

### 3.9. Климатические воздействия на конструкции зданий и сооружений

#### 3.9.1. Снеговые нагрузки

Воздействия на здания и сооружения, вызванные климатическими факторами, в настоящее время учитываются европейскими стандартами при определении расчетных параметров, если существует возможность превышения предельных состояний по несущей способности и эксплуатационной пригодности, вследствие перемещений и/или напряжений конструктивных элементов. Снеговые нагрузки на конструкции (в первую очередь, на кровлю) должны устанавливаться в соответствии с нормами для каждой расчетной ситуации и схемы приложения нагрузки. Характеристическое (нормативное) значение снеговой нагрузки на покрытие (кровлю) определяется из характеристического значения снеговой нагрузки на грунт путем умножения на соответствующие коэффициенты с учетом различного распределения снега на покрытии. Причиной разных конфигураций снеговых нагрузок на покрытия могут являться геометрические и физические свойства покрытия, условия окружающей местности и климатические (температурные, ветровые) условия.

Методики нормирования климатических воздействий на конструкции, представленные в государственных и европейских стандартах, основаны на экспериментальных данных (результатах наблюдений) за продолжительный период. Происходящие климатические изменения, среди которых наиболее значимы изменения температур воздуха и количества осадков, подлежат обязательному учету в ходе нормирования воздействий.

Объектом технического нормирования выступают максимальные годовые значения веса снегового покрова на поверхности земли. На современном этапе развития прикладных исследований и инженерной практики оценка снеговых нагрузок на конструкции зданий и сооружений базируется на характеристических значениях нагрузки, которые имеют годовую вероятность превышения 0,02. Пятидесятилетняя расчетная повторяемость увязывается с нормативным сроком эксплуатации зданий и сооружений.

Методики назначения нормативной снеговой нагрузки на покрытиях зданий базируются, как известно, на прогнозируемом значении веса снегового покрова на единицу площади (на поверхности земли, на защищенном от ветра участке). Уровень качества нормирования при этом в решающей степени зависит от степени статистической достоверности указанного прогноза. Основой для определения прогнозных значений нагрузок являются результаты снегомерных съемок, проводимых на метеостанциях, а в качестве исходных значений рассматриваются годовые максимумы веса снегового покрова земли. Традиционно используют два основных способа расчета прогнозного значения веса снегового покрова.

*Первый способ* основан на построении статистического ряда годовых максимумов снеговых нагрузок. Полученный ряд выравнивают по одному из распространенных теоретических законов (обычно рассматривают первое предельное распределение Гумбеля, логнормальное и нормальное распределения), при этом используют один из известных параметрических критериев согласия (например, Пирсона или Колмогорова). Затем, согласно найденному теоретическому распределению, рассчитывают вес снегового покрова, соответствующий заданным значениям обеспеченности прогноза и периода повторяемости.

Существенным недостатком указанного способа расчета является ограниченность выборки исходного климатологического материала (первичных данных), обусловленная фактической длительностью периода наблюдений (40–60 лет, а иногда и менее). Применяемые обычно критерии проверки статистических гипотез в этих условиях дают весьма приблизительный ответ на вопрос о согласованности эмпирического и выбранного теоретического распределений. Кроме того, существуют принципиальные проблемы данной методологии расчета, не связанные с объемом выборки.

Согласно *второму способу* различные статистические гипотезы вообще не выдвигаются, а priori же используют первое предельное распределение Гумбеля, поскольку считается, что именно такому закону подчиняется статистика экстремальных значений (в данном случае – годовых максимумов снеговой нагрузки). Способ методически разработан достаточно подробно (в частности, так называемый коэффициентный метод позволяет, исходя из выборочного среднего и выборочной дисперсии, непосредственно вычислить параметры распределения Гумбеля с учетом поправок, учитывающих конкретный объем выборки) и широко применяется в практике проектирования.

Однако экстремальные значения распределены по закону Гумбеля лишь у так называемых простых объектов, наблюдаемые случайные величины которых распределены экспоненциально либо по нормальному (гауссовскому) закону. Напротив, многие сложные системы описываются степенными законами распределения вероятностей.

Различие между нормальным и степенным распределениями носит принципиальный характер. Так, если статистика системы описывается нормальным законом, то, согласно правилу «трех сигм», свыше 99,7 % событий отклоняется от среднего значения не более чем на три стандартных (средне-квадратичных) отклонения, а за 5 стандартных отклонений выбивается и вовсе менее одного события на миллион. Это дает возможность обоснованно пренебречь очень крупными отклонениями (редкими событиями), т.е. просто «отрезать хвост» распределения. Статистика же величин, описываемых степенными законами распределения, отличается тем, что крупные события, приходящиеся на хвост распределения, случаются не так уж и редко, чтобы ими пренебрегать. По этой причине степенные законы распределения вероятностей называют также «распределениями с тяжелыми хвостами» (*heavy tails* или *fat tails*).

В терминах оценки безопасности и риска хвост распределения соответствует так называемым гипотетическим авариям. Степенные законы распределения вероятностей в корне меняют традиционные представления о надежности и риске (базирующиеся на предположении о малой вероятности стечения большого числа независимых неблагоприятных обстоятельств, что вытекает из центральной предельной теоремы). Природа же степенных законов распределения, а в конечном итоге и самих катастроф связана с сильной взаимозависимостью происходящих событий, т.е. лавинообразным нарастанием некоторого случайного возмущения с вовлечением все большего количества факторов. Таким образом, самая простая (и потому привлекательная) – линейная парадигма, согласно которой моделью некоего наблюдаемого случайного процесса является «броуновское движение» (последовательные изменения параметра суть независимые случайные величины), в случае сложных систем оказывается недостаточно адекватной.

Метеорологическая система, очевидно, должна рассматриваться как сложная, поскольку ее различные элементы и наблюдаемые факторы (температура, количество жидких и твердых осадков, направление и сила ветра и т. п.) в значительной степени взаимосвязаны, что не дает достаточных оснований считать эффект их суммарного влияния нормально распределенным. Современные требования к обеспечению надежности проектируемых сооружений обуславливают, таким образом, необходимость принимать во внимание, помимо распределения Гумбеля, иных (в том числе степенных) законов распределения экстремальных метеорологических величин.

Ранее нами в основу разработки Национального приложения к ТКП EN 1991-1-3 [149] были положены экспериментальные данные наблюдений за высотой, объемной плотностью и весом снегового покрова (запасом воды) на единицу площади, выполненных за период с 1947 по 2007 год на метеостанциях Республики Беларусь. Расчетные (прогнозные) значения характеристических нагрузок находились как 0,98-квантили статистических распределений, полученных путем обработки соответствующих временных рядов с использованием аппарата порядковых статистик (точнее, статистик экстремальных значений). Анализ годовых максимумов снеговых нагрузок по разработанной методике, основанной на ранговых статистиках хвостовой части эмпирических распределений, по сравнению с применяемыми ранее методами позволил получить более обоснованные характеристические прогнозные значения. В то же время в ходе реализации методики были выявлены ее несовершенства.

