



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Исследование уровня шумового загрязнения в городской среде»

Исполнитель Созинов Егор Денисович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Симакина Татьяна Евгеньевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна

(фамилия, имя, отчество)

« 25 » мая 2026 года

Санкт-Петербург

2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Глава 1. Постановка задачи и состояние области	12
1.1 Транспортный шум как фактор городской среды	12
1.2 Нормативная база Российской Федерации и формулировка пробела	13
1.3 Метеорологические факторы в действующей расчетной практике	15
1.4 Международный опыт и содержательная рамка настоящего исследования	17
1.5 Выводы по главе 1	20
Глава 2. Физические основы распространения звука в атмосфере	22
2.1 Звуковая волна и среда её распространения	22
2.2 Атмосферное поглощение	22
2.3 Рефракция в стратифицированной атмосфере	25
2.4 Турбулентность и метеорологические ограничения измерений	28
2.5 Классификация состояний приземного слоя для задач акустики	29
2.6 Метеорологические условия как фактор распространения: классификация ISO 9613–2	32
2.7 Выводы по главе 2	33
Глава 3. Стратегия и методология исследования	35
3.1 Стратегия исследования и обоснование методологического выбора	35
3.2 Базовая расчётная модель ГОСТ 31295.2-2005	38
3.3 Метеорологическое расширение базовой модели	39
3.4 Источник метеорологических данных	41
3.5 Алгоритм построения климатологической справочной таблицы	45
3.6 Методологическое позиционирование	49
3.7 Выводы по главе 3	52
Глава 4. Программная реализация и результаты	53
4.1 Архитектура программной системы	53
4.2 Этап 1: загрузка и подготовка данных ERA5	54
4.3 Этап 2: классификация устойчивости пограничного слоя	57
4.4 Этап 3: посекторный признак благоприятности	61
4.5 Тестовый расчёт для участка автомагистрали КАД км 105	65
4.6 Этап 4: климатологическая агрегация	71
4.7 Валидация термического компонента по данным радиозондирования	

Воейково	78
4.8 Валидация ветровой компоненты по данным станции 26063	82
4.9 Сопоставление с методологией CNOSSOS-EU и зарубежными реализациями	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	91
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	100

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Транспортный шум на современном этапе урбанизации представляет собой ведущий по охвату населения акустический фактор экологической нагрузки в крупных городах. В *Environmental Noise Guidelines for the European Region* Регионального бюро Всемирной организации здравоохранения для Европы установлены сильные рекомендации по среднему дневно-вечерне-ночному уровню звука $L_{den} < 53$ дБ и ночному уровню $L_{night} < 45$ дБ для автомобильного шума с высоким уровнем доказательности в отношении риска ишемической болезни сердца, хронического раздражения и нарушений сна [1]. По оценкам Европейского агентства по окружающей среде, в государствах Европейского союза транспортный шум ежегодно обуславливает около 73 тыс. преждевременных смертей и около 49 тыс. новых случаев сердечно-сосудистых заболеваний [2]. В Российской Федерации, по данным [3], в крупных городах автомобильный транспорт остается доминирующим источником сверхнормативного шума на территории жилой застройки; доля населения крупных агломераций, проживающего в зонах акустического дискомфорта, по обобщенным оценкам составляет 20–40 %. Прогрессирующее увеличение транспортной нагрузки и реализуемые в Санкт-Петербурге программы развития улично-дорожной сети повышают практическую значимость научно обоснованного расчетного подхода к проектированию шумозащитных мероприятий на селитебной территории.

Состояние нормативной базы и научно-методический пробел

Расчет уровня транспортного шума на селитебной территории и проектирование шумозащитных мероприятий в Российской Федерации регламентированы трехуровневой иерархией документов: методический уровень

указывает, как считать (ГОСТ 31295.1-2005[4], ГОСТ 20444-2014[5]); проектный — где и в каком объеме применять методики ([6]); санитарно-гигиенический — с чем сравнивать результат ([7], СН 2.2.4/2.1.8.562-96). Несущей расчетной основой служит ГОСТ 31295.2-2005, в котором метеорологическая поправка C_{met} к долговременному эквивалентному уровню звука определяется через коэффициент C_0 , отражающий «местные метеорологические условия по скорости и направлению ветра и по температурному градиенту». Примечание 1 к формуле (22) ГОСТ прямо устанавливает требование оценки C_0 «путём анализа местных метеорологических статистических данных» и фиксирует, что на практике значения C_0 варьируют от 0 до +5 дБА.

Ни один действующий нормативный документ Российской Федерации в области расчёта транспортного шума не предоставляет ни методики получения местной метеорологической климатологии, пригодной для определения C_0 , ни численных значений C_0 для климатических регионов РФ, ни процедуры обновления этих значений. Состояние нормативной базы непосредственно отражается в типовой проектной практике: характерным примером служит методическое пособие [8], применяемое в учебной и проектной работе, в котором метеорологическая поправка C_{met} принята равной нулю — решение методологически вынужденное, прямо следующее из отсутствия региональных значений C_0 . Пересмотренная редакция международного стандарта [9] включает в Приложение С пример определения C_0 из локальной ветровой климатологии, концептуально совпадающий с направлением настоящей работы; в Российской Федерации соответствующая редакция в качестве национального стандарта не транслирована.

В международной инженерно-акустической практике аналогичная задача решена и нормативно внедрена. Гармонизированная методология CNOSSOS-EU [10], обязательная для государств — членов Европейского союза с 31 декабря

2018 г. согласно [11], рассчитывает посекторную вероятность благоприятных условий распространения p_F по 18 секторам ширины 20° ; альтернативная скандинавская методология Nord2000 [12] использует девятиклассовую категоризацию метеорологических условий. Опубликованные национальные реализации (Финляндия, Ирландия — [13], Германия, Польша, Дания, Швеция, Норвегия) обеспечивают численные региональные значения, используемые в проектной практике. Систематический поиск в основных профильных отечественных журналах и базах за 2020–2025 гг. публикаций, представляющих региональную климатологию коэффициента C_0 для какого-либо региона Российской Федерации, не выявил. Восполнение этого нормативно-методического пробела применительно к Северо-Западному региону Российской Федерации составляет научно-методическое содержание настоящей работы.

Цель работы

Цель настоящей работы — разработка и эмпирическая верификация методики расчета метеорологической поправки C_{met} формулы (22) ГОСТ 31295.2-2005 на основе региональной посекторной климатологии вероятности благоприятных условий распространения звука для региона Санкт-Петербурга, реализованной на материале глобального атмосферного реанализа ERA5 [14] и методологически совместимой с международной рамкой CNOSSOS-EU.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены пять конкретных задач:

1) Систематизировать нормативную базу Российской Федерации в области расчёта затухания транспортного шума на местности, идентифицировать положение метеорологической поправки C_{met} в расчётном аппарате

и формализовать научно-методический пробел в части определения коэффициента C_0 для регионов РФ.

2) Описать физические механизмы влияния метеорологических условий на распространение звука в приземном слое атмосферы и обосновать выбор классификаторов устойчивости пограничного слоя, пригодных для региональной климатологии.

3) Разработать методику расчёта посекторной климатологической вероятности благоприятных условий распространения $p_{\text{благ}}(\sigma, s, \tau)$ на материале реанализа ERA5, методологически совместимую с действующим ГОСТ 31295.2 и международной рамкой CNOSSOS-EU.

4) Реализовать разработанную методику в виде воспроизводимой программной системы и климатологической справочной таблицы для домена Санкт-Петербурга.

5) Выполнить тестовый расчет акустического воздействия для участка автомагистрали Санкт-Петербурга с применением полученной климатологии и провести двухканальную станционную валидацию термического и ветрового компонентов климатологии.

Объект и предмет исследования

Объект исследования — процесс распространения транспортного шума в приземном слое атмосферы городской среды Санкт-Петербурга и Северо-Западного региона Российской Федерации.

Предмет исследования — функциональная зависимость долговременного эквивалентного уровня звука $L_{\text{АЭКВ}}$ в точке приёма от региональной климатологии метеорологических условий распространения, формализованная через

посекторную вероятность благоприятных условий $p_{\text{благ}}(\sigma, s, \tau)$ и реализующая нормативное требование Примечания 1 к формуле (22) ГОСТ 31295.2-2005.

Методы исследования

Методологическую основу работы составляют: математическое моделирование распространения звука на нормативной основе ГОСТ 31295.2-2005 / [5] с двухсценарным расширением в архитектуре CNOSSOS-EU; статистический анализ многолетних временных рядов глобального атмосферного реанализа ERA5 с применением трех параллельных классификаторов устойчивости пограничного слоя — объемного числа Ричардсона Ri_b , обратной длины Мони́на–Обухова $1/L$ и категоризации Пасквилла–Гиффорда в варианте Тёрнера; двухканальная стационарная валидация результатов климатологии — термического компонента по аэрологическим зондированиям на пункте Воейково (Главная геофизическая обсерватория) и ветрового компонента по приземным синоптическим наблюдениям станции WMO 26063 (центральный городской синоптический пост Санкт-Петербурга); геопространственный анализ и расчет буферных зон акустического воздействия на тестовом участке автомагистрали; программная реализация — на Python (научный пайплайн, библиотеки `cdsapi`, `xarray`, `numpy`).

Научная новизна

Научная новизна работы определяется следующими положениями:

1) Впервые для региона Российской Федерации построена посекторная климатология вероятности благоприятных условий распространения звука, рассчитанная на нормативно совместимой методологической основе и пригодная для прямой подстановки в коэффициент C_0 формулы (22) ГОСТ 31295.2-2005.

2) Реализовано методологическое согласование с международной рамкой CNOSSOS-EU [10, 11] при использовании глобального атмосферного реанализа в качестве первичного субстрата данных вместо национальной сети метеорологических станций; такое решение, обоснованное недостаточной плотностью наземной сети Росгидромета в Северо-Западном регионе и эмпирически верифицированное двухканальной станционной валидацией, прямо переносится на любой регион РФ без изменения программной системы.

3) Выполнена количественная декомпозиция благоприятности на ветровой и термический механизмы с отдельным определением вкладов компонентов; в климатологии Санкт-Петербурга соотношение термического и ветрового вкладов составляет приблизительно 2 : 1, а сезонно-суточный контраст термической компоненты достигает $4,08\times$.

4) Применена триангуляция трёх независимых классификаторов устойчивости приземного слоя (Ri_b , $1/L$, Паскуилл–Тёрнер) с явной фиксацией статистики расхождения как самостоятельного отчетного результата [15] и переходом на фиксированную высотную опору 10–100 м над поверхностью через переменные u_{100}, v_{100} ERA5; устранена подповерхностная экстраполяция изобарической пары «2 м — 1000 гПа», имеющая место в 27,49 % часов климатологии СПб.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость состоит в формализации региональной климатологии благоприятных условий распространения звука как двухсценарной надстройки над существующей расчетной схемой ГОСТ 31295.2-2005, в количественном описании двухкомпонентной (термическая + ветровая) структуры благоприятности для континентального региона на 60° с.ш. и в эмпирической верификации методологии в обоих физических каналах.

Установлены количественные различия континентальной (Санкт-Петербург) и приморской (Дублин — [13]) региональных климатологий распространения, проявляющиеся в виде +18,6 п.п. ночного разрыва p_F при близких дневных значениях.

Практическая значимость определяется получением операционного артефакта — климатологической справочной таблицы `p_favorable_spb.nc` ($35 \times 18 \times 4 \times 3 = 7\,560$ посекторных значений на канал, формат NetCDF-4 / CF-1.10), пригодной для непосредственного использования в проектной расчетной цепочке при подготовке проектной документации защиты от шума по [6], разработке шумовых карт по требованиям [7] и Директивы [16], оценке селитебной территории, требующей шумозащитных мероприятий. Программный комплекс `noise-meteo-spb` и сопутствующее интерактивное веб-приложение применимы как обучающий и проектный инструмент. Методика, отделенная от регионального применения, переносится на другие регионы Российской Федерации простой подменой пространственного домена при сохранении пайплайна.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Глава 1 устанавливает нормативный и литературный контекст, систематизирует трехуровневую иерархию документов Российской Федерации в области расчёта транспортного шума и формализует научно-методический пробел в сопоставлении с международной практикой; этим прямо отвечает на Задачу 1. Глава 2 даёт физический фундамент работы: рассматривает механизмы влияния метеорологических условий на распространение звука через атмосферное поглощение и рефракцию в стратифицированной атмосфере, разлагает градиент эффективной скорости звука на термический и ветровой компоненты и анализирует классификаторы

устойчивости приземного слоя в их применимости к городской прибрежной среде; этим отвечает на Задачу 2. Глава 3 разрабатывает методику расчёта C_{met} через региональную посекторную климатологию благоприятных условий в формализации трёх методологических обязательств — архитектурной надстройки над ГОСТ 31295.2, использования ERA5 в роли первичного субстрата данных и триангуляции трёх классификаторов устойчивости; этим отвечает на Задачу 3. Глава 4 представляет программную реализацию пайплайна, эмпирические результаты расчёта посекторной климатологии для домена Санкт-Петербурга за 2014–2024 гг., тестовый расчёт на участке автомагистрали (КАД, км 105) и двухканальную станционную валидацию; этим отвечает на Задачи 4 и 5. Заключение формулирует прямые ответы на пять задач Введения, сводку ключевых количественных результатов, научную новизну, практическое значение, ограничения и направления дальнейших исследований.

Объём основного текста — 19 страниц, включая 14 рисунков и 28 таблиц. Список использованных источников содержит 39 наименований.

Глава 1. Постановка задачи и состояние области

1.1 Транспортный шум как фактор городской среды

Транспортный шум на современном этапе урбанизации представляет собой ведущий по охвату населения акустический фактор экологической нагрузки. В *Environmental Noise Guidelines for the European Region* Регионального бюро ВОЗ для Европы установлены сильные рекомендации по среднему дневно-вечерно-ночному уровню $L_{den} < 53$ дБ и ночному уровню $L_{night} < 45$ дБ для автомобильного шума с высоким уровнем доказательности в отношении риска ишемической болезни сердца, хронического раздражения и нарушений сна [1]. По оценкам Европейского агентства по окружающей среде, в государствах Европейского союза транспортный шум ежегодно обуславливает около 73 тыс. преждевременных смертей и около 49 тыс. новых случаев сердечно-сосудистых заболеваний [2].

В Российской Федерации, по данным [3], в крупных городах автомобильный транспорт остается доминирующим источником сверхнормативного шума на территории жилой застройки; доля населения крупных агломераций, проживающего в зонах акустического дискомфорта, по обобщенным оценкам составляет 20–40 %. Действующая система гигиенического нормирования регламентирует эквивалентный $L_{A_{экв}}$ и максимальный $L_{A_{макс}}$ уровни звука отдельно по дневному (07:00–23:00) и ночному (23:00–07:00) интервалам [7]; основные предельно допустимые значения приведены в таблице 1.1. Дифференциал «день–ночь» в 10 дБА имеет двойное обоснование: медицинское — циркадная чувствительность к нарушениям сна; метеорологическое — регулярное формирование в ночные часы устойчивой стратификации приземного слоя атмосферы, при которой условия распространения звука благоприятны и реальный уровень в точке приёма приращен по сравнению с дневными условиями.

