых регионов и соответствующее ей увеличение относительного N_2/N_1 и абсолютного ΔN количества аварий ЛЭП при возрастании среднегодовой скорости ветра на 1 м/с

Регион	Приближение “абсолютного доверия”			Регрессия на “хвосте распределения”		
	W_1 , м/с	W_2 , м/с	$\Delta N/N _{\Delta W=1 \text{ м/с}}$	W_1 , м/с	W_2 , м/с	$\Delta N/N _{\Delta W=1 \text{ м/с}}$
Башкирия	5	20	0.9	16.8	32.2	4.5
Кубань	5	20	1.1	18.2	31.7	11.0
Забайкалье	5	25	1.3	18.4	28.8	10.9

ских наблюдений ВНИИГМИ-МЦД за то же время были сформированы массивы аварийности ВЛ в результате ветрового воздействия по градациям максимальной скорости ветра, наблюдающихся в момент возникновения аварии.

По этим данным была рассчитана вероятность аварий ВЛ (в их современном техническом и эксплуатационном состоянии) P_a^i в зависимости от максимальной скорости ветра:

$$P_a^i = \frac{N_a^i / P_w^i}{\sum N_a^i / P_w^i}, \quad (1)$$

где P_w^i — относительная частота порывов ветров i -й градации, которая определяется как

$$P_w^i = \frac{N_w^i}{\sum N_w^i}, \quad (2)$$

N_w^i — число порывов ветров i -й градации, зафиксированных на метеостанциях региона.

Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Приведенные данные количественно подтверждают очевидный факт, что высокие скорости порывов ветра приводят к гораздо большим (на два-три порядка) вероятностям повреждений ВЛ. Результаты расчетов общего количества аварий ВЛ, связанных с ветровым воздействием, и плотности распределения их вероятностей по градациям скоростей ветра для периодов 1978–1998 и 1999–2019 гг. представлены на рис. 3.

Вероятность повреждения ЛЭП P_a от скорости ветра W_{\max} с удовлетворительной для практических расчетов точностью можно аппроксимировать логистической кривой: при скоростях ниже порогового значения W_1 вероятность аварии из-за ветрового воздействия близка к нулю, при превышении скоростью ветра критического значения W_2 вероятность аварии P_a стремится к единице [14].

Доступные данные для низких скоростей ветра (табл. 3) требуют допустить, что аварии, связанные с ветровым воздействием, происходят даже тогда, когда максимальная скорость ветра не превышает 5 м/с, что соответствует “слабому ветру”

по шкале Бофорта, способного только слегка раскачивать листья и тонкие ветви деревьев. Это противоречие заставляет предположить, что часть аварий была не вполне корректно отнесена к группе вызванных ветровым воздействием.

Чтобы учесть неопределенности, связанные с качеством доступных данных по аварийности, было рассмотрено два варианта аппроксимации кривой вероятности $P_a(W_{\max})$. Первый метод состоял в абсолютном доверии к доступным данным и использовании для эмпирических оценок W_1 и W_2 всех доступных данных [14, 15]. Во втором случае наиболее достоверной считалась связь с ветровым воздействием тех аварий, которые произошли при скорости ветра на рассматриваемой территории не менее 15 м/с (“крепкий ветер” по шкале Бофорта, когда качаются стволы деревьев), а пороговые значения W_1 и W_2 рассчитывались на основе регрессионной модели, построенной при высоких значениях скорости ветра.

С помощью модельных кривых $P_a(W_{\max})$, полученных двумя упомянутыми методами, в настоящей работе были рассчитаны вероятности аварий, связанных с ветровым воздействием, на рассматриваемых территориях для каждого года по всему массиву данных ВНИИГМИ-МЦД за 1978–2019 гг. Корреляционный анализ позволил установить наличие заметной положительной корреляционной связи (коэффициент Пирсона более 0.5) между среднегодовыми значениями P_a и W_{mean} значительной доли метеорологических станций, в том числе расположенных в интересующих нас трех регионах. Это дало возможность использовать для оценки вероятности аварий данные для среднегодовой скорости ветра, наиболее изученной на сегодня характеристики ветрового режима на территории России.

Параметры кривой вероятности аварий, рассчитанные обоими методами, а также соответствующее этой кривой увеличение аварийности приведены в табл. 4. Чувствительность аварийности, рассчитанной методом регрессии на высоких значениях скорости, к увеличению скорости ветра оказывается на порядок выше по сравнению с методом “абсолютного доверия к данным”.