Во-первых, оценки квантилей являются *точечными*. При этом уровень квантили  $p$  оценивается снизу, а сама квантиль  $S_{(R)}$  – соответственно сверху, вследствие чего прогнозируемые характеристические значения снеговой нагрузки могут оказаться несколько завышенными. Квантиль любого уровня, определяемая по ограниченной выборке, также является случайной величиной, имеющей некоторое вероятностное распределение (точное положение квантили может быть найдено лишь по гипотетической генеральной выборке). В связи с этим эффективным представляется интервальное оценивание положения квантили с привлечением аппарата порядковых статистик.

Во-вторых, применение известного метода наименьших квадратов для вычисления параметров асимптотического экстремального распределения (коэффициентов регрессии) вполне корректно лишь в случае линейной регрессии и регулярном (эквидистантном) расположении отсчетов на оси абсцисс (шкале фактора). В нашем случае значения фактора регрессионной модели вычисляются путем логарифмирования эмпирической оценки вероятности, поэтому его отсчеты не являются равноотстоящими – с увеличением значения расстояние между соседними отсчетами фактора прогрессивно возрастает. В результате большинство отсчетов группируется в области меньших вероятностей, а в области высокой (близкой к единице) вероятностной обеспеченности (наиболее важной с точки зрения прогнозирования экстремальных значений!) расположены лишь несколько отсчетов. Однако классический инструмент регрессионного анализа предусматривает вычисление (и минимизацию) сумм квадратов отклонений от регрессионной зависимости по всем эмпирическим точкам, без учета регулярности их расположения. Полагаем, что это обстоятельство может влиять на результаты аппроксимации.

Нами предложены и реализованы новые методы при разработке Национального приложения к ТКП EN 1991-1-3 [149], позволяющие устранить указанные выше несовершенства:

– непараметрический метод прогнозирования характеристических значений снеговой нагрузки с оценением положения *медианы* квантили задаваемого уровня, основанный на порядковых статистиках (интервальной оценке квантили эмпирического распределения);

– метод интегральной (на интервалах) минимизации квадратической ошибки регрессионных моделей, позволяющий повысить качество аппроксимации эмпирических распределений за счет нечувствительности к регулярности расположения отсчетов на шкале фактора.

Исходные данные по 46 метеостанциям были представлены временными рядами наблюдений запаса воды (в миллиметрах) в снеговом покрове на поверхности земли, длина которых составляла не менее 50 лет (в основном 63–69 лет). Ряды наблюдений продлены до 2013–2014 гг.

Искомое характеристическое значение определялось как положение медианы квантили уровня 0,98 в правой хвостовой части эмпирического распределения годовых максимумов снеговой нагрузки, что соответствует в среднем одному превышению характеристического значения нагрузки в течение периода повторяемости, равного 50 годам.

В таблице 3.55 приведены полученные разработанным методом результаты прогнозирования характеристических значений снеговой нагрузки для периода повторяемости 50 лет по метеостанциям, расположенным на территории Белорусского Полесья. Для сравнения в таблице 3.55 приведены также результаты прогнозирования, полученные методом точечной оценки квантилей, в том числе с исключением рекордных значений, если они имеют большой период повторяемости.

Подавляющее большинство результатов, полученных новым методом, заметно (от 0,01 до 0,1 *кПа*) ниже, чем точечные оценки сверху, полученные предыдущим методом. Для временных рядов, в которых при точечном оценивании условия позволяли удалить из рассмотрения рекордные значения (что фактически ведет к получению оценки снизу), полученные новым методом результаты находятся внутри диапазона двух точечных оценок. Это свидетельствует о корректности предложенной методики прогнозирования. Лишь на метеостанции Пружаны оценка, полученная новым методом, несколько (на величину до 0,07 *кПа*) превысила точечную оценку, что может быть связано с принципиальной приближенностью любых методов прогнозирования, а также особенностями конкретного временного ряда в правой его части.

Таблица 3.55 – **Характеристические значения снеговой нагрузки с периодом повторяемости 50 лет (0,98-квантиль вероятностного распределения годовых максимумов нагрузки) для метеостанций на территории Белорусского Полесья**

Регион, метеостанция	Точечная оценка квантили, <i>кПа</i>		Оценка медианы квантили методом доверительных интервалов с пятиточечным выравниванием, <i>кПа</i>
	без удаления рекордных значений – оценка сверху	с удалением рекордных значений с периодом повторяемости ( <i>лет</i> ) – оценка снизу	
<i>Брестская область</i>			
Ганцевичи	1,22	–	1,19
Ивацевичи	1,13	–	1,10
Пружаны	1,05	0,92 (800)	1,12
Высокое	1,61	–	1,51
Полесская	1,22	1,01 (>1000)	1,18
Пинск	1,31	1,15 (330)	1,26
Брест	1,05	–	1,00
<i>Гомельская область</i>			
Жлобин	1,28	1,20 (590)	1,25
Чечерск	1,60	–	1,56
Октябрь	1,33	–	1,27
Василевичи	1,36	–	1,31
Житковичи	1,29	–	1,34
Мозырь	1,46	–	1,38
Лельчицы	1,16	–	1,12
Брагин	1,48	–	1,43
Гомель	1,39	1,29 (360)	1,35

Важным этапом при нормировании снеговых нагрузок на конструкции зданий и сооружений является районирование характеристических значений по исследуемой территории. Поскольку при установлении границ районов определяющим является задание верхнего предела нагрузки, на практике могут иметь место следующие случаи: а) соответствие районного значения расчетному; б) пре-

вышение районного значения над расчетным; в) превышение расчетного значения над районным. Стремление ограничить число снеговых районов и одновременно исключить случаи вида (в) закономерно сопровождается появлением случаев вида (б), поэтому районные значения снеговой нагрузки для многих пунктов наблюдений оказываются несколько завышенными, что экономически не совсем оправдано.

Для оптимизации количества снеговых районов нами предполагается обеспечение ряда условий: с одной стороны, установление фонового районного значения снеговой нагрузки, с другой стороны, его корректировка в зависимости от физико-географических характеристик, например высоты (альтитуды) местности.

Установленные регрессионные зависимости снеговой нагрузки от высоты местности (альтитуды) в отдельных группах (кластерах) территориально соседствующих станций после представления к более удобному для практического использования виду сведены в таблицу 3.56. При этом некоторые группы, близкие по угловому коэффициенту регрессии и/или по фоновому (среднему) значению нагрузки, предлагается рассматривать как подрайоны более крупных объединенных районов. В таблице курсивом выделены метеостанции, принадлежность которых к районам (подрайонам) является вариативной. На основании дополнительных (климатологических, географических) соображений такие станции отнесены к конкретным районам, что выделено в таблице 3.56 подчеркиванием.