Таблица 1.1. Предельно допустимые уровни шума по СанПиН 1.2.3685-21
(выдержка из табл. 5.35)

Таблица 1.1

Объект	Время суток	$L_{Aэкв}$, дБА	$L_{Aмакс}$, дБА
Жилые помещения	07–23 / 23–07	40 / 30	55 / 45
Территория, прилегающая к жилым домам	07–23 / 23–07	55 / 45	70 / 60
Территории больниц и санаториев	07–23 / 23–07	45 / 35	60 / 50

1.2 Нормативная база Российской Федерации и формулировка пробела

Расчет уровня транспортного шума на селитебной территории и проектирование шумозащитных мероприятий в Российской Федерации регламентированы трехуровневой иерархией документов: методический уровень указывает, *как считать*; санитарно-гигиенический — *с чем сравнивать* результат; проектный — *где и в каком объеме* применять методики при подготовке проектной документации. Состав иерархии приведён в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Трехуровневая иерархия нормативной базы Российской Федерации в области расчёта транспортного шума

Таблица 1.2

Уровень	Тип документа	Функция	Ключевые документы
1. Методический	ГОСТ, ГОСТ Р	расчётные формулы, физические модели, требования к ПО	ГОСТ 31295.1-2005, ГОСТ 31295.2-2005, ГОСТ 20444-2014, ГОСТ Р 56234.1-2019, ГОСТ Р 53187–2008
2. Проектный	СП	правила проектирования объектов и систем защиты от шума	СП 276.1325800.2016

3. Санитарно-гигиенический	СН, СанПиН	предельно допустимые уровни шума на территориях	СанПиН 1.2.3685-21
----------------------------	------------	---	--------------------

Несущей расчетной основой методического уровня служит ГОСТ 31295.2-2005 [4], представляющий собой модифицированное переложение ИСО 9613-2:1996 и образующий ключевую методическую основу настоящей работы. Для типичной геометрии «источник–приёмник», удовлетворяющей условию $d_p > 10 (h_s + h_r)$, метеорологическая поправка к долговременному эквивалентному уровню звука задается формулой (22) ГОСТ:

$$C_{met} = C_0 \cdot \left(1 - \frac{h_s + h_r}{d_p}\right); \quad C_{met} = 0 \quad \text{при} \quad d_p \leq 10 (h_s + h_r),$$

где C_0 — поправка на местные метеорологические условия по скорости и направлению ветра и по температурному градиенту, дБА. Коэффициент C_0 является единственной точкой входа метеорологической климатологии в расчетную методику и непосредственно определяет расчетный долговременный уровень в приемнике. Содержательное определение значения C_0 задается Примечанием 1 к формуле (22):

«Значение C_0 в формуле (22) может быть оценено путем анализа местных метеорологических статистических данных. <...> На практике значения C_0 варьируют от 0 до +5 дБА.»

Примечание 1 имеет принципиальное значение для всей последующей аргументации настоящей работы. Документ методического уровня *прямо* перепоручает оценку C_0 местным метеорологическим статистическим данным — то есть статистике, а не отдельной метеосводке — и оставляет вопрос источника этих данных, методики их обработки и формы представления результата открытым. Это требование носит характер нормативного предписания, а не методической рекомендации, и применяется ко всем проектным расчетам, выполняемым в соответствии с ГОСТ 31295.2 и опирающимся на него [6].

Ни один действующий нормативный документ Российской Федерации в области расчёта транспортного шума — ни стандарты серии ГОСТ 31295, ни источник ГОСТ 20444-2014, задающий шумовую характеристику транспортного потока, ни своды правил СП 276 и СП 51, ни санитарно-гигиенические нормативы СанПиН 1.2.3685-21, ни национальные стандарты ГОСТ Р 56234.1-2019 (требования к расчётному ПО) и ГОСТ Р 53187–2008 (шумовой мониторинг городских территорий) — не предоставляет ни методики получения местной метеорологической климатологии, пригодной для определения C_0 в смысле формулы (22), ни численных значений C_0 для климатических регионов Российской Федерации, ни процедуры обновления этих значений. *Восполнение этого нормативно-методического пробела применительно к Северо-Западному региону Российской Федерации составляет научно-методическое содержание настоящей работы.* Пересмотренная редакция международного стандарта [9] включает в Приложение С пример определения C_0 из локальной ветровой климатологии, что концептуально совпадает с направлением настоящей работы; в РФ соответствующая редакция в качестве национального стандарта не транслирована.

1.3 Метеорологические факторы в действующей расчетной практике

По степени включенности в расчётный аппарат — то есть по тому, насколько фактор входит в нормативные формулы как явная количественная зависимость — все рассмотренные в подразделе 1.2 метеорологические переменные распределяются по трём категориям, сведенным в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Метеорологические факторы в нормативной системе Российской Федерации в области расчёта транспортного шума по статусу операционализации

Таблица 1.3

Категория	Фактор	Где учтён	Источник
(а) В расчётны х формулах	Температура T , относительная влажность RH , давление p	$\alpha(f, T, RH, p)$ — атмосферное поглощение	ГОСТ 31295.1- 2005
(а) В расчётны х формулах	Скорость и направление ветра, вертикальный градиент температуры (интегрально через C_0)	формула (22), C_{met}	ГОСТ 31295.2- 2005
(б) Декларатив но	Турбулентность, осадки, общая облачность, городской пограничный слой	ограничения применимости; явных формул нет	ГОСТ 31295.2, ГОСТ 20444
(в) Не учитываютс я	Региональная климатология ветра и стратификации; направленная анизотропия; суточный цикл; сезонная изменчивость	—	пробел

Внутри категории (а) принципиально различен статус доступности значений: для T , RH , p они задаются стандартными метеорологическими сводками и табулированы в нормативном документе для типовых условий; для скорости и направления ветра и температурного градиента они задаются климатологически и в нормативном документе не определены. Этот разрыв по разрешению — содержательная форма пробела, сформулированного в подразделе 1.2.

Состояние нормативной базы непосредственно отражается в типовой проектной практике. Характерным примером служит методическое пособие [8] кафедры проектирования автомобильных дорог и аэродромов НИУ МГСУ, применяемое в учебной и проектной работе: в расчетной формуле, служащей основой для проведения практических работ, метеорологическая поправка C_{met} принята равной нулю, а коэффициент атмосферного поглощения заменён

фиксированным значением, не зависящим от T и RH . Такое решение методологически вынужденное — оно прямо следует из отсутствия региональных значений C_0 . Прямым следствием является то, что расчётные результаты не различают регионы Российской Федерации по климатологии распространения звука: для трёх городов с принципиально разным климатом — Санкт-Петербурга, Краснодара и Якутска — расчёт даёт численно идентичные оценки уровня звука при одинаковых транспортных и геометрических параметрах. Это противоречит физическим оценкам разности «неблагоприятные–благоприятные условия», которая на расстоянии 200–500 м от приземного источника достигает 5–20 дБА [17].

Систематический поиск в отечественной научной литературе за период 2020–2025 гг. — по основным профильным журналам («Метеорология и гидрология», «Акустический журнал», «Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана», «Гигиена и санитария», «Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета», «Известия высших учебных заведений. Строительство»), а также по базам eLibrary.ru, КиберЛенинка и репозиториям РГГМУ, МАДИ, НИИСФ РААСН — не выявил публикаций, представляющих региональную климатологию коэффициента C_0 или сопоставимой величины для какого-либо региона Российской Федерации. Требование Примечания 1 к формуле (22) ГОСТ 31295.2 не подкреплено научно-методической работой в современной отечественной литературе.

1.4 Международный опыт и содержательная рамка настоящего исследования

В международной инженерно-акустической практике за последние два десятилетия сформировался самостоятельный методологический пласт, посвящённый переходу от единичного метеорологического сценария [5]

к статистически взвешенному долговременному уровню звука. Сравнительная характеристика сложившихся методов приведена в таблице 1.4.

Таблица 1.4. Сравнительная характеристика рамочных методов расчёта затухания звука при распространении на местности

Таблица 1.4

Метод	Метеорологическое разрешение	Источник метеоданных	Регулятивный статус
ИСО 9613-2:1996 / ГОСТ 31295.2	C_{met} — интегральная скалярная поправка	«местная статистика» (метод не задан)	в РФ — действует; ИСО — отменён в 2024 г.
CNOSSOS-EU (2012)	F + H, посекторная вероятность p_F (18 секторов по 20°)	национальная калибровка	в ЕС — обязателен с 31.12.2018
Nord2000 (2006)	9 погодных классов	национальная сеть станций	в Дании, Швеции, Норвегии — обязателен
Harmonoise (2011)	непрерывный профиль $c_{eff}(z)$	аналитические профили	исследовательский

Принципиальный для настоящего исследования момент: разрыв между ИСО 9613-2:1996 / ГОСТ 31295.2 и тремя остальными методами есть разрыв *по разрешению* метеорологического входа. Содержательно настоящая работа решает задачу повышения метеорологического разрешения нормативной российской методики до уровня CNOSSOS-EU — с сохранением совместимости с действующей формулой (22) ГОСТ 31295.2 как механизмом передачи результата в проектную расчетную цепочку. Накопленный в Европе опыт практической реализации перехода представлен в таблице 1.5.

Таблица 1.5. Национальные реализации CNOSSOS-EU и Nord2000

Таблица 1.5

Страна	Метод	Источник метеорологических данных	Регулирующий документ
Финляндия	CNOSSOS-EU (Nord2000 параллельно)	сеть станций FMI	Maijala & Kontkanen; Eurasto, 2006
Ирландия	CNOSSOS-EU:2020	Met Éireann, 8 регионов	TII RE-ENV-07007 (10/2022)
Германия	CNOSSOS-EU (с 31.12.2018)	DWD	UBA / RLS-19
Польша	CNOSSOS-EU	IMGW	GDDKiA / AGH Kraków
Дания	Nord2000 (официально с 07/2007)	DMI	Statutory Order no. 647/2007
Швеция	Nord2000	SMHI	Naturvårdsverket
Норвегия	Nord2000	Met.no	Vegdirektoratet
Российская Федерация	ГОСТ 31295.2 / C_0 из «местной статистики» (методика не задана)	—	методический пробел

Наиболее детально документированной национальной реализацией с открыто опубликованными числовыми результатами является отчёт Transport Infrastructure Ireland и Met Éireann [13], рассчитавший секторные значения $\%P_f$ для секторов шириной 20° по восьми прогностическим регионам Ирландии; этот отчет служит основным внешним ориентиром при сопоставлении результатов настоящей работы. Прямого аналога для какого-либо региона Российской Федерации в открытой литературе не выявлено.

Сопоставление с международной практикой позволяет сформулировать содержательную рамку настоящей работы в виде системы трех явных методологических обязательств. *Обязательство 1: архитектурная надстройка над ГОСТ 31295.2-2005, а не его замена.* Климатология коэффициента C_0 встраивается непосредственно в формулу (22); сама форма формулы, её область

применимости и интерфейс к проектной расчетной цепочке СП 276 сохраняются. Расширение разрешения до уровня двух сценарной архитектуры CNOSSOS-EU реализуется *поверх* действующего ГОСТ как численная процедура получения C_0 . *Обязательство 2: реанализ ERA5 как первичный субстрат данных, а не сеть станций.* В качестве источника многолетней метеорологической статистики используется глобальный атмосферный реанализ ERA5 за период 2014–2024 гг.; выбор обоснован тем, что плотность сети наземных станций Росгидромета в Северо-Западном регионе недостаточна для устойчивого восстановления посекторной климатологии p_F . Опора на реанализ уравновешена двухканальной выборочной валидацией: термический канал — по экологическому зондированию на пункте Воейково (Главная геофизическая обсерватория, индекс УПИ 26702); ветровой канал — по наземным наблюдениям синоптической станции WMO 26063 (Санкт-Петербург). *Обязательство 3: триангуляция трех классификаторов устойчивости приземного слоя атмосферы.* Сопоставление мгновенного состояния атмосферы одному из классов выполняется тремя независимыми методами — через объёмное число Ричардсона Ri_b , через знак безразмерного параметра z/L_{MO} и через классификацию Пасквилла–Гиффорда в варианте Тёрнера; расхождение между классификаторами учитывается явно как самостоятельный отчётный результат. Методологический якорь — работа [15], документирующая систематическое расхождение между классификатором по масштабу Мони́на–Обухова и температурно-градиентным классификатором в континентальных условиях.

1.5 Выводы по главе 1

Действующая методическая основа Российской Федерации в области расчёта затухания транспортного шума на местности — ГОСТ 31295.2-2005 — через формулу (22) и Примечание 1 к ней прямо устанавливает требование определения коэффициента метеорологической поправки C_0 на основе анализа

местных метеорологических статистических данных. Ни один действующий нормативный документ Российской Федерации не предоставляет ни методики получения такой климатологии, ни численных значений C_0 для её регионов; систематический поиск в основных профильных журналах и базах за 2020–2025 гг. не выявил публикаций, восполняющих этот пробел. В международной практике сложились реализованные национальные кейсы (Финляндия, Ирландия, Германия, Польша; в скандинавской группе — Дания, Швеция, Норвегия), в которых аналогичная задача решена и результат внедрён в нормативную систему. Прямого аналога для регионов Российской Федерации в открытой литературе не выявлено.

Восполнение пробела применительно к Северо-Западному региону Российской Федерации составляет научно-методическое содержание Глав 2–4. Глава 2 даёт физический фундамент: рассматривает механизмы влияния стратификации приземного слоя атмосферы на распространение звука и обосновывает выбор классификаторов устойчивости. Глава 3 излагает методику в виде развернутой формулировки трёх обязательств: архитектурного встраивания в ГОСТ 31295.2, использования реанализа ERA5 за период 2014–2024 гг. в качестве субстрата данных и параллельной триангуляции трёх классификаторов устойчивости с учетом расхождения. Глава 4 содержит программную реализацию методики, эмпирические результаты расчёта посекторной климатологии благоприятных условий распространения для Санкт-Петербурга и двухканальную станционную валидацию — термического канала по аэрологическому зондированию на пункте Воейково и ветрового канала по наземным наблюдениям станции WMO 26063.

Глава 2. Физические основы распространения звука в атмосфере

2.1 Звуковая волна и среда её распространения

Звуковая волна распространяется в стратифицированной движущейся атмосфере; локальная скорость звука c определяется уравнением $c = \sqrt{\gamma R_d T_v}$, где $T_v = T(1 + 0,608 q)$ — виртуальная температура [18]. Перенос акустической энергии средним полем ветра учитывается посредством эффективной скорости звука:

$$c_{eff}(z) = c(T(z)) + u(z) \cdot \hat{n}_{SR}, \quad (2.1)$$

где $\hat{n}_{SR}$ — единичный горизонтальный вектор от источника к приемнику [17]. Формула (2.1) сводит трехмерную задачу к одномерному вертикальному профилю, параметрически зависящему от азимута распространения, и определяет функциональный канал воздействия метеорологических полей на акустическое поле: вертикальные профили $T(z)$, $u(z)$, $q(z)$ полностью задают акустически релевантную характеристику среды. Все три величины входят в стандартный набор полей реанализа ERA5 [14]; процедуры их пересчета на расчетные уровни рассмотрены в §3.5.

2.2 Атмосферное поглощение

Атмосферное поглощение характеризует диссипацию акустической энергии в среде распространения и формализовано в виде слагаемого A_{atm} цепочки ослабления ГОСТ 31295.2-2005. Действующий стандарт ИСО 9613-1:1993 (ГОСТ 31295.1-2005) задает коэффициент поглощения α , дБ/км, как функцию термодинамического состояния воздуха и частоты:

$$\alpha = \alpha(f, T, RH, p_a), \quad (2.2)$$

складывающуюся из термовязкого члена и двух релаксационных вкладов колебательных мод молекул O_2 и N_2 [19, 20]. Релаксационные частоты f_{rO} и f_{rN} нелинейно зависят от молярной концентрации водяного пара, что порождает немонотонность $\alpha(RH)$: при $T = 0\text{ }^\circ\text{C}$ и $f = 1$ кГц коэффициент достигает локального максимума при $RH \approx 20\text{--}30\%$, а при дальнейшем росте влажности убывает [20, 17].

Численные значения α для шести климатологически представительных режимов воздушной массы Санкт-Петербурга, рассчитанные по формуле (2.2) при $p_a = 101,325$ кПа, приведены в табл. 2.1; частотная зависимость в третьоктавных полосах 50 Гц – 4 кГц — на рис. 2.1.