Таблица 5. Изменение количества аварий ВЛ, связанных с воздействием ветра на историческом (1999–2019 гг.) и прогнозном (2045–2054 гг.) периодах по сравнению с количеством аварий в 1978–1998 гг.: а – кривая $P_a(W_{\max})$ рассчитана в приближении “абсолютного доверия”; б – кривая $P_a(W_{\max})$ рассчитана методом регрессии на верхнем квантиле распределения скорости

Регион	1999–2019 гг.		2045–2054 гг.	
	а	б	а	б
Башкирия	93%	57%	94%	86%
Кубань	95%	69%	101%	112%
Забайкалье	90%	75%	96%	117%

Полученные кривые вероятности аварий были использованы для ретроспективных и прогнозных оценок аварийности электросетевого хозяйства в рассмотренных регионах. Следует особо отметить, что для всего рассматриваемого периода, включая его прогнозную часть, 1978–2054 гг. техническое состояние исследуемых электросетей принималось неизменным и соответствующим условиям 2014–2018 гг. Для прогнозных расчетов были использованы результаты ансамблевых оценок для среднегодовой скорости ветра, основанных на архиве модельных экспериментов SMIP5 для климатического сценария, который, на наш взгляд, является наиболее реалистичным [3, 4]. Согласно нашим оценкам, структура полей изменения скорости ветра оказывается весьма неоднородной. На территории трех рассмотренных регионов будут наблюдаться области, в которых скорость ветра возрастет по сравнению с началом 2000-х гг. С тем чтобы получить оценку, близкую к консервативной, для прогнозных расчетов были приняты наибольшие вероятные изменения средней скорости ветра для каждого из регионов.

Использованные прогнозные оценки основаны на результатах расчета на глобальных климатических моделях, что неизбежно приводит к существенному сглаживанию местных региональных эффектов, которые могут быть весьма существенны (см. рис. 1). Другим важным ограничением выполненных расчетов является принципиальная невозможность учесть возрастание вероятности экстремальных значений скорости ветра, которое в отдельных регионах мира считается вполне возможным, но прогноз которого на сегодня связан с серьезными фундаментальными трудностями. Оба ограничения означают, что принятые допущения склонны недооценивать возможное увеличение локальных значений скорости ветра, из-за чего выполненную оценку можно считать оптимистическим вариантом консервативного приближения.

Результаты проведенных расчетов приведены в табл. 5. В долгосрочной динамике аварийности в

течение последних сорока лет очевидно проявление естественной изменчивости: из-за отмеченного в рассматриваемых регионах снижения средней и максимальной скорости ветра в 1980–1990-е гг., число аварий ЛЭП из-за ветрового воздействия в 1999–2019 гг. заметно снизилось по сравнению с 1978–1998 гг. Но теперь увеличение скорости ветра, начавшееся с 2000–2010-х гг. практически повсеместно и которое, по-видимому, будет продолжаться на протяжении следующих тридцати лет, безусловно, изменит тенденцию снижения аварийности на противоположную. Однако количественная оценка этого увеличения сильно зависит от степени доверия к данным статистики аварий и процедурой построения кривой вероятности аварийности $P_a(W_{\max})$.

Тем не менее по самой оптимистичной оценке в середине XXI века количество аварий ЛЭП из-за ветрового воздействия останется все еще несколько ниже, чем в 1978–1998 гг. и лишь в самом худшем из рассмотренных случаев произойдет увеличение числа аварий на 10–20% по сравнению с 1978–1998 гг. Изменение периодов осреднения также может быть существенно для результата из-за немоной динамики ветрового режима: если за опорный период выбирать ближайшее прошлое (1999–2019 гг.), то относительное изменение количества аварий на протяжении следующих тридцати лет в худшем варианте развития событий может составить до 50%.

Результаты расчетов показывают, что изменения ветрового режима на территории России за последние десятилетия в рассмотренных регионах привели к заметному снижению числа аварий, связанных с климатическим воздействием. Прогнозные климатические расчеты позволяют утверждать, что сохранение столь благоприятной динамики в ближайшие десятилетия крайне маловероятно из-за регионального увеличения скорости ветра, по-видимому, хотя бы отчасти связанное с проявлением естественной изменчивости.

ВЫВОДЫ

1. До половины общего числа аварий в электросетях России вызвана природными причинами, из них большая часть (20–40% от общего числа) связана с ветровым воздействием.
2. Наблюдаемые в последние десятилетия изменения ветрового режима на территории России носят сложный пространственно неравномерный характер, модельные расчеты будущих изменений скоростей ветра также дают неоднородную картину с вероятным локальным возрастанием скорости ветра во всех трех рассмотренных регионах на фоне глобальной тенденции к ее снижению над материками.
3. Полученные предварительные оценки свидетельствуют о возможности увеличения числа

аварий в электросетевом хозяйстве страны из-за возрастания скорости ветра в отдельных регионах, расположенных в полосе средних широт.