Таблица 3.56 – Зависимости характеристических значений снеговой нагрузки  $S_k$ ,  $кПа$  от альтитуды  $A$ ,  $м$  для метеостанций Республики Беларусь

Номер района	Номер подрайона	Метеостанции	Регрессионная зависимость «альтитуда-нагрузка»
1	1а	Гродно, Ошмяны, Вилейка, <i>Лида</i> , <i>Волковыск</i> , <i>Слуцк</i> , <i>Барановичи</i>	$s_k = 1,35$ (константа)
1	1б	Брест, Высокое, <i>Лида</i> , <i>Волковыск</i> ,	$s_k = 1,35 + 0,022(A - 155)$
1	1в	Гомель, Житковичи, Василевичи, Октябрь, Пинск, Жлобин, Кличев, Полесская, Лельчицы, Мозырь, Бобруйск, Славгород, Столбцы, Марына Горка, Воложин, Горки, Могилев, <i>Слуцк</i>	$s_k = 1,35 + 0,0038(A - 140)$
2	2а	Верхнедвинск, Новополоцк, Орша, Езерище, Витебск	$s_k = 1,45 + 0,006(A - 125)$
2	2б	Березино, Борисов, Сенно, Лепель, Докшицы, Щарковщина, Лынтупы	$s_k = 1,45 + 0,006(A - 150)$
2	2в	Пружаны, Ивацевичи, Ганцевичи, Минск, Воложин, Новогрудок, <i>Барановичи</i>	$s_k = 1,45 + 0,006(A - 210)$
3	–	Костюковичи, Брагин, Чечерск	$s_k = 1,55$ (константа)

Для территории Республики Беларусь, таким образом, устанавливаются 3 снеговых района с фоновыми значениями снеговой нагрузки 1,35  $кПа$ , 1,45 и 1,55  $кПа$ . Характеристическое значение снеговой нагрузки для конкретного объекта строительства определяется в большинстве случаев с учетом высотного положения площадки (местности). В районах 1 и 2 выделяются по три подрайона. Границы районов и подрайонов увязаны с физико-географическими особенностями исследуемой территории, например для территории Белорусского Полесья, как показано на рисунке 3.70.

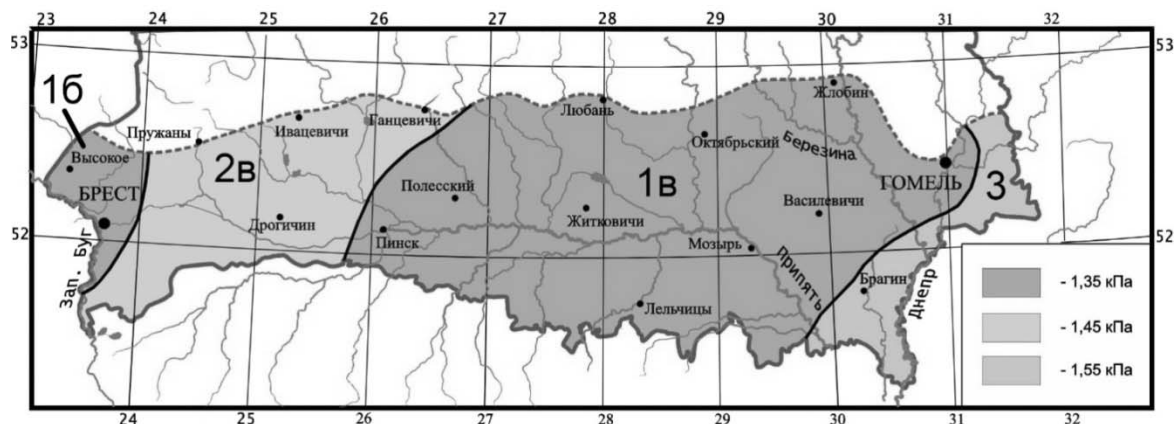


Рисунок 3.70 – Районирование территории Белорусского Полесья по характеристическим значениям снеговой нагрузки (используется совместно с закономерностями «альтитуда-нагрузка» из таблицы 3.56)

Географически районы имеют вытянутую в меридиональном направлении форму. Это достаточно хорошо согласуется с фронтальным переносом в зимний период воздушных масс с Атлантики, имеющих более высокое влагосодержание, чем воздушные массы, поступающие на исследуемую территорию с других направлений.

Район 1 (1,35 *кПа*) расположен в западной и центральной частях Республики Беларусь и занимает около 40% территории. Подрайон 1а находится в пределах Неманской низменности и Нарочано-Вилейской равнины, включает Ошмянскую возвышенность и, за исключением северо-западной его части, окружен возвышенностями: Гродненской, Волковысской и Новогрудской (практически границы подрайона увязаны с подножиями склонов названных возвышенностей). Подрайон 1б находится на территории Полесья – Прибугской равнине, имеет большую лесистость, северная его граница увязана с границей Беловежской пуши. Подрайон 1в находится в орографической «тени», восточнее района 2, и занимает большую часть Белорусского Полесья, в частности Припятское Полесье.

Район 2 (1,45 *кПа*) имеет три подрайона. Подрайон 2а расположен в пределах Полоцкой низменности, его границы увязаны с поймой р. Зап. Двина, вдоль которой перемещаются приземные массы воздуха. Юго-западной границей подрайона являются Витебская и Оршанская возвышенности, где формируются достаточно большие снеговые нагрузки. Западная и южная граница подрайона 2б огибает Минскую возвышенность и примыкает к Свенцянской гряде. Подрайону 2в соответствуют самые крупные на территории Республики Беларусь возвышенности: Минская и Новогрудская. Возвышенности и гряды являются орографическими барьерами, препятствующими проникновению снегоносных воздушных масс вглубь территории. Здесь выпадает наибольшее количество снега и соответственно формируются наибольшие снеговые нагрузки. Южная часть подрайона 2в соответствует территории Полесья, она достаточно равнинная и находится на более высоких отметках, чем подрайон 1в.

Район 3 (1,55 *кПа*) находится на юго-востоке Республики Беларусь и характеризуется высокими значениями снеговых нагрузок. Это связано с более выраженным континентальным характером климата восточной части исследуемой территории, продолжительным залеганием снегового покрова, меньшим числом фазовых переходов, приводящим к таянию снега и др. Большая часть границы района 3 проведена по р. Сож, так как левобережье ее водосбора является залесенным, что способствует снегонаколению. Следует также отметить хорошую корреляцию снеговых районов и районов синхронного выпадения атмосферных осадков в зимний период (рис. 3.33а и др.). Таким образом, границы снеговых районов в целом увязаны с крупными ландшафтными комплексами, на территории которых формируется снеговой покров.

### 3.9.2. Ветровые нагрузки

Ветром называют движение воздуха относительно земной поверхности, причем, как правило, имеется в виду горизонтальная составляющая этого движения, однако иногда говорят также о восходящем или о нисходящем ветре, учитывая и вертикальную составляющую.