Таблица 2.1. Коэффициент атмосферного поглощения α , дБ/км, при $p_a = 101,325$ кПа

Таблица 2.1

Сезонный режим	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$RH, \%$	$\alpha(500 \text{ Гц})$	$\alpha(1 \text{ кГц})$	$\alpha(2 \text{ кГц})$	$\alpha(4 \text{ кГц})$
Зима, типичный	–5	85	1,6	5,0	18	58
Зима, антициклонический	–15	60	4,7	13	24	32
Весна / осень, переходный	+5	80	1,6	3,5	11	37
Лето, умеренное	+18	70	2,6	4,6	8,8	24
Лето, влажное	+20	85	2,7	5,2	9,0	21
Лето, сухой полдень	+25	40	3,2	5,4	11	30

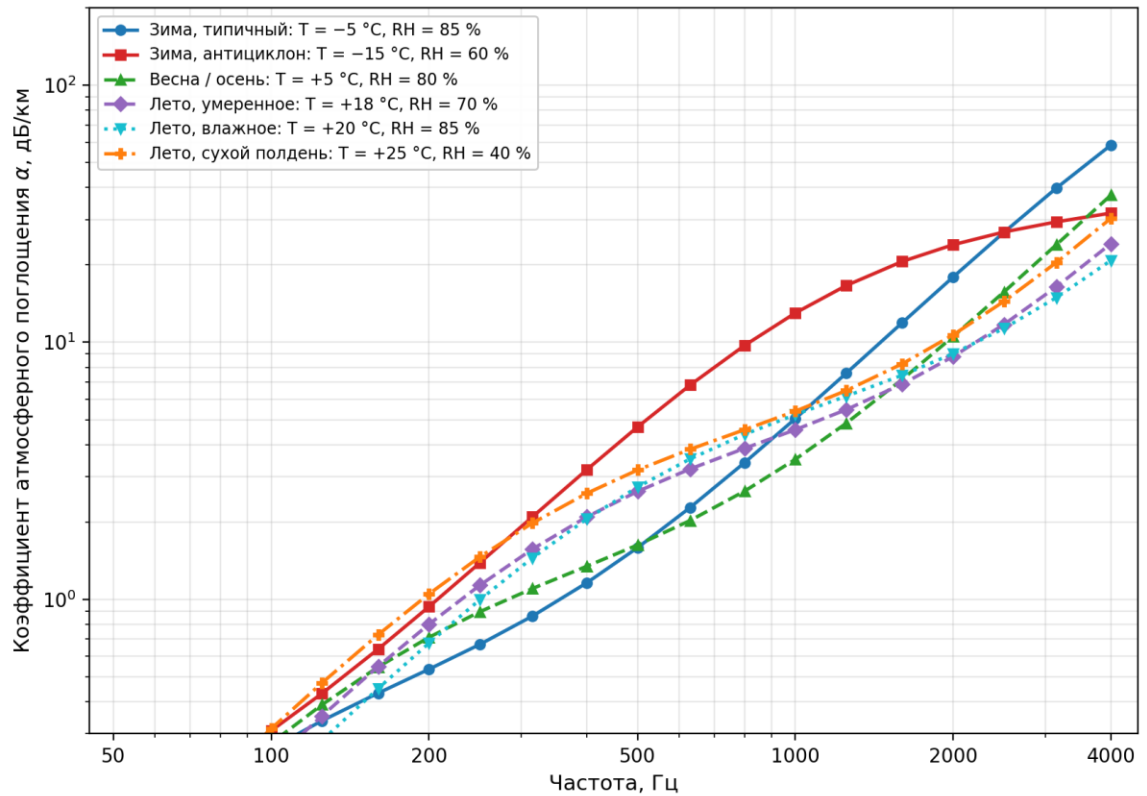


Рисунок 2.1 — Коэффициент атмосферного поглощения $\alpha(f)$ в третьоктавных полосах 50 Гц – 4 кГц для шести сезонных режимов воздушной массы Санкт-Петербурга.

В типичных для зимы Санкт-Петербурга условиях ($RH = 80\text{--}90\%$) величина $\alpha(1\text{ кГц})$ близка к локальному минимуму; в антициклонических эпизодах с сухим континентальным воздухом ($T \lesssim -15^\circ\text{C}$, $RH \lesssim 60\%$) α возрастает в 2,5–3 раза на частотах 500 Гц – 2 кГц, охватывающих основную энергию шума автотранспорта. Климатология α над городом определяется не средним значением влажности, а повторяемостью антициклонических периодов с сухим воздухом — характеристикой синоптической изменчивости. В неоднородной атмосфере A_{atm} вычисляется как криволинейный интеграл от α вдоль лучевой траектории по послойной процедуре приложения С к ИСО 9613-1; пересчет полей ERA5 в локальные (T, RH, p_a) — в §3.5.

2.3 Рефракция в стратифицированной атмосфере

Рефракция звука в стратифицированной атмосфере описывается законом Снелла в форме $\cos\theta(z)/c_{eff}(z) = const$ вдоль луча [17]; знак градиента $\partial c_{eff}/\partial z$ определяет направление искривления: при положительном — лучи отгибаются к поверхности (нисходящая рефракция), при отрицательном — отгибаются вверх с образованием геометрической акустической тени (восходящая рефракция, рис. 2.2). На высотах городской дорожной геометрии ($z \leq 50\text{--}100$ м) профиль $c_{eff}(z)$ аппроксимируется линейной функцией $c_{eff}(z) = c_0 + a z$; лучи являются дугами окружностей с радиусом $R = c_0/|a|$. Для приземных градиентов $|a| = 0,05\text{--}0,2 \text{ с}^{-1}$ радиус $R = 1,5\text{--}7$ км сопоставим с типичными городскими дистанциями расчёта.

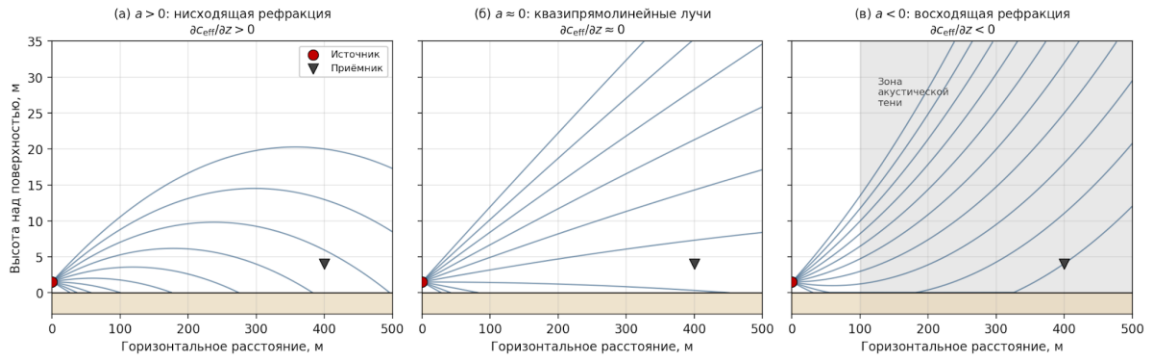


Рисунок 2.2 — Лучевые траектории для трёх режимов градиента эффективной скорости звука: $a > 0$, $a \approx 0$, $a < 0$.

Согласно (2.1), вертикальный градиент эффективной скорости звука раскладывается на температурный и ветровой вклады:

$$a = a_T + a_W, \quad a_T = \frac{\partial c}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad a_W = \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \cos(\varphi_{wind} - \varphi_{SR}), \quad (2.3)$$

где φ_{wind} — азимут направления ветра, φ_{SR} — азимут «источник — приемник» [21]. При $T = 283$ К величина $\partial c/\partial T \approx 0,6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; типичный градиент $\partial T/\partial z = 0,1 \text{ К/м}$ (слабая приземная инверсия) даёт $a_T \approx 0,06 \text{ с}^{-1}$,

типичный сдвиг ветра $|\partial u/\partial z| = 0,1 \text{ с}^{-1}$ — максимальное по модулю $a_W \approx 0,1 \text{ с}^{-1}$.

Структура (2.3) реализует два физически независимых механизма формирования благоприятных условий распространения: омнинаправленный температурный (определяемый устойчивостью стратификации) и секторный ветровой (зависящий от направления ветра относительно линии «источник — приемник»). Относительная значимость двух вкладов характеризуется параметром Уилсона $A = a_T/|a_W|$, разделяющим четыре режима рефракции с естественной привязкой к синоптическим условиям Санкт-Петербурга (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Режимы рефракции по параметру Уилсона $A = a_T/|a_W|$ и их сезонно-суточная привязка

Таблица 2.2

Режим	Значение A	Физическое содержание	Типичные условия Санкт-Петербурга
I — ветровой	$A \ll 1$	секторная рефракция, выраженная тень против ветра	ветренные дневные часы, поздняя осень и зима
II — смешанный	$A \sim 1$	частичная взаимная компенсация двух механизмов	переходные сезоны, утренние и вечерние часы
III — конвективный	$A \ll -1$	омнинаправленный отгиб лучей вверх, тень во всех секторах	летние полуденные часы при ясной погоде
IV — устойчивый тепловой	$A \gg 1$	омнинаправленный нисходящий отгиб, тень отсутствует	ясные ночи, антициклоническая зимняя погода

Аддитивная декомпозиция градиента (2.3) является несущим методологическим результатом главы: она составляет физическое основание для двухкомпонентной декомпозиции посекторной климатологической вероятности благоприятных условий p_F на тепловую и ветровую составляющие (Глава 3,

§3.3), а также для двухканальной эмпирической валидации в Главе 4 — термического канала по аэрологическим зондированиям на пункте Воейково (§4.7) и ветрового канала по приземным наблюдениям городской синоптической станции WMO 26063 (§4.8).

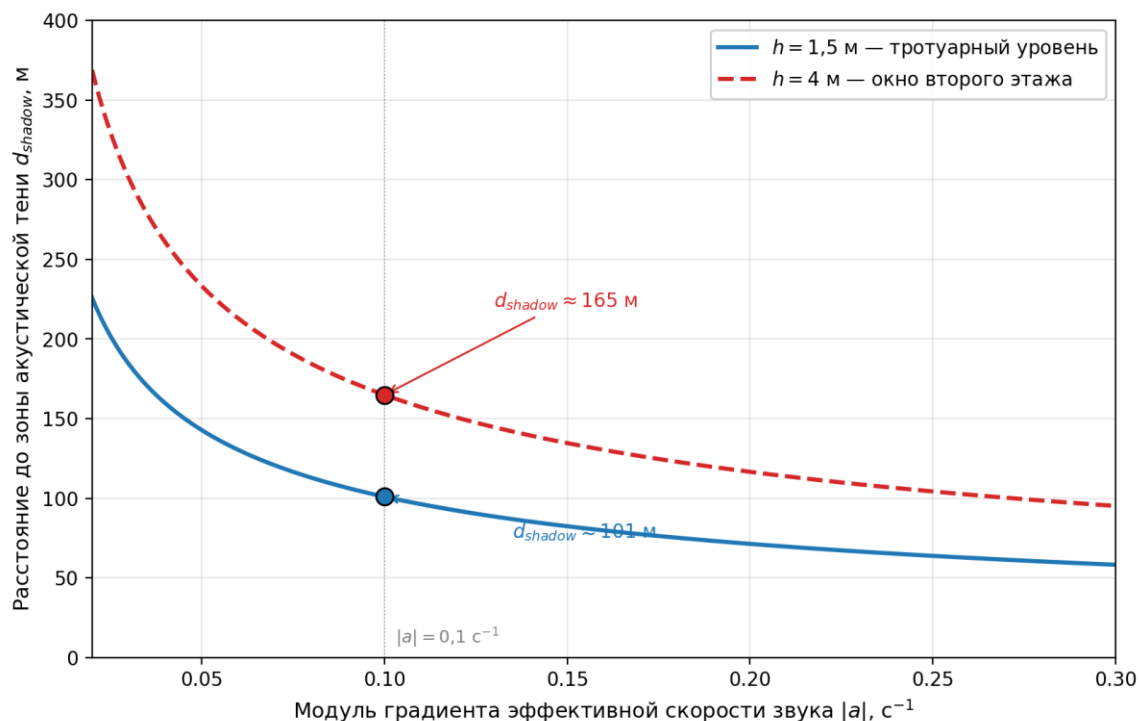


Рисунок 2.3 — Расстояние до начала зоны акустической тени d_{shadow} в зависимости от модуля градиента эффективной скорости звука для двух типичных высот.

При $a < 0$ за пределами критической дистанции образуется зона акустической тени; для источника и приёмника на одинаковой высоте h [17]:

$$d_{shadow} \approx \sqrt{2 h c_0 / |a|}, \quad (2.4)$$

что при $|a| = 0,1 \text{ с}^{-1}$ и $c_0 = 340 \text{ м/с}$ даёт $d_{shadow} \approx 100 \text{ м}$ при $h = 1,5 \text{ м}$ (тротуарный уровень) и $\approx 165 \text{ м}$ при $h = 4 \text{ м}$ (окно второго этажа жилой застройки); зависимость для двух высот представлена на рис. 2.3.

Реальный масштаб акустического эффекта рефракции характеризуется разностями уровней звукового давления между благоприятным (L_F),

однородным (L_H) и неблагоприятным (L_U) сценариями распространения (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Разности уровней звукового давления между сценариями распространения на референсных дистанциях, типовая геометрия городской дорожной акустики

Таблица 2.3

Расстояние, м	$L_F - L_H$, дБ	$L_H - L_U$, дБ
100	$+0,5 \pm 0,5$	от -2 до -5
200	$+1 \dots + 2$	от -5 до -10
500	$+2 \dots + 3$	от -10 до -20
1000	$+3 \dots + 4$	от -15 до -25 (турбулентный «пол»)

На всех референсных дистанциях $|L_F - L_H| < |L_H - L_U|$: неблагоприятный сценарий формирует значительные провалы, ограниченные снизу турбулентным «полом» (§2.4), благоприятный — лишь умеренное превышение [10, 22]. Эта фундаментальная асимметрия обосновывает редукцию $\{F, H, U\} \rightarrow \{F, H\}$ международной практики CNOSSOS-EU: при долговременном статистическом осреднении вклад неблагоприятной геометрии сворачивается в однородный сценарий без существенного смещения. Долговременный уровень в приемнике вычисляется как взвешенная комбинация двух сценарных уровней:

$$L_{long-term} = 10 \lg [p_F 10^{L_F/10} + (1 - p_F) 10^{L_H/10}], \quad (2.5)$$

где p_F — посекторная вероятность благоприятных условий, определяемая климатологически (Глава 3, §3.3; Глава 4, §4.5).

2.4 Турбулентность и метеорологические ограничения измерений

Турбулентные пульсации температуры и ветра порождают флуктуации показателя преломления $\delta n = (1/2) \delta T/T + \delta u \cdot \hat{n}/c_0$ [23], модулирующие амплитуду и фазу акустической волны и ограничивающие глубину провала уровня в зоне акустической тени конечной величиной — турбулентным «полом»

порядка 20–25 дБА ниже свободного поля. Этот предел воспроизводится независимыми классами расчётных моделей с согласованностью 1–2 дБ [22, 10] и составляет физическое основание редукции $\{F, H, U\} \rightarrow \{F, H\}$ §2.3. Прямое поглощение и рассеяние звука гидрометеорами на частотах транспортного шума пренебрежимо малы; действующая методика измерения шумовой характеристики транспортных потоков ГОСТ 20444–2014 запрещает измерения во время осадков и при скорости ветра выше 5 м/с на уровне микрофона [24], замыкая измерительный контур описанной выше физической картины.

2.5 Классификация состояний приземного слоя для задач акустики

Метеорологическая параметризация условий распространения опирается на три канонические классификации устойчивости приземного слоя: классификацию Пасквилла–Гиффорда [25, 26, 27], объемное число Ричардсона Ri_b и длину Монины–Обухова L_{MO} [28, 29].

Класс Пасквилла–Гиффорда (А–F с расширением G) определяется по приземной скорости ветра и характеристике инсоляции; вариант Тёрнера использует прямую солнечную радиацию, обеспечивая операциональную совместимость с современными источниками метеорологических данных, в том числе с полем прямой солнечной радиации реанализа ERA5. Классификация исторически возникла в задаче атмосферной диффузии и обладает известной ограниченной разрешающей способностью в средней части шкалы устойчивости (классы С–Е), куда в умеренном климате попадает основная масса часов [30].

Объёмное число Ричардсона между уровнями $z_1 < z_2$ есть отношение скоростей генерации турбулентной кинетической энергии плавучестью и сдвигом [18]:

$$Ri_b = \frac{g (\theta_{v,2} - \theta_{v,1}) (z_2 - z_1)}{\theta_v^-[(u_2^- - u_1^-)^2 + (v_2^- - v_1^-)^2]}, \quad (2.6)$$

вычисляемое в настоящей работе между $z_1 = 2$ м и $z_2 = 100$ м из полей реанализа ERA5 (§3.5). Критическое число Майлза–Хауарда $Ri_{cr} = 1/4$ согласуется с эмпирически установленным SHEBA-порогом разрушения инерциального подынтервала $Ri \approx 0,20\text{--}0,25$ [31]; существует гистерезисный эффект: возникновение турбулентности из ламинарного состояния требует $Ri \lesssim 0,20$, тогда как уже развитая турбулентность поддерживается при значениях Ri вплоть до $0,7\text{--}1,0$ [18].