4. Острый недостаток статистических данных для количества аварий ЛЭП является сегодня серьезным препятствием для построения более уверенного прогноза.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы данные Публичного акционерного общества “Россети” (ПАО “Россети”, www.rosseti.ru) и его региональных подразделений и Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации Росгидромета (ВНИИГМИ-МЦД, www.meteo.ru).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-08-00320) в части климатических исследований и Российского научного фонда (проект 20-19-00721) в части энергетических расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета) / Под ред. В.М. Катцова, Б.Н. Порфирьева. СПб; Саратов: Амирит, 2020. 120 с.
2. *Arent D.J., Tol R.S.J., Faust E., Hella J.P., Kumar S., Strzepek K.M., Toth F.L., Yan D.* Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Pt A: Global and Sectoral Aspects. Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, 2014. 659 p.

3. *Klimenko V.V., Fedotova E.V., Tereshin A.G.* // Energy. 2018. V. 142. P. 1010–1022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.069>
4. *Клименко В.В., Федотова Е.В.* // Теплоэнергетика. 2020. № 6. С. 6–20. <https://doi.org/10.1134/S0040363620060053>
5. *Акентьева Е.М., Ключева М.В., Фасолько Д.В.* // Тр. ГГО им. А.И. Воейкова. 2019. № 595. С. 7–21.
6. *Fant C., Boehlert B., Strzepek K., Larsen P., White A., Gulati S., Li Y., Martinich J.* // Energy. 2020. V. 195. id. 116899. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116899>
7. *Jufry F.H., Widiputra V., Jung J.* // Appl Energy. 2019. V. 239. P. 1049–1065. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.017>
8. *Zamuda C.D., Wall T., Guzowski L., Bergerson J., Ford J., Lewis L. P., Jeffers R., DeRosa S.* // Electric J. 2019. V. 32. id. 106642. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.106642>
9. *Аржанова Н.М., Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н.* // Тр. ВНИИГМИ–МЦД. 2018. № 182. С. 101–110.
10. *Булыгина О.Н., Дементьева Т.В.* // Тр. ВНИИГМИ–МЦД. 2018. № 182. С. 8–18.
11. *Miao H., Dong D., Huang G., Hu K., Tian Q., Gong Y.* // Energy. 2020. V. 200. id 117382 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117382>
12. *Zeng Z., Ziegler A.D., Searchinger T. et al.* // Nat. Clim. Chang. 2019. V. 9. P. 979–985. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6>
13. Доклад об особенностях климата на территории РФ за 2019 г. / М.Ю. Бардин, В.И. Егоров, А.М. Николаева, Т.В. Платова, Э.Я. Ранькова, О.Ф. Самохина и др. М.: Росгидромет, 2020. 97 с.
14. *Lee S., Ham Y.* // Sust Cities and Society. 2020. V. 65. id. 102587.
15. *Kondrateva O., Myasnikova E., Loktionov O.* // Env. Clim. Tech. 2020. V. 24. No. 3. P. 201–214. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0097>

CHANGES IN THE WIND REGIME AND THE POWER LINES ACCIDENTS IN RUSSIA

Corresponding Member of the RAS V. V. Klimenko^a, O. E. Kondratyeva^a, A. G. Tereshin^a,
E. V. Fedotova^a, O. A. Loktionov^a, and E. M. Voronkova^a

^a National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

The paper examines changes in the wind regime in Russia and analyzes the impact of these changes on the accident rate of overhead transmission lines (OTL). Based on the current data of national meteorological network observations and power grid operator’s statistics, the authors calculated the observed changes of extreme wind speeds over the past forty years and assessed their connection to the number of accidents of OTL for Kuban, Bashkiria and Zabaikalye. It has been established that climate change in Russia in recent decades has led to a decrease of maximum wind speeds in the regions studied, which contributed to a decrease in the accident rate of OTL due to wind impact. However, an analysis of the dynamics of these changes employing CMIP5 climate models indicates a recent reverse change in this trend in a handful of regions, which may lead to a future increase in the number of OTL accidents. Further research is needed concerning changes in the wind regime in Russia’s power grids to ensure their reliable functioning under the anticipated climate change.

Keywords: overhead transmission lines, accident rate, climate change, wind speeds