Ветровая нагрузка, действующая на здания или сооружения, может быть представлена упрощенной схемой распределения давления или усилий, эффект от которых эквивалентен экстремальным воздействиям турбулентного ветра. Ветровое воздействие представляет собой давление на внешние поверхности наружного ограждения, а вследствие их проницаемости также на внутренние поверхности. В общем случае давление ветра действует по нормали к поверхности, однако в случае обтекания ветром крупных объектов следует также учитывать силы трения, действующие параллельно расчетным поверхностям.

Ветровые воздействия, рассматриваемые в ТКП EN 1991-1-4, определяются базовым значением скорости ветра  $v_b$  или соответствующим скоростным напором, т.е. характеристическим значением с годовой вероятностью превышения 0,02, что соответствует среднему периоду повторяемости 50 лет. Методики нормирования ветровых воздействий на строительные конструкции, представленные в республиканских и европейских стандартах, основаны на статистическом оценивании зафиксированных на метеорологических станциях и постах данных, включающих период аномальных колебаний метеорологических характеристик, и должны отражать их современные тренды. Происходящие климатические изменения, среди которых изменения ветрового режима, имеют существенное значение и подлежат обязательному учету в ходе нормирования климатических воздействий.

Базовое значение скорости ветра  $v_b$  является случайной величиной, обладающей значительной изменчивостью, вместе с этим данная величина сильно автокоррелирована. Однако переход на восьмисрочные наблюдения, проводимые на метеорологических станциях и постах через каждые три часа, позволяет относить рассматриваемые процессы к статистически независимым для большинства практическим задачам.

Вместе с тем базовое значение скорости ветра является функцией основного значения базовой скорости ветра  $v_{b,0}$ , численно равного средней скорости ветра на уровне 10 м над поверхностью земли для открытого типа местности с низкой растительностью (например, такой, как трава) и изолированными отдельно стоящими преградами, расстояние между которыми составляет, как минимум, 20 их высот, соответствующее 10-минутному интервалу осреднения независимо от времени года и направления ветра [148].

Так как на метеостанциях часто не в полной мере выполняются условия, позволяющие точно зафиксировать основные значения базовой скорости ветра  $v_{b,0}$ , для получения достоверной информации о ветровых климатических условиях Республики Беларусь, в том числе Белорусского Полесья, а также выполнения корректного сравнительного анализа полученных результатов на всех метеостанциях используемые в расчетах параметры необходимо приводить к однородному *микрометеорологическому* ряду. Ряд данных о скоростях ветра принято называть *микрометеорологически однородным*, если все относящиеся к нему результаты наблюдений можно рассматривать как полученные в одинаковых или эквивалентных микрометеорологических условиях. Эти условия определяются следующими факторами [215, 216]:

- высотой установки ветроприемника над поверхностью земли;
- фактической шероховатостью поверхности окружающей местности;
- временем осреднения скорости ветра;
- сроками и количеством наблюдений в сутки;
- изменением конструкции ветроизмерительных приборов.

С учетом перечисленных основных параметров однородного микрометеорологического ряда и анализа проведения наблюдений за основными характеристиками ветра на метеостанциях исследуемой территории можно сделать вывод о том, что к основным факторам, требующим корректировки, следует отнести высоту установки ветроприемника, шероховатость подстилающей местности и тип используемых ветроизмерительных приборов.

Для вероятностного описания ветрового воздействия необходимо установить закон распределения и статистические параметры базисных переменных, входящих в модель.

Методы расчета конструкций, подверженных воздействию ветровой нагрузки, базируются на стохастическом описании отдельных параметров, используемых в расчетной модели ветрового воздействия. Основной неопределенностью нередко обладают скорость и коэффициент ветрового давления или силы. Базируясь на данном утверждении, в настоящем разделе мы рассмотрели статистические параметры базовых значений скорости  $v_b$  и основного значения базовой скорости ветра  $v_{b,0}$ .

Для ветровой нагрузки достаточно точной и наиболее распространенной является вероятностная модель последовательности месячных (для определения сопутствующего воздействия в сочетаниях) и годовых (для определения доминирующего воздействия в сочетаниях) максимумов ветровой нагрузки. Данная предпосылка позволяет перейти от вероятностного (статистического) описания случайного процесса к описанию случайной величины. Для сглаживания статистического распределения месячных и годовых максимумов ветровой нагрузки наиболее часто применяют двойное экспоненциальное распределение Гумбеля.

В качестве исходных данных для определения основных значений базовой скорости ветра для климатических условий Республики Беларусь были использованы результаты систематических измерений базовых характеристик ветра на 45 метеорологических станциях за период 1966–2013 гг.

Обращает на себя внимание то, что ранжированный ряд данных имеет так называемые связи, то есть одинаковые по величине значения. Образование таких связей объясняется принятой на метеорологических станциях методикой регистрирования основных характеристик ветра с округлением к ближайшим целочисленным значениям. Однако использование их в качестве исходных данных для статистического оценивания скоростей ветра приводит к получению невысоких значений коэффициента детерминации регрессий R-квадрат, что затрудняет использование конечных результатов в инженерных целях. Таким образом, возникает необходимость решить обратную задачу восстановления наиболее вероятных значений скорости ветра до их округления. Для этого возможно использование известного в цифровой обработке сигналов метода псевдошумового квантования. Наиболее подходящим к данной задаче является вариант метода, предусматривающий добавление малой случайной составляющей (псевдошума) к округленным значениям исходных данных. Предположим, что фактические изменения скорости ветра соответствуют некоторому распределению случайных величин. Любой переход через пороговый уровень, соответствующий в нашем случае округленным целочисленным значениям скорости ветра, регистрируемым на метеостанциях, вызывает скачок от одного уровня квантования к соседнему. Но, когда к регистрируемым данным добавляется псевдошумовая

составляющая с равномерным распределением, перепады становятся минимальными. Добавление псевдошумовой составляющей ведет к определенному сближению конечного результата с той величиной, которая существовала бы при отсутствии округления фактических скоростей ветра. Таким образом, резкие скачки уровня преобразовываются в уменьшенные перепады, сопровождающиеся переходом от элемента к элементу.

Получаемые с использованием метода псевдошумового квантования значения коэффициента детерминации значительно выше, что говорит о целесообразности избранной методики оценивания максимумов средней скорости ветра.