Длина Монина–Обухова — фундаментальная размерная величина теории подобия приземного слоя, введенная в [28] и систематически развитая в [29]:

$$L_{MO} = - \frac{u_*^3}{\kappa (g/\theta_v) \underline{(w'\theta'_v)}_s}, \quad (2.7)$$

где u_* — динамическая скорость, м/с; $\kappa \approx 0,40$ — константа Кармана; $\underline{(w'\theta'_v)}_s$ — поверхностный турбулентный поток виртуальной потенциальной температуры. Знаковая конвенция: $L_{MO} > 0$ — устойчивая стратификация, $L_{MO} < 0$ — неустойчивая, $|L_{MO}| \rightarrow \infty$ — нейтральная; модуль $|L_{MO}|$ имеет смысл высоты, на которой механическая и плавучестная генерация турбулентной кинетической энергии равны по модулю [32]. Согласно гипотезе Монина–Обухова, безразмерные градиенты ветра и температуры являются универсальными функциями $\phi_m(\zeta)$, $\phi_h(\zeta)$ единственного безразмерного параметра $\zeta = z/L_{MO}$.

Подстановка определений в (2.6) даёт тождество [18]:

$$Ri = \zeta \frac{\phi_h(\zeta)}{\phi_m^2(\zeta)}, \quad (2.8)$$

из которого при линейной форме $\phi_m = \phi_h = 1 + 5\zeta$ для устойчивой стратификации следует $Ri \rightarrow 1/5 = 0,20$ при $\zeta \rightarrow +\infty$. Совпадение со SHEBA-порогом отражает структурное (а не независимое эмпирическое) происхождение критического числа Ричардсона. Сводное операциональное соответствие трех

классификаций при шероховатости $z_0 \approx 0,1$ м представлено в табл. 2.4, схематически — на рис. 2.4.

Таблица 2.4. Сводное соответствие классификаций устойчивости приземного слоя и акустического режима

Таблица 2.4

Класс PG	Описание	Ri_b (10 м)	z/L_{MO} (10 м)	Акустический режим
A	крайне неустойчивый	$< -0,086$	$< -0,875$	неблагоприятный
B	умеренно неустойчивый	$-0,086 \dots -0,037$	$-0,875 \dots -0,119$	неблагоприятный
C	слабо неустойчивый	$-0,037 \dots -0,012$	$-0,119 \dots -0,026$	склонный к неблагоприятному
D	нейтральный	$-0,012 \dots +0,012$	$-0,026 \dots +0,026$	однородный
E	слабо устойчивый	$\approx +0,046$	$\approx +0,123$	благоприятный
F	умеренно устойчивый	$\approx +0,084$	$\approx +0,350$	благоприятный
G	крайне устойчивый	$> +0,10$	$> +0,875$	сильно благоприятный

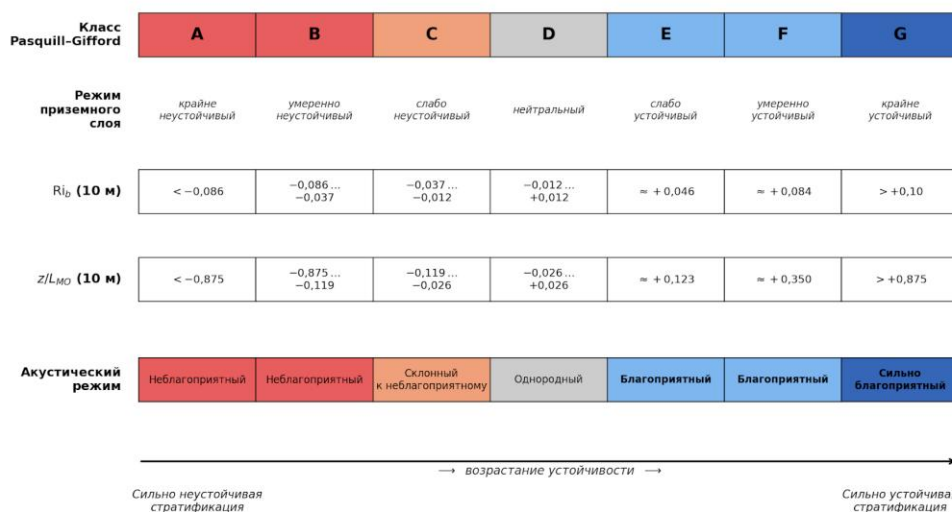


Рисунок 2.4 — Диаграмма соответствия классификаций состояния приземного слоя для задач акустики.

Применимость теории подобия Мони́на–Обухова в условиях прибрежной городской среды Санкт-Петербурга ограничена систематическими нарушениями её предпосылок: сильно устойчивой стратификацией ($\zeta \gtrsim 1$) с фрагментацией слоя постоянных потоков [33] и кубическим усилением неопределенности $L_{MO} \propto u_*^3$ при малых u_* ; конвективной нелокальностью ($\zeta < -1$); прибрежной адвекцией с Финского залива, формирующей горизонтально неоднородный приземный слой; городским подслоем шероховатости, размещающим основание MOST-валидного слоя на 50–100 м над поверхностью [34]; задокументированными несогласиями знака L_{MO} и фактического температурного градиента в континентальных условиях [15]. Каждое нарушение селективно воздействует на различные классификаторы; методическое отношение к их расхождениям составляет предмет Главы 3.

2.6 Метеорологические условия как фактор распространения: классификация ISO 9613–2

Классификация условий распространения по ИСО 9613–2 (ГОСТ 31295.2-2005) различает три категории: благоприятные F (нисходящая рефракция, $a > 0$), однородные H (квазипрямолинейные лучи, $a \approx 0$), неблагоприятные U (восходящая рефракция, $a < 0$). Согласно (2.3), категория F реализуется при $a_T + a_W > 0$ — омнинаправленно (режим IV параметра Уилсона, устойчивая инверсия) или секторно (режим I, попутный ветер); категория U — в зеркальных конфигурациях; категория H — в переходном режиме II с малым по модулю градиентом.

Бинарная редукция $\{F, H, U\} \rightarrow \{F, H\}$ международной практики CNOSSOS-EU [10] переносится в настоящей работе на нормативную основу

ГОСТ 31295.2 в форме надстройки над её формулой (22): посекторная вероятность благоприятных условий $p_F(\sigma, s, \tau)$, зависящая от азимутального сектора σ , сезона s и периода суток τ , есть эмпирически калибруемая региональная реализация коэффициента C_0 Примечания 1 к формуле (22), сформулированного в общей форме «значение C_0 может быть оценено путём анализа местных метеорологических статистических данных» (см. §1.3). Двухкомпонентная структура p_F — тепловая и ветровая составляющие — физически следует из разложения (2.3) и обеспечивает двухканальную эмпирическую валидацию в Главе 4: термического канала по аэрологическим зондированиям на пункте Воейково (§4.7) и ветрового канала по приземным наблюдениям городской синоптической станции WMO 26063 (§4.8). Поверхностно-импедансное слагаемое A_{gr} цепочки ослабления ГОСТ 31295.2 не зависит от метеорологических условий и фиксируется на типовом для городской дорожной геометрии Санкт-Петербурга значении параметра подстилающей поверхности (§3).

2.7 Выводы по главе 2

Физический фундамент региональной климатологии благоприятных условий распространения звука, реализующей нормативное требование Примечания 1 к формуле (22) ГОСТ 31295.2-2005 в форме посекторной функции $p_F(\sigma, s, \tau)$ для региона Санкт-Петербурга, установлен. Метеорологические условия воздействуют на акустическое поле через два независимых канала — атмосферное поглощение $\alpha(f, T, RH, p_a)$, формализованное ИСО 9613-1, и рефракцию в стратифицированной атмосфере с двухкомпонентным градиентом $a = a_T + a_W$, разделяющим оминаправленный температурный и секторный ветровой механизмы формирования благоприятных условий. Метеорологические классификации устойчивости приземного слоя — Пасквилла–Гиффорда, объемное число Ричардсона и масштаб Монина–

Обухова — обеспечивают параметрическое представление состояния атмосферы с границами применимости, систематически ограниченными в прибрежной городской среде. Методическая разработка алгоритма расчета p_F из полей реанализа ERA5 переходит в Главу 3; эмпирическая реализация и двухканальная стационарная валидация — в Главу 4.

Глава 3. Стратегия и методология исследования

3.1 Стратегия исследования и обоснование методологического выбора

Методика настоящей работы реализует посекторную климатологию вероятности благоприятных условий распространения $p_{\text{благ}}$ как механизм заполнения слота C_0 в формуле (22) [4] при четырёх ограничениях: нормативная совместимость, доступность входных данных в условиях разреженной наземной сети, воспроизводимость на открытых данных, пригодность для проектной практики. Эти ограничения раскладываются в десять решений (3.1.1–3.1.10) в формате «Вопрос — Варианты — Обоснование — Выбор»; три из них (3.1.1, 3.1.2, 3.1.8) суть развернутые формулировки трех обязательств методологии §1.5.

Решение 1 — рамочный метод. Из вариантов «[5] / [4] (одиночный сценарий), CNOSSOS-EU [10] (двухсценарный), Nord2000 [12, 35] (9 классов), Harmonoise [36] (полная PE-модель)» принят CNOSSOS-EU-подобный двухсценарный подход, надстраиваемый над расчетной схемой ГОСТ. Формула (22) с Примечанием 1 явно декларирует слот C_0 , и двухсценарная архитектура встраивается в этот слот без переформулирования стандарта (Обязательство 1).

Решение 2 — источник данных. Наземная сеть Росгидромета в СЗ регионе недостаточна для секторного разрешения; ERA5-Land не содержит мгновенных потоковых полей, требуемых для $1/L$. Выбор — ERA5 [14] через Climate Data Store API (cdsapi); станции сохраняются как источник валидации в двух физических каналах — Воейково для термического (§4.7), WMO 26063 для ветрового (§4.8).

Решение 3 — временной горизонт. Двух-пятилетние выборки не покрывают межгодовую синоптическую изменчивость СПб; 30-летний горизонт усиливает риск климатического дрейфа в исходных полях ERA5. Выбор — 2014–2024 (11 полных лет, 96 432 почасовых отметки), что даёт ~8 000 часов на бин «сезон × период» в каждой ячейке (статистическая адекватность — §4.2.2).

Период согласован со стандартным климатологическим интервалом ВМО (10 лет).

Решение 4 — система классов. Тройка {F, H, U} ИСО 9613-2 сводится к бинарной {F, H} CNOSSOS-EU; редукция $U \rightarrow H$ допустима благодаря физической асимметрии $|L_F - L_H| < |L_H - L_U|$ (§2.2) и турбулентному «полу» 20–25 дБ в зоне акустической тени (§2.5). Выбор — бинарный признак (favorable / non-favorable) на час $\times$ сектор $\times$ ячейку (реализация — §4.4).

Решение 5 — критерий благоприятности. Логическое «ИЛИ» ветрового и термического условий: $u_{\parallel} \geq 2,0$ м/с *либо* устойчивая стратификация. Два независимых механизма рефракции — направленный (ветровой через $u_{\parallel} = |U_{10}| \cos(\theta - \theta_{wind_to})$) и омнинаправленный (термический; §2.2) — требуют дизъюнкции, иначе теряются часы с действующим единственным механизмом (например, ясная летняя ночь со штилем). Порог 2 м/с — стандарт [10] и Annex II [11]; чувствительность к выбору $u_{thr} \in [1,0; 3,0]$ м/с — §4.4.1.

Решение 6 — пространственная агрегация. Ячейка ERA5 $0,25^\circ$ как первичная единица; домен СПб — $59,5\text{--}60,5^\circ$ с. ш., $29,5\text{--}31,0^\circ$ в. д., сетка $5 \times 7 = 35$ ячеек, охватывающая городскую агломерацию, восточный край Финского залива и прилегающие континентальные территории. Районная или городская агрегация теряет контекст «центр — пригород» и разрыв «суша — Финский залив» (§2.6).

Решение 7 — временная агрегация. Четыре сезона (DJF, MAM, JJA, SON) $\times$ три периода Lden (день 07:00–19:00, вечер 19:00–23:00, ночь 23:00–07:00 UTC+3) согласно [16] и [7]. Годовое среднее теряет сезонный и суточный контрасты устойчивости пограничного слоя (§2.6); месячное даёт мелкое деление без новой физической информации.

Решение 8 — классификация устойчивости. Триангуляция трёх независимых классификаторов: объемное число Ричардсона Ri_b (основной канал), обратная длина Мони́на–Обухова $1/L$ (вспомогательный), Пасквилл–Тёрнер (CNOSSOS-верный канал и каскадный fallback). Каждый имеет селективные нарушения: Пасквилл–Тёрнер концентрируется в нейтральном D-классе в прибрежных и городских условиях (§2.3); L в сильно устойчивых ночных режимах страдает кубическим усилением неопределенности через u_*^3 и не видит приподнятых инверсий прибрежной адвекции (§2.4); Ri_b использует фактические градиенты и хорошо ведет себя в условиях адвекции с Финского залива. Документированное систематическое несогласие классификаторов [15, 37] делает выбор «единственно правильного» классификатора методологически уязвимым. Основной канал — Ri_b на фиксированном слое 10 м → 100 м над поверхностью через ERA5-переменные u_{100}, v_{100} с каскадной подстановкой Пасквилл при $Ri_b = NaN$. Этот выбор устраняет подповерхностный артефакт пары «2 м — 1000 гПа», возникающий в 27,49 % часов климатологии СПб (§3.4.4). Пороги: $Ri_b \geq 0,1$, $S^2 \geq 1,0 \text{ м}^2/\text{с}^2$ для определяемости Ri_b , $1/L \geq 0,05 \text{ м}^{-1}$ (строгий) / $\geq 0,01 \text{ м}^{-1}$ (умеренный); устойчивые классы Пасквилл — E, F, G.

Решение 9 — конвенция направления. Данные в выходных файлах — конвенция [5] «куда распространяется звук»; графические иллюстрации — российская метеорологическая конвенция «откуда дует ветер»; преобразование — поворот на 180° с явной декларацией в CF-метаданных NetCDF и в подписях рисунков.

Решение 10 — структура выходного артефакта. Двухканальный выход: основной файл `p_favorable_spb.nc` (Ri_b + каскад Пасквилл) и CNOSSOS-верный `p_favorable_cnossos.nc` (строго Пасквилл–Тёрнер). Полная

размерность справочной таблицы на канал — $35 \times 18 \times 4 \times 3 = 7\,560$ скалярных значений.

Сводный методологический отпечаток исследования:

Таблица 3.1

№	Аспект	Принятое решение
1	Рамочный метод	CNOSSOS-EU-подобный двухсценарный над [4]
2	Источник входных данных	ERA5 (CDS API cdsapi); валидация Воейково + WMO 26063
3	Временной горизонт	2014–2024 (11 лет, 96 432 часа)
4	Система метеоклассов	Бинарный признак (favorable / non-favorable)
5	Критерий благоприятности	$u_{\parallel} \geq 2,0$ м/с или устойчивая стратификация
6	Пространственная агрегация	Ячейка $0,25^\circ$; домен $5 \times 7 = 35$ ячеек
7	Временная агрегация	4 сезона $\times$ 3 периода $L_{den} = 12$ категорий
8	Классификация устойчивости	Триангуляция $Ri_b + 1/L$ + Пасквилл–Тёрнер; основной канал — Ri_b на слое 10–100 м над поверхностью с каскадом
9	Конвенция направления	Данные — ИСО; рисунки — метео; поворот на 180°
10	Структура выхода	Двухканальный: p_favorable_spb.nc + p_favorable_cnossos.nc; 7 560 значений на канал

3.2 Базовая расчётная модель ГОСТ 31295.2-2005

Эквивалентный уровень звукового давления A в точке приёма при благоприятных условиях по [4]:

$$L_{AT}(DW) = L_W + D_C - A, \quad A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc},$$

где компоненты соответствуют геометрическому расхождению, атмосферному поглощению по [19], воздействию подстилающей поверхности, экранированию и прочим механизмам (детальный разбор — § 1.3). Долгосрочный

уровень получается через метеорологическую поправку: $L_{AT}(LT) = L_{AT}(DW) - C_{met}$, $C_{met} \geq 0$.

Метеорологическая поправка задаётся формулой (22) [4]:

$$C_{met} = \{0, d_p \leq 10(h_s + h_r), C_0 \left[1 - \frac{10(h_s + h_r)}{d_p}\right], d_p > 10(h_s + h_r), \quad (3.1)$$

где d_p — горизонтальная проекция расстояния, h_s, h_r — высоты источника и приёмника, C_0 — коэффициент, отражающий региональные метеорологические условия. На дальних расстояниях $C_{met} \rightarrow C_0$; Примечание 3 указывает диапазон $C_0 \in [0; +5]$ дБ. Коэффициент C_0 — единственный множитель формулы, зависящий от климатологии; Примечание 1 декларирует слот: «Значение C_0 может быть оценено путем анализа местных метеорологических статистических данных», однако ни процедуры получения такой климатологии, ни таблиц C_0 для регионов РФ стандарт не задает. Восполнение этого пробела для климатологии Санкт-Петербурга составляет содержательное ядро Главы 3: C_0 вычисляется как функция посекторной вероятности $p_{\text{благ}}$ и расстояния (§3.3), сама $p_{\text{благ}}$ — продукт многолетней обработки ERA5 (§3.4, §3.5), сохраняемый как двухканальный артефакт (§3.5.6).

3.3 Метеорологическое расширение базовой модели

3.3.1 Двухсценарная модель и критерий благоприятности

Двухсценарная архитектура [10, 11] моделирует долгосрочный уровень как логарифмически взвешенное среднее уровней при благоприятных и однородных условиях:

$$L_{long} = 10 \lg[p_{\text{благ}} \cdot 10^{L_F/10} + (1 - p_{\text{благ}}) \cdot 10^{L_H/10}], \quad (3.2)$$

где $p_{\text{благ}} \in [0; 1]$ — посекторная климатологическая вероятность благоприятных условий по азимуту «источник → приёмник» в заданный бин «сезон × период L_{den} ». Свертка

тройной классификации $\{F, H, U\}$ к бинарной $\{F, H\}$ обоснована физической асимметрией $|L_F - L_H| < |L_H - L_U|$ (§2.2) и турбулентным «полом» в зоне тени (§2.5).

Бинарный признак благоприятности часа t в ячейке c для направления θ :

$$\begin{aligned} favorable(t, c, \theta) \\ = [u_{\parallel}(t, c, \theta) \geq 2,0 \text{ м/с}] \\ \vee [\text{устойчивая стратификация в час } t, \text{ ячейке } c], \end{aligned} \quad (3.3)$$

где $u_{\parallel} = |U_{10}| \cos(\theta_{ISO} - \theta_{wind_to})$ — проекция приземного ветра на азимут распространения; порог 2 м/с — стандарт [10]. Логическое «ИЛИ» отражает независимость направленного ветрового и оминаправленного термического механизмов рефракции (§2.2); конкретизация условия устойчивой стратификации — §3.5.2.

3.3.2 Замкнутое выражение для C_0 и геометрическая поправка

Переписывая (3.2) через разность $\Delta L = L_F - L_H \geq 0$ и используя $C_{met} = L_F - L_{long}$, в дальней асимптотике формулы (22) получаем:

$$C_0(p_{\text{благ}}, d_p) = -10 \lg[p_{\text{благ}} + (1 - p_{\text{благ}}) \cdot 10^{-\Delta L(d_p)/10}]. \quad (3.4)$$

Зависимость $\Delta L(d_p)$ параметризуется насыщающей функцией расстояния по схеме CNOSSOS-EU:

$$\Delta L(d_p) = \min(A + B(1 - e^{-d_p/d_0}), L_{max}), \quad (3.5)$$

с принятыми в работе значениями $A = 3,0$ дБ, $B = 6,0$ дБ, $d_0 = 50$ м, $L_{max} = 15$ дБ, согласованными с [10] для опорной геометрии « $h_s = 0,5$ м, $h_r = 4$ м». Асимптотика $\Delta L(d_p \rightarrow \infty) = A + B = 9$ дБ согласуется с порядком величин §2.2. Численный диапазон C_0 при типичных $p_{\text{благ}} \in [0,3; 0,9]$ и $d_p \in [50; 500]$ м составляет приблизительно $[0,4; 4,5]$ дБ, что согласуется с Примечанием 3 к (22) [4]. Полная метеорологическая поправка получается подстановкой C_0 из (3.4) в

(3.1) с сохранением геометрического множителя ГОСТ без переформулирования (Обязательство 1).

3.3.3 Полная расчётная цепочка и ограничения

Сводная цепочка: ERA5 $\rightarrow$ классификация устойчивости $\rightarrow p_{\text{благ}}(c, \theta, s, \tau) \rightarrow C_0(p_{\text{благ}}, d_p) \rightarrow C_{\text{met}} \rightarrow L_{\text{AT}}(LT)$. Тяжёлая климатологическая обработка выполняется один раз и сохраняется как воспроизводимый двухканальный артефакт (§3.5.6); лёгкий расчётный шаг — на стороне конечного пользователя.

Ограничения двухсценарной аппроксимации: бинарное приближение непрерывной кривой устойчивости вместо физического спектра по числу Ричардсона; огрубление неустойчивых дневных режимов (для городской акустики менее критично, поскольку они дают однородный или неблагоприятный вклад, ограниченный турбулентным полом); одна параметризация $\Delta L(d_p)$ для всех режимов и поверхностей. Многоклассовое расширение по схеме [12, 35] — направление дальнейшей работы.

3.4 Источник метеорологических данных

3.4.1 ERA5 и доступ через CDS API

ERA5 — пятое поколение глобального реанализа атмосферы ECMWF, построенное на IFS с 4D-Var ассимиляцией [14]. На Climate Data Store данные доступны на регулярной сетке $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ с почасовой дискретностью и 137 гибридными вертикальными уровнями (37 стандартных изобар). Доступ — через CDS API(`cdsap`) с контролируемым отбором переменных по датасетам `single-level`, `pressure-level` и `static`; локальное хранилище — Zarr-кэш `era5_spb_v2.zarr`. Альтернатива ARCO-ERA5 (Google Cloud Storage)

отброшена в пользу прямого CDS-API ради контролируемого отбора, инкрементной догрузки и стандартной ECMWF-аутентификации.

ERA5 обеспечивает три свойства, принципиальных для построения посекторной климатологии $p_{\text{благ}}$: пространственно-однородное покрытие (отсутствуют пропуски сети), многолетний горизонт с почасовой дискретностью, согласованный набор переменных приземного и пограничного слоя (включая мгновенные потоки, необходимые для $1/L$, отсутствующие в ERA5-Land). Ограничения — горизонтальное разрешение ~ 28 км, не разрешающее мезомасштабную динамику городского пограничного слоя, и параметризации турбулентности IFS, откалиброванные на однородной местности и систематически смещенные в шероховатых городских условиях и на берегах крупных водоемов (§2.4); эти ограничения мотивируют двухканальную стационарную валидацию (§4.7, §4.8).

3.4.2 Домен и временной горизонт

Домен Санкт-Петербурга — $59,5\text{--}60,5^\circ$ с. ш., $29,5\text{--}31,0^\circ$ в. д., сетка $5 \times 7 = 35$ ячеек $0,25^\circ$, охватывает городскую агломерацию, восточный край Финского залива (включая Невскую губу) и прилегающие континентальные территории. Временной горизонт — 01.01.2014 – 31.12.2024, 11 полных лет, 96 432 почасовых отметки на каждую ячейку, в совокупности $35 \times 96\,432 = 3\,375\,120$ пар «ячейка $\times$ час». При равномерном распределении на бин «сезон $\times$ период» одной ячейки приходится приблизительно 8 000 часов — на два порядка выше асимптотического порога $n > 30$ для нормальной аппроксимации биномиальной выборки в каждом из 18 азимутальных секторов (полная оценка адекватности — §4.2.2).

3.4.3 Загружаемые переменные

Single-level: $u_{10}, v_{10}, u_{100}, v_{100}, T_{2m}, T_{d,2m}, p_s$, мгновенные приповерхностные потоки явного тепла и влаги, компоненты турбулентного напряжения для восстановления u_* , $fdir$ (прямая солнечная радиация), tcc (общая облачность). Pressure-level (1000, 975, 950 гПа): u, v, T — для интерполяции термического профиля на 100 м над поверхностью и как независимая перекрёстная проверка ветровой структуры. Static: $sdfor$ (стандартное отклонение суборографических элементов рельефа) как фильтр сильно неоднородных ячеек. Применение каждой переменной к конкретному классификатору устойчивости — §3.5.2; полный перечень — Таблица 4.2.1.

3.4.4 Принципиальное ограничение уровня 1000 гПа и переход на 100 м над поверхностью

Центральный методологический результат подраздела — переход в v2-спецификации от пары уровней «2 м над поверхностью → 1000 гПа» (использовавшейся в v1) на фиксированный слой «10 м → 100 м над поверхностью». Уровень 1000 гПа в ERA5 — это *изобарическая* поверхность, а не *фиксированная высота*: в стандартной атмосфере её высота составляет около 111 м над уровнем моря, но при прохождении глубоких атлантических циклонов изобарическая поверхность 1000 гПа опускается ниже орографической поверхности Санкт-Петербурга (преимущественно 0–80 м над уровнем моря). По результатам полной обработки ансамбля 2014–2024 гг. (§4.2.1, Phase A) поверхностное давление $p_s < 1000$ гПа реализуется в **27,49 %** пар «ячейка × час» — приблизительно в каждом третьем-четвёртом часе временного ряда. Это систематическая черта климатологии умеренно высоких широт Северной

Европы с активной циклонической деятельностью Атлантической ветви, а не редкое исключение.

Расчёт Ri_b между «2 м над поверхностью» и «1000 гПа» в часы $p_s < 1000$ гПа математически эквивалентен экстраполяции профилей температуры и ветра в *подповерхностное* пространство; получаемые значения Ri_b **физически бессмысленны и должны быть отброшены либо посчитаны с нелинейной коррекцией** — в любом случае с потерей около четверти ансамбля. Решение v2 — фиксированный слой 10 м → 100 м над поверхностью через специально предусмотренные ERA5-переменные u_{100}, v_{100} , вычисляемые в IFS-постпроцессинге по теории подобия Монина–Обухова и *всегда определённые* над поверхностью независимо от p_s . Температурный профиль на 100 м интерполируется из pressure-level температур на 975 и 950 гПа, поверхности которых в климатологии СПб 2014–2024 гг. всегда выше орографии. Подповерхностный артефакт устраняется по построению, без потери выборки и без нелинейных коррекций.

Принципиальное ограничение пары «фиксированная высота 2 м / изобарическая поверхность 1000 гПа» не специфично для настоящей работы — оно проявляется во всех применениях ERA5-аналогичных реанализов к приземной климатологии в умеренно высоких широтах с активной циклонической деятельностью. Эмпирически установленный масштаб явления (27,49 % часов) задаёт количественную меру требуемой осторожности и обосновывает фиксировано-высотную опору u_{100}, v_{100} как методологический стандарт для региональных климатологий аналогичных широт. Валидация фиксировано-высотного Ri_b^{ERA5} против эталона аэрологического зондирования Воейково — §4.7.

3.5 Алгоритм построения климатологической справочной таблицы

3.5.1 Структура пайплайна

Пять последовательных этапов с явными контрактами «вход — выход»:

1) **Загрузка ERA5** → **кэш** `era5_spb_v2.zarr` (полный набор переменных §3.4.3 на координатной сетке (*time, latitude, longitude*)).

2) **Классификация устойчивости** → **кэш** `stability_v2.zarr` (три классификатора параллельно для каждой пары «ячейка × час»; §3.5.2).

3) **Посекторный признак благоприятности** → **кэш** `favorable_v2.zarr` (бинарный признак для каждой тройки «ячейка × час × сектор»; §3.5.3, §3.5.4).

4) **Климатологическая агрегация** → **два NetCDF-файла справочной таблицы** (`p_favorable_spb.nc`, `p_favorable_cnossos.nc`; §3.5.5, §3.5.6).

5) **Валидация** — двухканальная: Воейково (термика, §4.7), WMO 26063 (ветер, §4.8).

Каждый этап имеет один входной артефакт, один выходной артефакт и одну группу методологических выборов, что обеспечивает воспроизводимость, независимую замену этапов и на границах.

3.5.2 Триангуляция трёх независимых классификаторов

Объемное число Ричардсона Ri_b (основной канал). Безразмерное отношение плавучестной и сдвиговой генерации, вычисляемое между нижним уровнем (приземный воздух: T_{2m}, u_{10}, v_{10}) и верхним фиксированным (100 м над поверхностью: u_{100}, v_{100} , температура — интерполяция из 975 и 950 гПа; полная

формула — §4.3.1). Порог устойчивости — $Ri_b \geq 0,1$ (§2.3); операциональное условие определмости — $S^2 = (\Delta u)^2 + (\Delta v)^2 \geq 1,0 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (при меньшем сдвиге значение помечается NaN для каскада).

Обратная длина Монина–Обухова $1/L$. Вычисляется через канонические ECMWF-переменные: мгновенный поверхностный поток явного тепла, мгновенный поток влаги, фрикционная скорость u_* — *de novo* из мгновенных компонент турбулентного приземного напряжения. Принципиальное методологическое условие — использование *мгновенных*, а не аккумулярованных полей: последние являются интегралом за прошедший прогнозный час и не соответствуют мгновенному значению, требуемому для L ; одновременно u_* не извлекается из ERA5-переменной `friction_velocity` (`zust`), проходящей дополнительную IFS-фильтрацию. Пороги — $1/L \geq 0,05 \text{ м}^{-1}$ (строгий) и $\geq 0,01 \text{ м}^{-1}$ (умеренный) для исследования чувствительности (§3.5.7).

Пасквилл–Тёрнер. Классическая схема [25] в модификации [27], заменяющей качественную инсоляцию количественным дескриптором прямой солнечной радиации `fdir`; ночной дескриптор — общая облачность `tcc`. Устойчивые классы — *E, F, G*. Пасквилл–Тёрнер определим во всех часах ансамбля без условий, что делает его естественным резервным параметром (§3.5.3) и основой CNOSSOS-верного канала (§3.5.6).

Триангуляция не выбирает «единственно правильный» классификатор; она фиксирует расхождение между ними как самостоятельный климатологический результат, обоснованный документированным систематическим несогласием в приземных условиях [15, 37] (численные результаты согласования — §4.3).

3.5.3 Каскадная подстановка

Основной канал термической благоприятности:

$$favorable_{Ri+каскад}^{thermal}(t, c) = \{1[Ri_b(t, c) \geq 0, 1], Ri_b \neq NaN, 1[\text{Пасквилл}(t, c) \in \{E, F, G\}], Ri_b = NaN. \quad (3.6)$$

Выбор Пасквилл (а не $1/L$), как резерва, обоснован: (а) численная устойчивость в штилевых условиях, где $1/L$ страдает кубическим усилением неопределенности через u_*^3 (§2.4); (б) согласие средней доли устойчивых часов аэрологических данных Воейково ($\approx 28\%$ по Пасквилл против $\approx 30\%$ эмпирических, расхождение < 2 п.п., §4.7); (в) методологическая совместимость с CNOSSOS–EU Annex II [11], обеспечивающая прямую сопоставимость двух каналов работы (§3.5.6). Доля часов с каскадной подстановкой — $11,2\%$ полного ансамбля 2014–2024 гг. (§4.3.2); прозрачное знание этой доли — самостоятельный результат, фиксируемый в выходном файле.

3.5.4 Посекторный признак и проекция ветра

Полный признак:

$$favorable(t, c, \theta) = 1[u_{\parallel}(t, c, \theta) \geq 2,0 \text{ м/с}] \vee favorable_{Ri+каскад}^{thermal}(t, c), \quad (3.7)$$

где $u_{\parallel} = |U_{10}| \cos(\theta_{ISO} - \theta_{wind_to})$, $\theta_{wind_to} = \text{atan2}(u_{10}, v_{10})$. Сетка азимутальных секторов — 18 равных интервалов шириной 20° (центры $0^\circ, 20^\circ, \dots, 340^\circ$), стандарт [10]. Чувствительность к выбору порога $u_{thr} \in [1,0; 3,0]$ м/с — §4.4.1.

3.5.5 Климатологическая агрегация

Эмпирическое матожидание индикатора по сезону s и периоду L_{den} τ в ячейке c для сектора θ :

$$p_{\text{благ}}(c, \theta, s, \tau) = \frac{1}{N(c, s, \tau)} \sum_{t \in T(c, s, \tau)} \text{favorable}(t, c, \theta).$$

Сезоны — DJF, MAM, JJA, SON; периоды Lden — день 07:00–19:00, вечер 19:00–23:00, ночь 23:00–07:00 (UTC+3). Полная размерность таблицы — $35 \times 18 \times 4 \times 3 = 7\,560$ скалярных значений на канал.