Расчеты основных значений базовой скорости ветра по 45 метеостанциям Республики Беларусь показали незначительное снижение скоростей ветра в сравнении с периодом 1966–2008 гг. по 34 метеостанциям в диапазоне 0,1–0,4 м/с. Максимальное снижение скоростей ветра имеет место на метеостанциях Мозырь, Воложин – 0,6 м/с и Минск – 0,9 м/с. Калибровка частных коэффициентов для расчетных значений ветровой нагрузки за репрезентативный период 1966–2013 гг. дала возможность выделить на территории Республики Беларусь ветровой район с базовой скоростью ветра 21 м/с. К этому району относятся 26 метеостанций, что составляет около 60% всей территории Республики Беларусь, или около 90 % территории Белорусского Полесья (рис. 3.71). Другой выделенный ветровой район соответствует базовой скорости ветра 23 м/с. Ранее, в Национальном приложении к ТКП EN 1991-1-4-2009 [148] выделялись 2 ветровых района с базовыми скоростями ветра 22 и 24 м/с соответственно. Причем ветровой район со скоростью ветра 22 м/с занимал незначительные площади в южной (Полесье), восточной и северной частях территории Республики Беларусь. Отмечаемая ранее климатологами и подтвержденная нами тенденция к снижению скоростей ветра на территории Республики Беларусь нашла свое отражение в современной карте ветровых районов, на рисунке 3.71 приведена карта ветровых районов на территории Белорусского Полесья. Выделенные районы полностью соответствуют физико-географическим особенностям исследуемой территории (учтены орографические особенности, преобладающее направление ветра, шероховатость подстилающей поверхности, выраженная лесистостью, и другие факторы). Район с более высокой базовой скоростью ветра 23 м/с в центральной и южной частях Белорусского Полесья корреспондирует с установленными специалистами Республиканского гидрометеорологического центра районами, перспективными для развития ветроэнергетики.

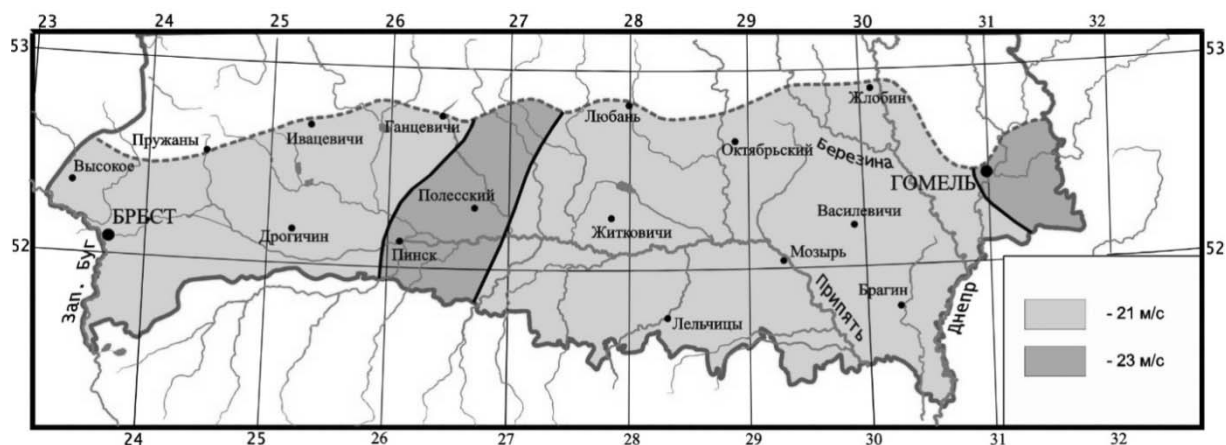


Рисунок 3.71 – Карта ветровых районов на территории Белорусского Полесья и соответствующие им основные значения базовой скорости ветра  $v_{b,0}$  (м/с)

В таблице 3.57 показаны результаты калибровки частных коэффициентов для расчетных значений ветрового воздействия при  $v_{b,0} = 21$  м/с и 23 м/с за репрезентативный период наблюдений 1966–2013 гг. для территории Белорусского Полесья.

Для апробации полученного основного значения базовой скорости ветра для территории Республики Беларусь было выполнено сравнение с аналогичным нормируемым параметром, установленным в национальных ТНПА стран, граничащих с Республикой Беларусь (рис. 3.72).

Результаты сравнения показали, что основное значение базовой скорости ветра  $v_{b,0}$ , установленное для приграничных районов Литовской и Латвийской республик и Республики Польша, а также средняя скорость ветра, заложенная в нормативном значении ветрового давления  $w_0$  приграничных районов Российской Федерации, хорошо коррелируют с полученным значением  $v_{b,0}$  для территории Республики Беларусь. Скорость ветра для характеристических значений ветрового давления  $W_0$  в приграничных районах Украины на 25–30 % превышает значения, полученные для Республики Беларусь.

Такое расхождение результатов, по всей вероятности, можно объяснить тем, что при построении карты ветрового районирования территории Украины была использована выборка базовых характеристик ветра, зарегистрированных за относительно более короткий оценочный период с 1970 по 1990 год.

Таблица 3.57 – Нормирование основных значений базовой скорости ветра и калибровка частных коэффициентов для расчетных значений ветровой нагрузки за период наблюдений с 1966 по 2013 год

Метеостанция	$v_{b,0i}$ , м/с	Вероятность превышения для $v_{b,0i}$	$q_{bi}$ , Па	Вероятность превышения для $q_{bi}$	Период повторяемости для расчетного значения нагрузки, года	$P_{Si}$	$\gamma_{fi}$
Брагин	24,8	0,967	378,0	0,975	307	0,9967	1,486
Брест	16,7	0,989	182,0	0,987	5313	0,9998	1,013
Василевичи	21,1	0,986	263,2	0,985	820	0,9988	1,270
Высокое	24,8	0,983	347,5	0,979	242	0,9959	1,507
Ганцевичи	20,1	0,972	249,9	0,973	1148	0,9991	1,213
Гомель	28,8	0,969	438,7	0,960	171	0,9942	1,543
Житковичи	22,6	0,981	238,9	0,963	4828	0,9998	1,214
Жлобин	21,8	0,961	274,4	0,970	392	0,9975	1,324
Ивацевичи	22,5	0,985	301,7	0,987	609	0,9984	1,345
Лельчицы	22,6	0,966	309,3	0,965	563	0,9982	1,370
Мозырь	24,8	0,983	333,2	0,977	1156	0,9991	1,385
Октябрь	22,5	0,986	297,3	0,989	3827	0,9997	1,228
Пинск	26,6	0,960	390,3	0,963	70	0,9858	1,628
Полесская	27,1	0,972	403,3	0,967	38	0,9738	1,707
Пружаны	23,4	0,984	324,8	0,979	470	0,9979	1,423



Условные обозначения:  
 — — — — — межгосударственная граница;  
 - - - - - граница ветровых районов;  
 (22) — основное значение базовой скорости ветра, м/с  
 (23\*) — значение средней скорости ветра, полученное по результатам пересчета из нормативного ветрового давления, м/с

Рисунок 3.72 – Карта ветрового районирования приграничных территорий Республики Беларусь

### 3.9.3. Температурные воздействия

Температурные воздействия на здания и сооружения, вызванные климатическими и эксплуатационными изменениями температуры, в настоящее время учитываются европейскими стандартами при определении расчетных параметров, если эффекты этих воздействий могут приводить к превышению условий предельных состояний несущей способности и эксплуатационной пригодности вследствие температурных перемещений и/или напряжений конструктивных элементов. Температурные воздействия на конструкции в этом случае должны быть установлены в соответствии с нормами для каждой расчетной ситуации. Суточные и сезонные изменения температуры наружного воздуха, солнечное излучение, обратное отражение приводят к изменению распределения температуры в составных элементах конструкций. Деформации и любые напряжения являются результатом изменений распределения температур в зависимости от геометрии, условий опирания, физических свойств материала конструктивных элементов.