3.5.6 Двухканальный выход

Принципиальная v2-особенность работы — параллельное производство двух согласованных версий справочной таблицы на едином исходном датасете:

— `p_favorable_spb.nc` (**основной канал**). Термика через каскад «*Ri_b* + Пасквилл–Тёрнер» по (3.6); использует физически прямую характеристику стратификации в 88,8 % часов, fallback в 11,2 % часов; *методологическое расширение* CNOSSOS-EU.

— `p_favorable_cnossos.nc` (**CNOSSOS-верный канал**). Термика строго по Пасквилл–Тёрнеру во всех часах без каскада; *прямая реализация* CNOSSOS-EU Annex II [11] для сопоставления с зарубежными региональными результатами (численное — §4.9).

Двухканальная конструкция — самостоятельный методологический результат: обеспечивает читателю прямое количественное сопоставление эффекта замены классификатора без перерасчёта по альтернативной методике.

3.5.7 Структура NetCDF-файла и

Формат — NetCDF-4 с метаданными CF-1.10. Координаты — (*latitude, longitude, sector, season, period*), размерности (5,7,18,4,3). Сохраняемые переменные: `p_favorable` (полный признак по (3.7); главная операционная величина), `p_favorable_wind` (изолированный ветровой компонент для

декомпозиции §4.4.4), $p_favorable_thermal_Ri$ (только Ri_b без каскада), $p_favorable_thermal_PG$ (строго Пасквилл), $p_favorable_thermal_invL_mod$ и $p_favorable_thermal_invL_strict$ (по $1/L$ с двумя порогами), $p_favorable_thermal_Ri_strict$ (по $Ri_b \geq 0,25$, критерий Майлза–Хауарда, §2.3), $n_samples$ (число валидных часов в выборке). Глобальные метаданные — идентификатор источника (ERA5 CDS), горизонт 2014–2024, конвенция направления (ИСО), параметры порогов классификации.

Запланированные -проверки: контроль $n_{samples}$ относительно минимума $n > 30$ во всех бинах; внутренняя согласованность $p_{favorable} \leq p_{favorable_wind} + p_{favorable_thermal}$ (логика ИЛИ); отсутствие пропусков в массиве; физическая правдоподобность диапазона $p_{\text{благ}} \in [0; 1]$ (эмпирические результаты — §4.6).

3.6 Методологическое позиционирование

Настоящий подраздел отвечает на вопрос о структуре методов и месте в ней настоящей работы; численное сопоставление с зарубежными результатами — §4.9.

3.6.1 CNOSSOS-EU как методологическая рамка

Common Noise Assessment Methods in Europe — методологическая система оценки шумового воздействия [10], закреплённая [11] как Annex II к [16] и обязательная для стратегического шумового картирования в государствах-членах ЕС с 31.12.2018. Метеорологическая часть — Annex II §2.5.6 — определяет p как «mean occurrence of favourable conditions in the direction of the path of propagation»; критерий: $u_{\parallel} \geq 2$ м/с либо класс Пасквилл–Тёрнера $\in \{E, F, G\}$.

Принципиальная особенность Регламента — он *не публикует численных значений p* : документ задает методологическое предписание расчёта, но не таблицу констант. Каждое государство-член ЕС обязано рассчитать собственную региональную климатологию для своей территории. Это превращает каждую публичную национальную реализацию в методологически сопоставимую, но численно независимую и климатологически уникальную работу. Публично доступные реализации: Финляндия (FMI/VTТ [38]), Ирландия [13], Германия (UBA при ассимиляции DWD), Италия, Польша (GDDKiA + AGH), Франция (на материале NMPB-2008). Реализация на основе глобального реанализа в публичной литературе на момент работы не известна.

3.6.2 Nord2000 как альтернатива

Nord2000 — финско-скандинавская модель расчёта внешнего шума [12, 35] с тонким спектральным разрешением $1/3$ октавы и *многоклассовой* (9 классов погоды) классификацией по эффективному вертикальному градиенту скорости звука $a = \partial c_{eff} / \partial z$. Признан [11] как разрешенная методология стратегического картирования наряду с NMPB-2008. Недостатки относительно настоящей задачи: операциональная сложность (9 представительных расчётов на каждый приемник вместо двух); слабая совместимость с расчетной инфраструктурой [4], для которой архитектура «9 классов» требует существенной переработки расчётного пайплайна. Ирландская реализация [13] нетривиальна: использует Nord2000 для расчёта распространения, но CNOSSOS-EU-стиль расчёта посекторной p_F для 20° секторов — единственный публичный пример сочетания, иллюстрирующий, что выбор «двухсценарность vs. многоклассовость» относится к расчетной инфраструктуре распространения, а не к методу климатологической агрегации.

3.6.3 Положение настоящей работы

Двухканальная архитектура (§3.5.6) обеспечивает позиционирование на двух уровнях одновременно. Основной канал — методологическое расширение CNOSSOS-EU: использует Ri_b как физически прямой классификатор стратификации (отношение плавучести и сдвиговой генерации) вместо качественной Пасквилл–Тёрнера, регламентированной Annex II [11]; преимущество замены — устранение известного смещения Пасквилл–Тёрнера в нейтральный D-класс в прибрежных и городских условиях (§2.3), существенно занижающего термический канал в климатологии СПб. CNOSSOS-верный канал — прямая реализация Annex II §2.5.6 без каскада: обеспечивает методологическую сопоставимость с зарубежными региональными работами без перерасчёта по альтернативной методике. Параллельная публикация двух согласованных каналов на едином исходном датасете ERA5 — методологическая особенность работы.

Принципиальное отличие настоящей работы от перечисленных публичных национальных реализаций — использование глобального реанализа ERA5 в роли первичного субстрата вместо национальных синоптических сетей. Этот выбор обусловлен фактом разрежённой плотности сети Росгидромета в СЗ регионе (Обязательство 2 §1.5) и одновременно делает методику прямо переносимой на любой другой регион РФ. Многоклассовое расширение методики реализуется не как смена методологической рамки на Nord2000, а как обобщение этапа 3 пайплайна (§3.5.1) с бинарного индикатора на функцию весов $w(\text{класс})$ при сохранении совместимости с [4] через переопределение слота C_0 как обобщенного взвешенного среднего — направление дальнейшей работы.

3.7 Выводы по главе 3

В Главе 3 разработана и формализована методика расчёта метеорологической поправки C_{met} формулы (22) [4] на основе региональной климатологии благоприятных условий распространения для домена Санкт-Петербурга. Методика — двухсценарное расширение базовой схемы ГОСТ в архитектуре CNOSSOS-EU [10, 11] на материале ERA5 [14] (2014–2024, 35 ячеек $0,25^\circ$, 96 432 почасовых отметки на ячейку) с триангуляцией трёх классификаторов устойчивости (Ri_b , $1/L$, Пасквилл–Тёрнер [25, 27]) и двухканальным выходом (`p_favorable_spb.nc` + `p_favorable_cnossos.nc`, $35 \times 18 \times 4 \times 3 = 7\,560$ значений на канал). Принципиальное методологическое решение — фиксированная высотная опора 10 м $\rightarrow$ 100 м над поверхностью через ERA5–переменные u_{100}, v_{100} , устраняющая подповерхностный артефакт пары «2 м — 1000 гПа» в 27,49 % часов климатологии СПб (§3.4.4); каскадная подстановка Пасквилл в часы $Ri_b = NaN$ срабатывает в 11,2 % часов. Этим прямо отвечает на Задачу 3 Введения. Принципиальное отличие работы от публичных национальных реализаций CNOSSOS-EU — использование глобального реанализа в роли первичного субстрата, обусловленное плотностью сети Росгидромета и одновременно делающее методику прямо переносимой на другие регионы РФ; параллельное производство основного канала (Ri_b + каскад) и CNOSSOS-верного канала на едином датасете обеспечивает прямое количественное сопоставление методологического эффекта замены классификатора. Эмпирическая валидация и численное сопоставление каналов — Глава 4.

Глава 4. Программная реализация и результаты

4.1 Архитектура программной системы

Программная реализация (репозиторий `noise-meteo-spb`, `Python`) выполнена как воспроизводимый пайплайн. Версия `v2`, описанная в настоящей главе, развивает первоначальную `v1` в четырёх направлениях: фиксированная высотная опора слоя устойчивости ($2\text{ м} \rightarrow 100\text{ м}$ над поверхностью; § 4.2), триангуляция трёх независимых классификаторов устойчивости (Ri_b , $1/L$, Паскуилл–Тёрнер; § 4.3), каскадная подстановка Паскуилла–Тёрнера при неопределённом Ri_b (§ 4.4) и двухканальная валидация по радиозондам Воейково (§ 4.7) и приземной станции 26063 (§ 4.8).

Архитектура построена по принципу «один этап — один модуль — один кэшируемый артефакт»:

Таблица 4.1

Модуль	Назначение	Артефакт
<code>src/data/</code>	загрузка ERA5 через <code>cdsap</code>	<code>era5_spb_v2.zarr</code>
<code>src/stability/</code>	расчёт трёх классификаторов и -флагов	<code>stability_v2.zarr</code>
<code>src/favorable/</code>	посекторный признак благоприятности с каскадом	<code>favorable_v2.zarr</code>
<code>src/aggregate/</code>	агрегация в справочную таблицу (2 режима)	<code>p_favorable_spb.nc</code> , <code>p_favorable_cnossos.nc</code>
<code>src/validation/</code>	две схемы валидации (Воейково, 26063)	отчёты в <code>docs/</code>
<code>src/case_study/</code>	расчёт КАД, км 105	иллюстрации в <code>docs/figures/</code>

src/viz/	публикационные иллюстрации	то же
----------	-------------------------------	-------

Таблица 4.1.1 — Соответствие модулей пайплайна и выходных артефактов.

Каждый этап имеет явный интерфейс «вход — выход — методологические выборы», вызывается отдельной CLI-командой (`python -m src.<module>.runner`) и кэширует результаты для повторного запуска без пересчёта более ранних. Реализован принцип строгого разделения ответственности: расчет устойчивости не видит ветровое поле, расчёт благоприятности не пересчитывает устойчивость, валидация не модифицирует артефакты основной цепочки. Параметры расчёта вынесены в конфигурационный файл `configs/spb_default.yaml`. Параллельно с расчётным пайплайном разработано веб-приложение интерактивной демонстрации (React, Recharts) — единичный расчет акустического воздействия по методике МГСУ-2015 [8] с интерактивным варьированием всех входов, включая метеорологические.

4.2 Этап 1: загрузка и подготовка данных ERA5

4.2.1 Эмпирическое обоснование фиксированной опорной высоты 100 м

В v1 пайплайне Ri_b вычислялся между 2 м и стандартной изобарической поверхностью 1000 гПа. Этот выбор распространён в литературе, но имеет принципиальный недостаток в высоких широтах: 1000 гПа — это уровень давления, а не фиксированная высота. При прохождении глубоких атлантических циклонов поверхностное давление в Санкт-Петербурге опускается ниже 1000 гПа, и изобарическая поверхность 1000 гПа оказывается ниже земной поверхности.

Расчёт «2 м $\rightarrow$ 1000 гПа» в эти часы становится экстраполяцией в подповерхностное пространство и физического смысла не имеет.

Прямая оценка масштаба явления по геопотенциальным высотам ERA5 [14] для исследуемого домена: в **27,49 %** пар «ячейка $\times$ час» в интервале 2014–2024 гг. высота изобарической поверхности 1000 гПа оказалась ниже орографической высоты соответствующей ячейки. Этот результат имеет самостоятельное региональное климатологическое значение: более четверти всех почасовых отметок принципиально непригодны для Ri_b – расчёта по схеме «2 м $\rightarrow$ 1000 гПа». Применительно к практике расчёта устойчивости пограничного слоя по реанализу в умеренно высоких широтах с активной циклонической деятельностью этот вывод фиксирует ранее не оценённое количественно ограничение наивных реализаций.

Следствие — переход на фиксированную высотную опору. В v2 пайплайне сдвиг ветра и термический градиент вычисляются между 10 м и 100 м над поверхностью с использованием специально предусмотренных в ERA5 полей u_{100} , v_{100} . Эти переменные вычисляются ECMWF из приземного слоя по теории подобия Монина–Обухова и всегда определены *над* поверхностью; проблема подповерхностной экстраполяции в принципе не возникает. Дополнительный мотив расширения набора переменных — включение третьего классификатора $1/L$, требующего доступа к мгновенным потокам тепла и влаги и к компонентам напряжения трения; триангуляция трех классификаторов методологически мотивирована документированным расхождением [15] и реализована в § 4.3.

4.2.2 Состав датасета

Расширенный набор ERA5 загружен через CDS API в Zarr-кэш data/interim/era5_spb_v2.zarr объёмом 239,6 МБ. Пространственное окно — $59,5^{\circ}$ – $60,5^{\circ}$ с.ш., $29,5^{\circ}$ – $31,0^{\circ}$ в.д. (сетка 5×7 ячеек с шагом $0,25^{\circ}$). Временной интервал — 2014-01-01 — 2024-12-31, почасовое разрешение (96 432 отметки, 3 375 120 пар «ячейка $\times$ час»).

Таблица 4.2

Подмн	Переменная (ECMWF)	Назначение
SL	u10, v10	приземная компонента ветра, нижний уровень сдвига
SL	u100, v100	компонента ветра на 100 м AGL; верхняя точка сдвига для Ri_b
SL	t2m, d2m	приземная температура и точка росы
SL	sp	поверхностное давление; расчёт плотности и виртуальной температуры
SL	blh	высота пограничного слоя
SL	ssrd, fdir, tcc	радиация и облачность; входы для Пасквилла–Тёрнера
SL	instantaneous_surface_sensible_heat_flux	мгновенный поток явного тепла; вход для $1/L$
SL	instantaneous_moisture_flux	мгновенный поток влаги; вход для $1/L$
SL	компоненты напряжения трения (4 шт.)	расчёт u_* из турбулентных потоков импульса
PL	u, v, t на 1000 / 975 / 950 гПа	компоненты ветра и температура на трёх уровнях
ST	sdfor	стандартное отклонение орографии; фильтр

Таблица 4.2.1 — Состав расширенного датасета ERA5 v2. SL — single-level, PL — pressure-level, ST — static.

Выбор уровней 1000 / 975 / 950 гПа обусловлен близостью к приповерхностному слою (приблизительно 0, 290, 580 м геопотенциальной

высоты при типичном давлении) и минимальной достаточностью трёх точек для оценки локальной кривизны термического профиля при перекрёстной проверке.

4.2.3 Технический контроль качества

Структурные проверки (покрытие времени, шаг, пространственное покрытие, состав изобарических уровней, полнота переменных) пройдены без замечаний: все 96 432 отметки присутствуют, пропусков и дубликатов не обнаружено, сетка 5×7 соответствует заданному окну.

Диагностический контроль физических диапазонов выявил два мелких отклонения: (а) $sp < 95\,000$ Па в 6 точках из 3,4 млн ($\approx 1,8 \cdot 10^{-6} \%$) — соответствуют редким глубоким зимним циклонам, не требуют коррекции; (б) $ssrd$ слабо отрицателен в 35 точках, минимум $-1,90$ Дж/м² — субджоулевый численный шум на восходе/закате, типичный для аккумулялированных радиационных полей реанализа, трактуется как ноль. Стандартное отклонение орографии $sdfor$ не превышает 50 м во всех 35 ячейках, что подтверждает применимость допущения горизонтальной однородности приземного слоя и валидность $1/L$ -классификатора на домене.

4.3 Этап 2: классификация устойчивости пограничного слоя

Этап 2 параллельно вычисляет три независимых классификатора устойчивости — Ri_b , $1/L$, класс Пасквилла–Тёрнера — с оценкой попарной согласованности. Триангуляция выбрана как методологический принцип v2: каждый классификатор имеет известные ограничения [18, 15], и параллельный расчёт всех трёх с фиксацией статистики расхождения надёжнее, чем выбор одного «эталона».