Методики нормирования температурных воздействий на конструкции, представленные в национальных и европейских стандартах [150, 217], основаны на экспериментальных данных, вклю-



чающих период аномальных колебаний метеорологических характеристик, и должны отражать их современные тренды. Происходящие климатические изменения, среди которых вариации температур воздуха наиболее значимы, подлежат обязательному учету в ходе нормирования климатических воздействий.

В последнее десятилетие идет активная научная дискуссия, связанная с потеплением климата и его влиянием на экономику государств. Изменения температур воздуха настолько значительны, что требуется их адекватный анализ в контексте воздействия на строительные конструкции. Объектом технического нормирования выступают максимальные и минимальные температуры воздуха, а также их составляющие. На современном этапе развития прикладных исследований и инженерной практики оценка температурных воздействий на конструкции зданий и сооружений базируется на характеристических значениях температур воздуха  $T_{max}$  и  $T_{min}$  с годовой вероятностью превышения  $p = 0,02$ . Пятидесятилетний расчетный период повторяемости увязан с нормативным сроком эксплуатации зданий и сооружений.

С целью получения характеристических значений максимальных и минимальных температур воздуха  $T_{max}$  и  $T_{min}$  с годовой вероятностью превышения  $p = 0,02$  выполнен анализ временных рядов с использованием различных методических подходов и расчетных случаев.

В первом случае выполнена попытка аппроксимации (выравнивания) эмпирических кривых распределения и сопоставления их с теоретическими, при этом с использованием классических параметрических критериев согласия Пирсона и Колмогорова отвергались неверные гипотезы и принимались наиболее вероятные из числа распределений: нормального, логнормального, Гумбеля, Крицкого – Менкеля.

Во втором случае выполнялось прогнозирование характеристических температур воздуха на основе анализа хвостовой части распределений эмпирических данных. При этом принимался один из типов аппроксимации: 1) прямой линией  $s = ax + b$ , что соответствует принадлежности исследуемой функции распределению типа I (Гумбеля); 2) зависимостью вида  $s = b \exp(ax)$ , свидетельствующей о распределении типа II (Фреше); 3) зависимостью вида  $s = a \ln x + b$ , свидетельствующей о распределении типа III (Вейбулла). Определяющим при выборе типа фактором была максимизация достоверности аппроксимации (параметр  $R^2$ ), достигаемой по методу наименьших квадратов, при варьировании длины хвоста  $M$  в допустимых пределах. Длина хвоста принималась в пределах 11–20 значений.

В третьем случае осуществлялась проверка выборок на экстремальные значения, которые исключались при статистическом прогнозировании, когда имел место значительный период их повторяемости (свыше 150–200 лет).

В таблице 3.58 приведены значения прогнозных температур воздуха  $T_{max}$  и  $T_{min}$  с годовой вероятностью превышения  $p = 0,02$  (период повторяемости 50 лет) для ряда метеостанций территории Белорусского Полесья.

Таблица 3.58 – Прогнозные температуры воздуха, полученные различными способами, °C

Метеостанция	1 расч. случай		2 расч. случай		3 расч. случай	
	$T_{min}$	$T_{max}$	$T_{min}$	$T_{max}$	$T_{min}$	$T_{max}$
Брест	-30,5	36,4	-32,5	36,4	-29,8	36,4
Пинск	-31,9	35,8	-33,9	35,7	-33,9	35,7
Василевичи	-34,8	37,3	-35,6	37,3	-35,6	37,3
Гомель	-33,7	37,1	-34,6	38,1	-34,6	36,7
Мозырь	-34,7	36,6	-35,8	36,4	-35,8	36,4

Учитывая, что полученные различными способами значения прогнозных температур воздуха в отдельных случаях отличаются на величину, превышающую точность инструментальных измерений (0,5 °C), а подтвердить достоверность принятого способа аппроксимации затруднительно, для территории Беларуси выполнено картирование полученных результатов (рис. 3.73).

Косвенным обоснованием выбора способа оценки прогнозных максимальных и минимальных температур воздуха при прочих равных условиях (длина выборки, однородность рядов и др.) может служить форма изолиний. Учитывая, что между соседними метеостанциями, как правило, имеет место скоррелированность метеорологических характеристик, форма изолиний должна быть плавной, количество замкнутых контуров минимальным и определяться в этом случае физико-географическими особенностями конкретной метеостанции. Предполагается наличие автокорреляции на расстоянии, превышающем среднее расстояние между опорными точками. Перечисленным условиям в большей степени отвечают рисунки 3.73б и 3.73в. Причем изотермы максимальных температур (рис. 3.73б)

имеют широтную ориентацию, что полностью отвечает физико-географическим особенностям территории Республики Беларусь в целом и Белорусского Полесья в частности.

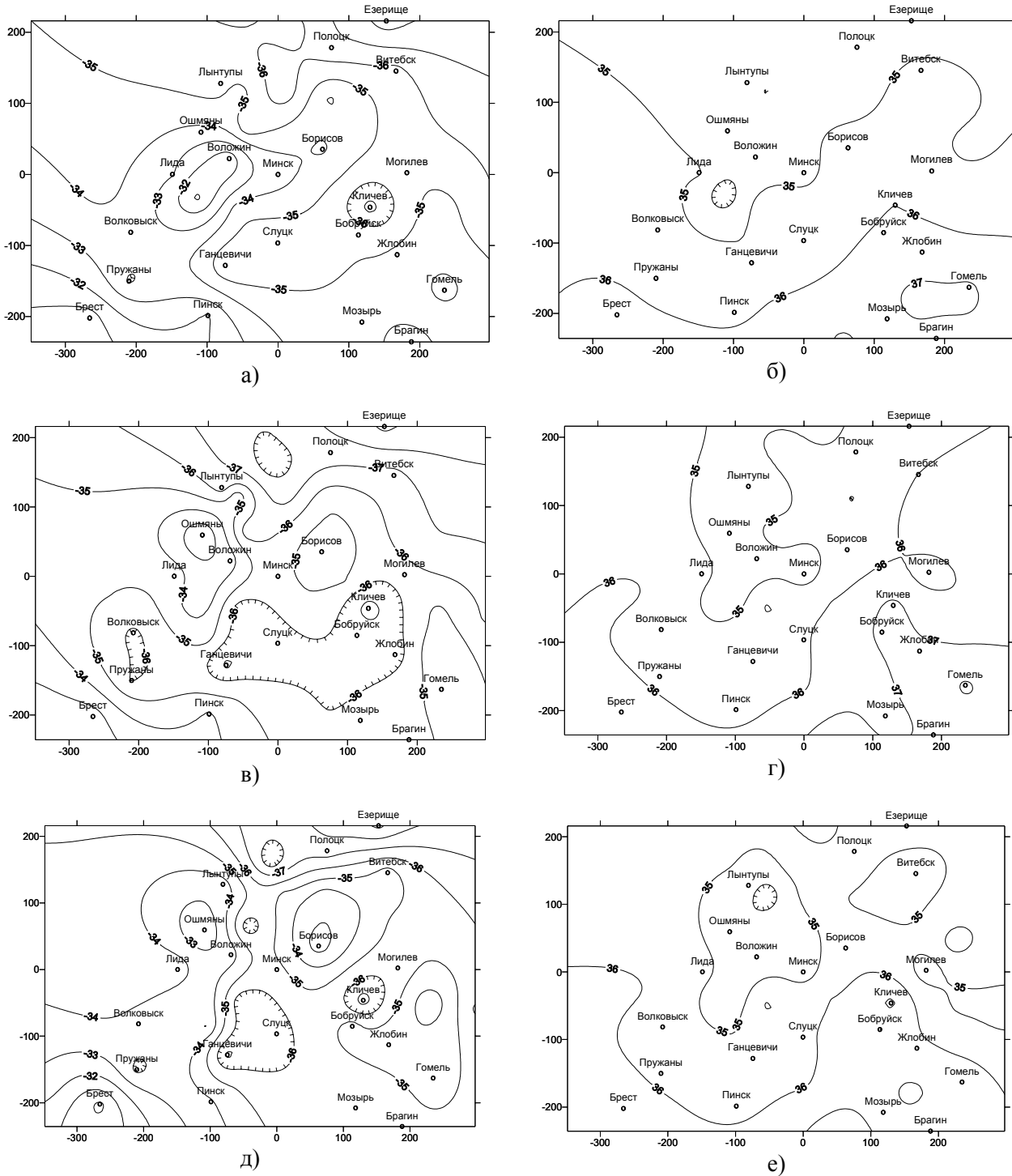


Рисунок 3.73 – Результаты картирования экстремальных температур воздуха (°C), полученных различными способами: а-б – 1 расчетный случай, в-г – 2 расчетный случай, д-е – 3 расчетный случай

На рисунках 3.74, 3.75 представлены карты характеристических значений температур воздуха на территории Белорусского Полесья, которые являются составной частью Национального приложения к ТКП EN 1991-1-5-2009 [150].

Значения температурных воздействий для переходных расчетных ситуаций ТКП EN 1991-1-5 предлагает устанавливать с использованием следующей методики [217]. Если максимальное (или минимальное) значение температуры наружного воздуха ( $T_{max,p}$ ) или ( $T_{min,p}$ ) базируется на годовой вероятности превышения ( $p$ ), отличной от 0,02, то отношение  $T_{max,p} / T_{max}$  и  $T_{min,p} / T_{min}$  может быть определено из рисунка 3.76.

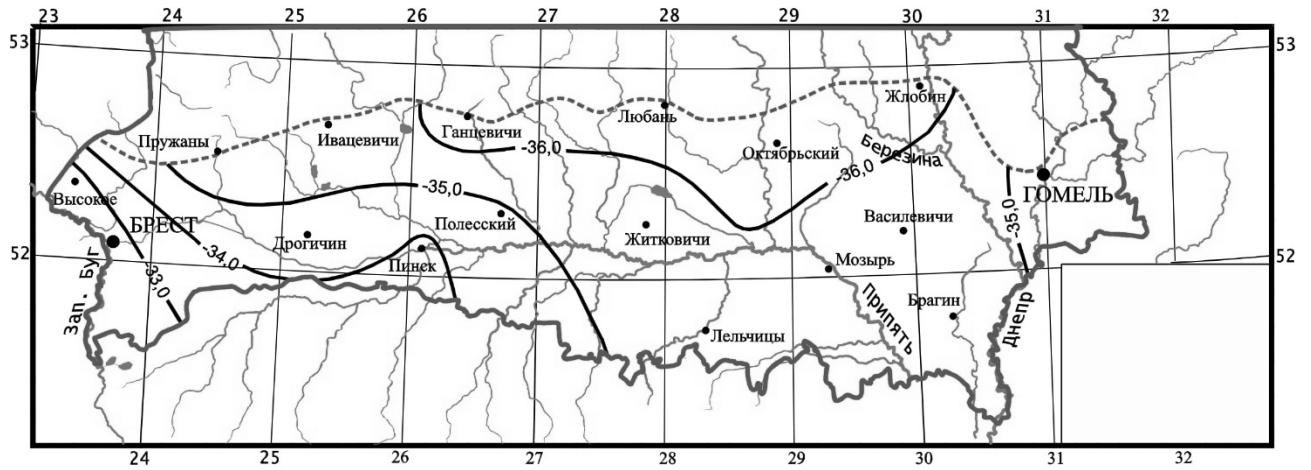


Рисунок 3.74 – Минимальная температура наружного воздуха на территории Белорусского Полесья, °С, с годовой вероятностью превышения 0,02

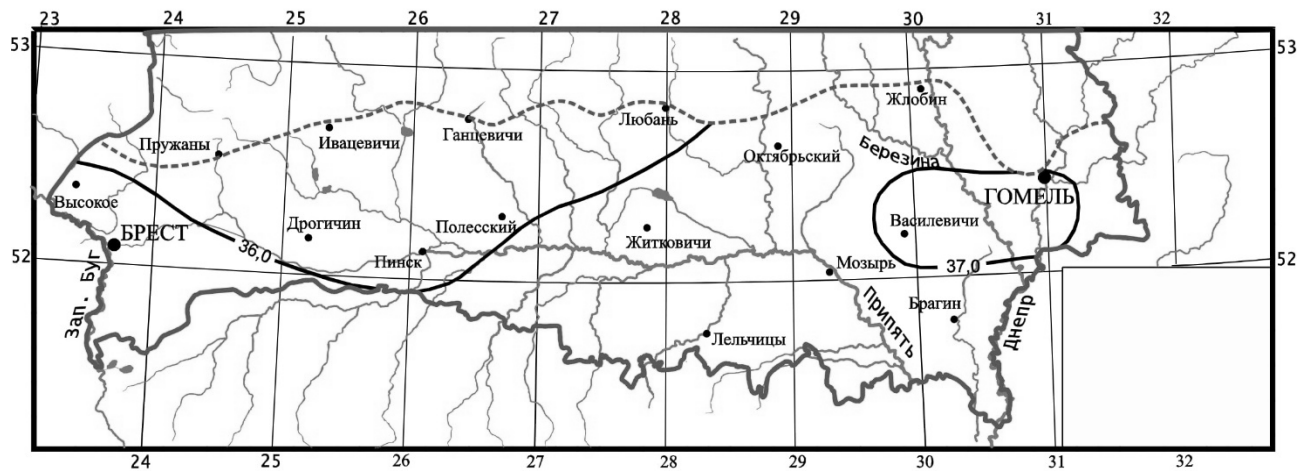


Рисунок 3.75 – Максимальная температура наружного воздуха на территории Белорусского Полесья, °С, с годовой вероятностью превышения 0,02