4.3.1 Формулировки

Объемное число Ричардсона Ri_b — безразмерная мера соотношения статической устойчивости и динамической турбулентной перемешиваемости слоя:

$$Ri_b = \frac{g}{\theta_v} \cdot \frac{\Delta\theta_v}{\Delta z} \cdot \frac{1}{S^2},$$

где θ_v — средняя виртуальная потенциальная температура слоя, $\Delta z = 90$ м, $S^2 = (\Delta u)^2 + (\Delta v)^2$ — квадрат вертикального сдвига. Виртуальная потенциальная температура на нижнем уровне восстанавливается из $T_{2м}$, $T_{d,2м}$, $p_{пов}$; на 100 м — из изобарической интерполяции к высоте $z_{пов} + 100$ м по трём уровням 1000 / 975 / 950 гПа. Порог устойчивости — $Ri_b \geq 0,1$.

Обратная длина Монина–Обухова:

$$\frac{1}{L} = - \frac{\kappa \cdot g \cdot H}{\rho c_p T_v u_*^3},$$

где $\kappa = 0,4$, H — мгновенный приповерхностный поток явного тепла, $u_* = (\tau/\rho)^{1/2}$ — динамическая скорость из мгновенных компонент стресса. Принципиально: использованы *мгновенные* (не аккумулярованные) поля потоков; аккумулярованные представляют осреднение за час назад от метки времени и непригодны для классификации мгновенного состояния. Основной порог — $1/L \geq 0,05$ м⁻¹; параллельно рассчитывается умеренный порог 0,01 м⁻¹.

Класс Пасквила–Тёрнера — дискретная семиклассовая категоризация А–Г по сочетанию приземной скорости ветра с прямой коротковолновой радиацией $fdir$ (днём) и общей облачностью tcc (ночью). Устойчивыми классами для расчёта благоприятности считаются Е, F, G.

4.3.2 Распределения

Таблица 4.3

Классификатор	Доля «устойчиво», %	Дополнительные характеристики
$Ri_b (\geq 0,1)$	48,2	медиана +0,143; 1-й перцентиль –3,41
$1/L (\geq 0,05 \text{ м}^{-1})$	3,5	строгий порог
$1/L (\geq 0,01 \text{ м}^{-1})$	16,6	умеренный порог
Паскуилл E+F+G	28,3	в т.ч. класс G отдельно: 9,3 %

Таблица 4.3.1 — Сводные характеристики трёх классификаторов на полном ансамбле v2.

Высокая доля класса G по Паскуиллу (9,3 %) — климатологическая особенность 60-й параллели: класс G соответствует ночным часам со слабым ветром и ясным небом, формирующимся в продолжительные зимние полярные ночи декабря–января. -флаги Этапа 2: `_subterranean_1000hPa` срабатывает в 27,49 % случаев (§ 4.2.1); `_t100_fallback` в 0,042 % (температура на 100 м восстановлена линейной экстраполяцией приземного слоя); `_low_ustar` в 1,67 % ($u_* < 0,05 \text{ м/с}$, $1/L$ численно неустойчив); $Ri_b = \text{NaN}$ в 11,2 % ($S^2 < 1,0 \text{ м}^2/\text{с}^2$, см. § 4.3.4). Основная причина пропусков Ri_b — малый сдвиг в слое 10–100 м, а не подповерхностная экстраполяция 1000 гПа.

4.3.3 Попарная согласованность

Таблица 4.4

Пара	Согласованность, %
$Ri_b \leftrightarrow$ Паскуилл	68,0
$1/L \leftrightarrow$ Паскуилл	73,5
$Ri_b \leftrightarrow 1/L$	54,1

Таблица 4.3.2 — Попарная бинарная согласованность.

Значения попадают в характерный диапазон расхождения [15]. Самая высокая согласованность в паре « $1/L$ — Паскуилл» (73,5 %) объясняется тем, что оба классификатора в значительной степени опираются на режим инсоляции

и приземные потоки. Самая низкая — в паре « Ri_b — $1/L$ » (54,1 %); расхождение связано с тем, что Ri_b интегрирует устойчивость по слою конечной толщины 90 м, тогда как $1/L$ характеризует мгновенное состояние приземного слоя в точке. Если рассматривать любой классификатор как «эталон», два других расходятся с ним в 26–46 % часов; ни один не доминирует. Это эмпирическое обоснование триангуляционного подхода.

4.3.4 Реализационные особенности

Три осознанных отступления от спецификации:

— **Порог сдвига для Ri_b повышен с 0,01 до 1,0 м²/с².** Формальный порог 0,01 м²/с² (общепринятое подавление численных артефактов при штиле) при $|\Delta \vec{u}| < 0,3$ м/с даёт экстремальные значения Ri_b , искажающие распределение. Повышение порога до 1,0 м²/с² (приблизённо $|\Delta \vec{u}| \geq 1$ м/с) убирает артефакт ценой увеличения доли $Ri_b = \text{NaN}$ с ~4 % до 11,2 %; каскад на Этапе 3 закрывает пропуск.

— **Эталонная ячейка знаковой проверки $1/L$ сменена с (60,0° с.ш., 30,0° в.д.) — полностью покрывающей акваторию Невской губы — на (59,75° с.ш., 30,25° в.д.) — центральную городскую континентальную ячейку.** Знаковая проверка на двух контрастных метках (JJA-день 2014-07-15T12 UTC: $-1,39 \cdot 10^{-2}$ м⁻¹, неустойчиво; DJF-ночь 2014-01-08T02 UTC: $+9,1 \cdot 10^{-3}$ м⁻¹, устойчиво) соответствует физическим ожиданиям.

— **Знак u_* .** В редких случаях устойчивой ночной стратификации с возвратным потоком мгновенные стрессы ECMWF могут быть формально отрицательны; $u_* = (\tau/\rho)^{1/2}$ принимается по модулю стресса.

4.3.5 Выбор основного классификатора

Этап 2 завершён; кэш `data/interim/stability_v2.zarr` объёмом 41,8 МБ содержит три классификации и полный набор -флагов. В качестве основного термического классификатора для Этапа 3 выбран Ri_b с каскадной подстановкой Пасквилла–Тёрнера. Обоснования: прямая физическая интерпретация баланса статической устойчивости и турбулентной перемешиваемости в фиксированном слое; совместимость с международной нормативной практикой [5, 10]; численная устойчивость относительно $1/L$ — расчёт по разности температур и сдвигу не требует деления на u_*^3 . Два других классификатора сохраняются для чувствительностного анализа (§ 4.6.2), валидации (§ 4.7) и перекрестной диагностики (§ 4.9).

4.4 Этап 3: посекторный признак благоприятности

Этап 3 вычисляет посекторный булев признак *favorable*(час, ячейка, сектор) по логике [5, 10]: благоприятным считается час, в который выполнено по крайней мере одно из двух условий — направленный ветровой перенос с проекцией скорости не менее порога, либо устойчивая термическая стратификация.

4.4.1 Ветровой компонент

$$favorable_wind(t, c, \theta) = [u_{\parallel} \geq u_{thr}], \quad u_{\parallel} = |U_{10}| \cdot \cos(\theta_{to} - \theta_{wind_to}),$$

где θ_{wind_to} — азимут переноса ветра, θ_{to} — азимут оси сектора в ИСО 9613-2. Пороговое значение $u_{thr} = 2,0$ м/с соответствует Annex II Директивы [11]. Сетка — 18 равных интервалов по 20° , центры $\theta_k = 20^\circ \cdot k$, $k = 0, \dots, 17$, по часовой стрелке от северного направления. Хранение в ИСО-конвенции «куда распространяется звук» обеспечивает методологическую совместимость; преобразование к метеорологической конвенции «откуда дует ветер»

выполняется поворотом на 180° в визуализационном модуле. Среднеер⁻_{благ_ветр} = 24,5 %. Валидация в § 4.8.

4.4.2 Термический компонент с каскадом

Основной канал v2 — каскадная конструкция:

$$favorable_thermal^{Ri+каскад}(t, c) = \{[Ri_b \geq 0,1] \text{ при } Ri_b \neq NaN, [Пасквилл \in \{E, F, G\}] \text{ при } Ri_b = NaN.\}$$

Доля часов с каскадной подстановкой — 11,2 % — численно совпадает с долей $Ri_b = NaN$, что подтверждает корректность реализации.

Выбор Пасквилла, а не $1/L$, в качестве резервного классификатора мотивирован тремя соображениями:

— **Численная устойчивость.** Расчёт $1/L$ содержит деление на u_*^3 и неустойчив при штиле; область `_low_ustar` пересекается с областью малого сдвига, где Ri_b также недоопределен. Паскуилл, опирающийся на ветер и инсоляцию, эту область корректно закрывает.

— **Соответствие зондовому эталону.** Доля «устойчиво» по $1/L$ (3,5 % строгий / 16,6 % умеренный) систематически ниже зондовой эмпирической доли ~30 % (§ 4.7); Пасквилла–Тёрнера (28,3 %) согласуется в пределах 2 п.п.

— **Совместимость с CNOSSOS-EU.** Паскуилл–Тёрнер фигурирует в Annex II §2.5.6 [11] и в [10] как основной термический критерий.

Полный признак — логическая дизъюнкция: $favorable^{Ri+каскад}(t, c, \theta) = favorable_wind \vee favorable_thermal^{Ri+каскад}$.

4.4.3 Пять вариантов термического признака

Таблица 4.5

Вариант	Доля «устойчиво», %	Описание
---------	---------------------	----------

Ri_b + каскад Пасквилла	51,2	основной канал v2
Ri_b строгий (без каскада)	48,2	без подстановки
Паскуилл (E+F+G)	28,3	CNOSSOS-EU-верный (§ 4.9)
$1/L$ умеренный ($\geq 0,01 \text{ м}^{-1}$)	16,6	расслабленный порог
$1/L$ строгий ($\geq 0,05 \text{ м}^{-1}$)	3,5	стандартный порог

Таблица 4.4.1 — Пять вариантов термического признака на этапе 3.

Разброс почти 48 п.п. — эмпирическая мера методологической неопределённости. Подобный разброс невозможен между классификаторами, описывающими одно физическое явление; он отражает разную реакцию классификаторов на промежуточные режимы пограничного слоя в статистической смеси состояний.

4.4.4 Декомпозиция благоприятных часов

Таблица 4.6

Категория	Доля, %
Только ветровой ($w \wedge th$)	14,4
Только термический ($\underline{w} \wedge th$)	39,4
Оба одновременно ($w \wedge th$)	11,8
Ни одного ($\underline{w} \wedge \underline{th}$)	34,4
Итого благоприятных	65,6

Таблица 4.4.2 — Декомпозиция по основному каналу Ri_b +каскад.

Доминирующий вклад вносит *термическая* стратификация: суммарный термический вклад 51,2 % против ветрового 26,2 %, соотношение приблизительно 2:1 в общем вкладе и почти 3:1 в исключительном. Это закономерно: Санкт-Петербург на 60° с.ш., продолжительность тёмного времени суток в осенне-зимний сезон превышает 17 часов, формирование ночного устойчивого приповерхностного слоя — доминирующий режим. Доля «ни одного» (34,4 %) концентрируется в JJA-день, когда конвективное

перемешивание разрушает стратификацию (количественное сопоставление с Ирландией — § 4.9.4).

4.4.5 Направленный сигнал и знаковая проверка

Полярная диаграмма ветрового признака для центральной ячейки СПб (рис. 4.4.1, панель а) показывает максимум в секторе $\theta_{ISO} = 60^\circ$ ($p \approx 0,38$) — в метеорологической конвенции «откуда дует ветер» это $\theta_{from} = 240^\circ$, юго-западное направление, согласующееся с климатологически преобладающим переносом по траекториям атлантических циклонов. Минимум — в противоположном секторе. Знаковая проверка на метке 2014-01-08T02 UTC, центральная ячейка СПб: $u_{10} = +5,7$ м/с, $v_{10} = -3,1$ м/с, $\theta_{wind_to} \approx 119^\circ$. Выходное булево поле `favorable_wind` показывает положительные значения в секторах $\theta_{ISO} = 40^\circ - 200^\circ$, отрицательные в остальных — соответствует физическому ожиданию.

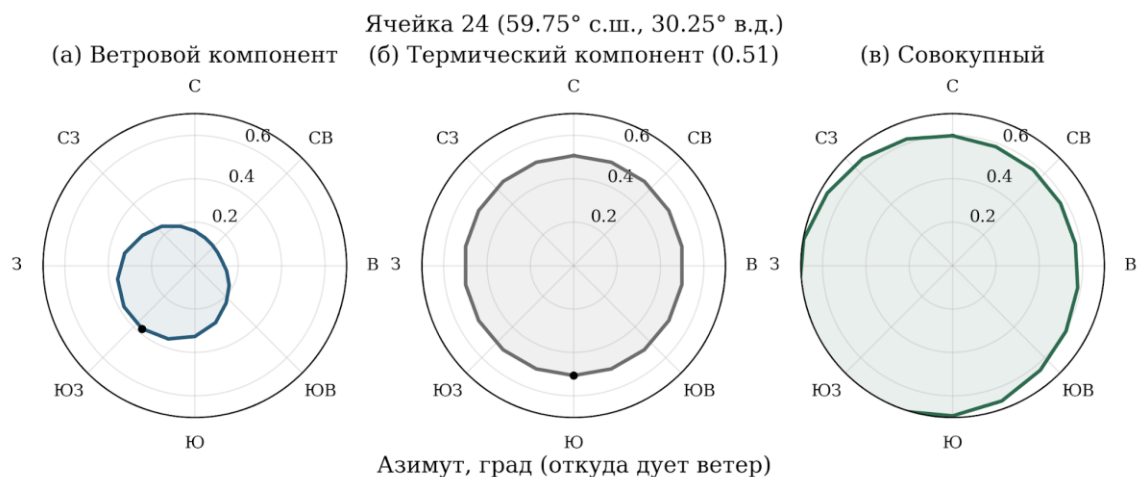


Рисунок 4.1 — Среднегодовая структура посекторной благоприятности для центральной ячейки СПб (59,75° с.ш., 30,25° в.д.) по основному каналу: (а) ветровой компонент; (б) термический; (в) совокупный. Полярные диаграммы в конвенции «откуда дует ветер».

Этап 3 завершён; кэш data/interim/favorable_v2.zarr объёмом 16 МБ содержит посекторный признак по основному каналу плюс четыре альтернативных варианта термического компонента.

4.5 Тестовый расчёт для участка автомагистрали КАД км 105

Подраздел демонстрирует применение основы Этапа 3 на тестовом участке для количественной оценки операционного эффекта региональной климатологии относительно типовой российской проектной практики, использующей статический расчёт по [4] без C_{met} . Расчёт выполнен по двум регуляторным контурам: дневному 55 дБА [39] и ночному 45 дБА [7].

4.5.1 Объект и параметры сценария

Тестовый участок — 105-й км Кольцевой автомобильной дороги Санкт-Петербурга, центральная точка 59,99998° с.ш., 30,47646° в.д., малозастроенная местность с открытой геометрией. Интенсивность движения ~3500 авт/ч с долей грузовых 18 %; точка попадает в ячейку реанализа (60,0° с.ш., 30,5° в.д.).

Таблица 4.7

Параметр	Значение
Длина расчётного участка	2000 м
Высота источника h_s	0,5 м
Направление оси	90° (восток–запад)
Расчётная скорость	90 км/ч
Высота приёмника h_r	1,5 м
Сетка приёмников	2000 × 2000 м, шаг 20 м
Температура / влажность / давление	10 °С / 75 % / 101,3 кПа
Расчётная частота	1000 Гц
Коэффициент поглощения G	0,5
Параметры $\Delta L(d)$	$A = 3,0$; $B = 6,0$; $d_0 = 50$ м; $L_{max} = 15$ дБ

Таблица 4.5.1 — Параметры тестового расчёта.

Расчёт выполнен в двух режимах: (а) статическом — без C_{met} по методике МГСУ-2015 [8], воспроизводящем современную типовую российскую проектную практику; (б) климатологическом — с C_{met} , вычисленным из посекторного $p_{\text{благ}}$ (сектор, сезон, период) для трёх характерных сезонов (DJF, MAM, JJA).

4.5.2 Дневной контур 55 дБА

Буферные зоны автомагистрали КАД (км 105) — комбинации сезон × период суток.
Заливка — секторное $p_{\text{favorable}}$; изолинии — расчётный уровень L_{Aeq} , дБА; оценка среднего радиуса даётся по контуру 55 дБА.