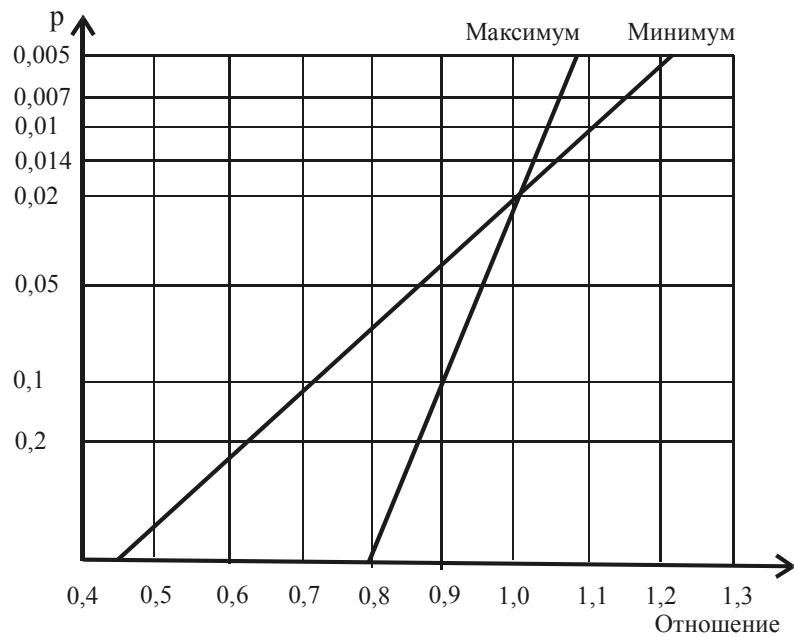


Рисунок 3.76 – Отношения  $T_{max,p} / T_{max}$  и  $T_{min,p} / T_{min}$

В общем случае ( $T_{max,p}$ ) или ( $T_{min,p}$ ) может быть получено из формул, основанных на распределении экстремальных значений температур:

$$\text{для } T_{max,p} = T_{max} \{k_1 - k_2 \ln [-\ln (1-p)]\}, \quad (3.52)$$

$$\text{для } T_{min,p} = T_{min} \{k_3 + k_4 \ln [-\ln (1-p)]\}, \quad (3.53)$$

где  $T_{max}(T_{min})$  – значение максимальной (минимальной) температуры наружного воздуха с годовой вероятностью превышения 0,02;

$$k_1 = (u, c) / \{(u, c) + 3,902\}; \quad (3.54)$$

$$k_2 = 1/\{(u, c) + 3,902\}; \quad (3.55)$$

$$k_3 = (u,c) / \{(u,c) - 3,902\}; \quad (3.56)$$

$$k_4 = 1/\{(u,c) - 3,902\}, \quad (3.57)$$

где  $u, c$  – параметры вида и функции распределения годовых максимумов температуры наружного воздуха, зависящие от среднего значения ( $m$ ) и стандартного отклонения ( $\sigma$ ) выборки экстремальных значений:

$$\text{для максимума: } (u = m - 0,57722 / c \text{ и } c = 1,2825 / \sigma), \quad (3.58)$$

$$\text{для минимума: } (u = m + 0,57722 / c \text{ и } c = 1,2825 / \sigma). \quad (3.59)$$

При отсутствии информации о параметрах ( $u$ ) и ( $c$ ) ТКП EN 1991-1-5 [217] рекомендует применять следующие значения:  $k_1 = 0,781$ ;  $k_2 = 0,056$ ;  $k_3 = 0,393$ ;  $k_4 = -0,156$ .

Выполненные нами исследования для территории Беларуси позволили получить для годовых максимумов следующие значения соответствующих параметров:

$$m = 31,1; \quad \sigma = 2,07; \quad u = 30,1683; \quad c = 0,6196; \quad k_1 = 0,827; \quad k_2 = 0,044.$$

Подобно годовым максимумам исследованы параметры годовых минимумов температур воздуха и получены следующие значения соответствующих параметров:

$$m = -25,3; \quad \sigma = 4,90; \quad u = -23,0946; \quad c = 0,2617; \quad k_3 = 0,608; \quad k_4 = -0,101.$$

Пространственная изменчивость коэффициентов ( $k_3$ ) и ( $k_4$ ) в пределах исследуемой территории несколько больше коэффициентов ( $k_1$ ) и ( $k_2$ ), однако конечные результаты определения ( $T_{min,p}$ ) по коэффициентам ( $k_3$ ) и ( $k_4$ ) для конкретных пунктов не дают существенных расхождений между температурами ( $T_{min,p}$ ), полученными по осредненным для исследуемой территории значениям ( $k_3$ ) и ( $k_4$ ).

### 3.10. Методика прогнозирования климата

Для прогнозов изменения климата должны использоваться как глобальные, так и региональные климатические модели, которые основаны на описании процессов в динамике и базируются на численном решении систем уравнений в частных производных математической физики. Кроме того, необходимость использования климатических моделей для прогноза метеорологических показателей вместо статистических методов обработки метеорологических данных обусловлена многообразием и природных, и антропогенных факторов – как в целом на планете, так и в регионе, которые оказывают и потенциально могут оказывать влияние на изменение климата [191].

Именно поэтому путь прогнозирования, основанный на использовании глобальных и региональных климатических моделей, является более корректным, чем просто использование статистических методов для определения регрессионных зависимостей, например, «температура – осадки» за предыдущий период с учетом репрезентативности этого периода и экстраполяции полученных статистических зависимостей для определения искомых величин на будущий период. Вместе с тем для выполнения первичного анализа и обобщения исходной информации, определения тенденций изменения климата за предыдущий период необходимо использовать (и чаще всего используются) статистические методы.

Глобальные климатические модели охватывают весь Земной шар, имеют большой размер сетки. Для общей оценки изменения климата вначале должна быть использована именно глобальная модель с учетом мировых сценариев развития человечества и соответственно выброса парниковых газов, с учетом метеорологических данных, имеющихся во Всемирной метеорологической организации (ВМО), включая исследуемый регион прогнозирования.

Результаты моделирования с помощью глобальной модели служат граничными и начальными условиями для региональной климатической модели, которая уточняет глобальный прогноз с использованием более мелкой сетки (до 20 x 20 км), детальных климатических данных по расположенным метеорологическим станциям в исследуемом регионе.

#### 3.10.1. Глобальные климатические модели

LEAP (Longrange Energy Alternatives Planning System) – широко используемый программный инструмент для анализа энергетической политики и оценки смягчения последствий изменения климата, разработанный в Стокгольмском институте окружающей среды. LEAP был принят сотнями ор-