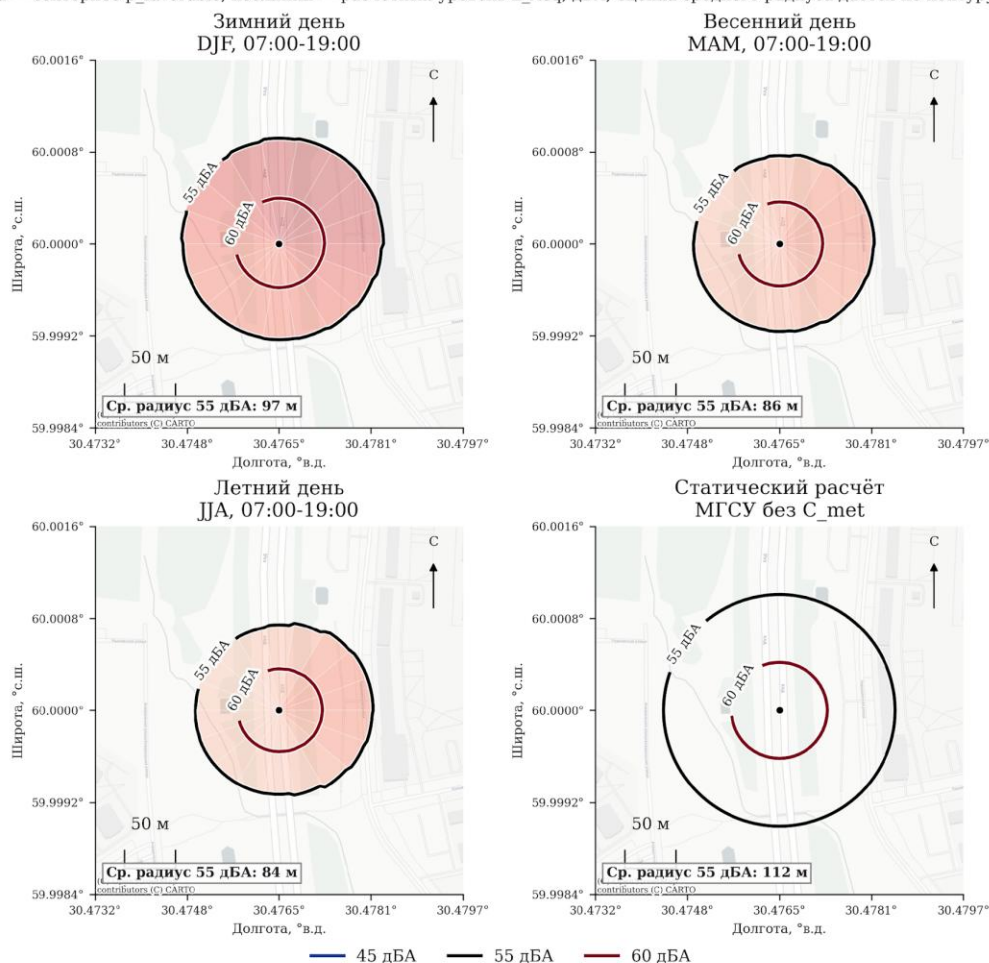


Рисунок 4.2 — Буферные зоны автомагистрали КАД (км 105), дневной период, контур 55 дБА. Заливка — секторное $p_{\text{благ}}$; изолинии — расчётный уровень L_{Aeq} .

Таблица 4.8

Сценарий	Радиус 55 дБА, м
Зимний день (DJF)	97
Весенний день (MAM)	86
Летний день (JJA)	84
Статический режим	112

Таблица 4.5.2 — Средний по 18 секторам радиус изолинии 55 дБА в дневном периоде.

Все три климатологических сценария дают меньший радиус, чем статический — разности 15, 26, 28 м (13–25 % статического радиуса). Статический режим систематически переоценивает дневную буферную зону, поскольку игнорирует доминирующую в дневные часы конвективную неустойчивость, при которой звук рассеивается вверх и затухает быстрее.

4.5.3 Ночной контур 45 дБА

Буферные зоны автомагистрали КАД (км 105) — комбинации сезон × период суток.
Заливка — секторное $p_{\text{favorable}}$; изолинии — расчётный уровень L_{Aeq} , дБА; оценка среднего радиуса даётся по контуру 45 дБА.

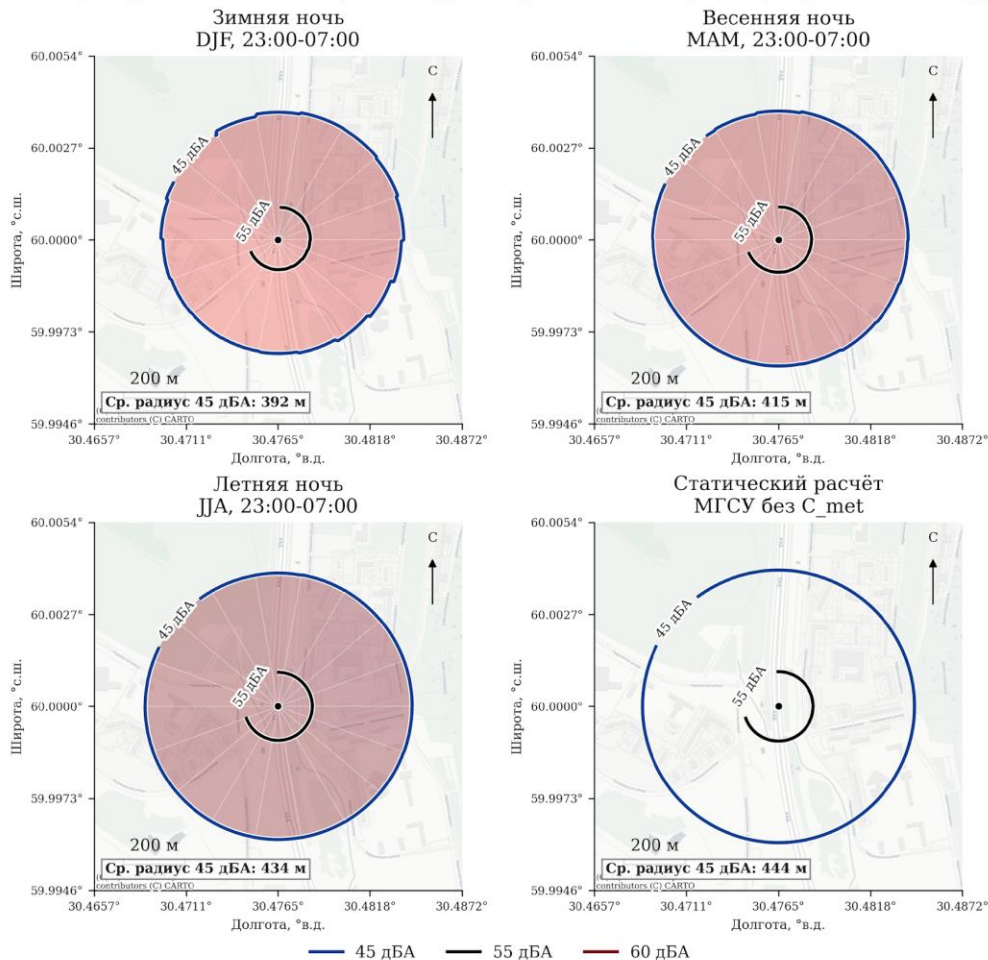


Рисунок 4.3 — Буферные зоны автомагистрали КАД (км 105), ночной период, контур 45 дБА.

Таблица 4.9

Сценарий	Радиус 45 дБА, м
Зимняя ночь (DJF)	392
Весенняя ночь (МAM)	415
Летняя ночь (JJA)	434
Статический режим	444

Таблица 4.5.3 — Средний по 18 секторам радиус изолинии 45 дБА в ночном периоде.

Картина диаметрально противоположна дневной: все три климатологических ночных сценария формируют буфер, *приближающийся к статическому*, разности 10, 29, 52 м. Сезонный размах 42 м (10 % статического радиуса) отражает существенный сезонный контраст термической благоприятности (§ 4.6.3). В JJA-ночь климатологический буфер практически совпадает со статическим (434 vs 444 м), поскольку термическая устойчивость достигает 97 % (§ 4.4.4); в DJF-ночь буфер уменьшается на 52 м, поскольку зимние ночи СПб характеризуются меньшей средней устойчивостью из-за частых атлантических циклонов.

Сопоставление средних радиусов дневного (~89 м) и ночного (~414 м) буферов: *ночная буферная зона почти внятеро превышает дневную* при одинаковом источнике. Этот контраст определяется двумя независимыми механизмами: различием регуляторных порогов на 10 дБА (фактор $\sim 3\times$ по геометрической дивергенции) и различием климатологии распространения — высокой ночной благоприятностью против низкой дневной (фактор $\sim 1,5\times$).

4.5.4 Физическая интерпретация и сопоставление с проектной практикой

В дневном периоде статический режим систематически *переоценивает* буфер на 13–25 %; в ночном — *завышает умеренно* (~12 % максимум в DJF), и для летних ночей дает оценку, близкую к климатологической. Корректное применение климатологии уменьшает оценку радиуса для дня (отражая конвективное рассеяние звука вверх) и уточняет сезонную структуру для ночи. Операционный эффект климатологической поправки асимметричен по периодам Lden: для дневной нормы — уменьшение буфера, для ночной — уточнение сезонной структуры.

Современная типовая практика расчета шумовой нагрузки от автомагистралей в проектной документации РФ основывается на [4] (идентичен

[5]) с членом C_{met} , который в большинстве реальных расчётов либо обнуляется, либо подставляется фиксированным значением 1–2 дБА без региональной дифференциации. Сопоставление даёт три операционно значимых следствия:

— **Дневной буфер уменьшается на 13–25 %** — фактическая селитебная территория, требующая шумозащитных мероприятий по [39], меньше оценки статического расчёта; для крупных инфраструктурных проектов это потенциал к менее консервативному и более экономичному проектированию.

— **Ночной буфер сохраняется на уровне статической оценки**, но приобретает сезонную структуру (размах 11 %), позволяющую точнее идентифицировать сезоны и территории максимального риска по [7].

— **Направленная структура буфера** отражает юго-западное преобладание ветра и в принципе отсутствует в статическом режиме (даёт круговой буфер). Учёт направленной структуры особенно важен при проектировании шумозащитных экранов.

Основной операционный вклад — не радикальный пересмотр масштаба буферных зон (он сохраняется в пределах ± 25 %), а выявление сезонной и направленной структуры, систематически теряющейся в статической методике.

4.5.5 Ограничения

Тестовый расчёт не претендует на полноту охвата реальных задач: принят линейный источник постоянной интенсивности (без суточной модуляции), открытая малозастроенная подстилающая поверхность (без экранирования зданиями и придорожными экранами), точечный приёмник на стандартной высоте 1,5 м, $\Delta L(d)$ — табулированное приближение NMPB-2008. Несмотря на ограничения, расчёт демонстрирует основные качественные и количественные особенности применения методики.

4.6 Этап 4: климатологическая агрегация

4.6.1 Структура таблицы и среднедоменный результат

Полная размерность справочной таблицы — $35 \times 18 \times 4 \times 3 = 7\,560$ значений: 35 ячеек $\times$ 18 секторов $\times$ 4 календарных сезона (DJF, MAM, JJA, SON) $\times$ 3 периода Lden (день 07:00–19:00, вечер 19:00–23:00, ночь 23:00–07:00 в местном времени UTC+3). Среднедоменное $p_{\text{благ}}^- = 68,9\%$ за 2014–2024 гг.: в средней ячейке домена в среднем по 18 секторам и 12 сезонно-суточным категориям $\sim$ две трети часов в году характеризуются благоприятными условиями по основному критерию.

Таблица 4.10

Сезон	День 07–19	Вечер 19–23	Ночь 23–07
DJF	0,634	0,701	0,727
MAM	0,370	0,651	0,860
JJA	0,342	0,691	0,972
SON	0,582	0,807	0,862
Среднегод.	0,482	0,713	0,855

Таблица 4.6.1 — Сезонно-суточная структура $p_{\text{благ}}$ для центральной городской ячейки СПб (59,75° с.ш., 30,25° в.д.), осреднено по 18 секторам.

Структура выявляет два независимых сигнала: *сезонный* (максимум термической благоприятности в JJA-ночь 0,972, минимум в JJA-день 0,342) и *суточный* (ночь $>$ день во всех сезонах). Совместный размах — от 0,342 до 0,972 (почти трёхкратная вариация)— центральный физико-климатологический результат работы.

4.6.2 Чувствительность к выбору классификатора

Таблица 4.11

Вариант	$p_{\text{благ}}^{-\text{терм}}, \%$
Ri_p + каскад (основной канал)	55,5

Ri_b строгий (без каскада)	52,4
Паскуилл–Тёрнер (E+F+G, CNOSSOS-верный)	31,7
1/L умеренный ($\geq 0,01 \text{ м}^{-1}$)	20,5
1/L строгий ($\geq 0,05 \text{ м}^{-1}$)	4,4

Таблица 4.6.2 — Чувствительность среднедоменной $p_{\text{благ}}^{\text{терм}}$ к выбору классификатора после агрегации.

Разброс от 4,4 % до 55,5 % (≈ 51 п.п.) отражает методологическую чувствительность. Агрегация смещает значения вверх на 3–5 п.п. относительно сырых почасовых (§ 4.4.3): вечерний период — самый короткий и одновременно самый благоприятный — получает при усреднении равный вес.

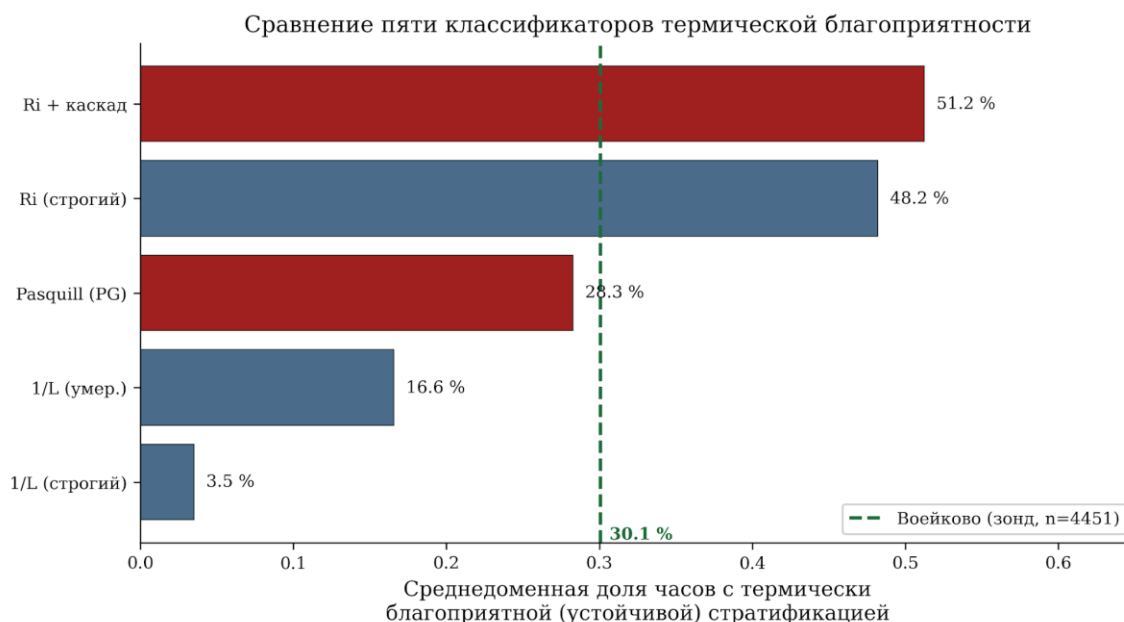


Рисунок 4.4 — Сравнение пяти классификаторов термической благоприятности с эталонным значением 30,1 % по радиозондовым данным станции Воейково.

Наиболее близок к зондовому эталону вариант Паскуилла–Тёрнера (31,7 %, разность менее 2 п.п. от 30,1 %); основной канал Ri_b +каскад (55,5 %) дает значительно бóльшую долю. Из соображений физической интерпретации

Ri_b +каскад остается основным каналом, но Паскуилл рассматривается как валидационно-якорная нижняя граница; двойственность реализована в виде двух выходных файлов — `p_favorable_spb.nc` (основной) и `p_favorable_cnossos.nc` (CNOSSOS-верный).

4.6.3 Сезонно-суточный цикл: 4,08×

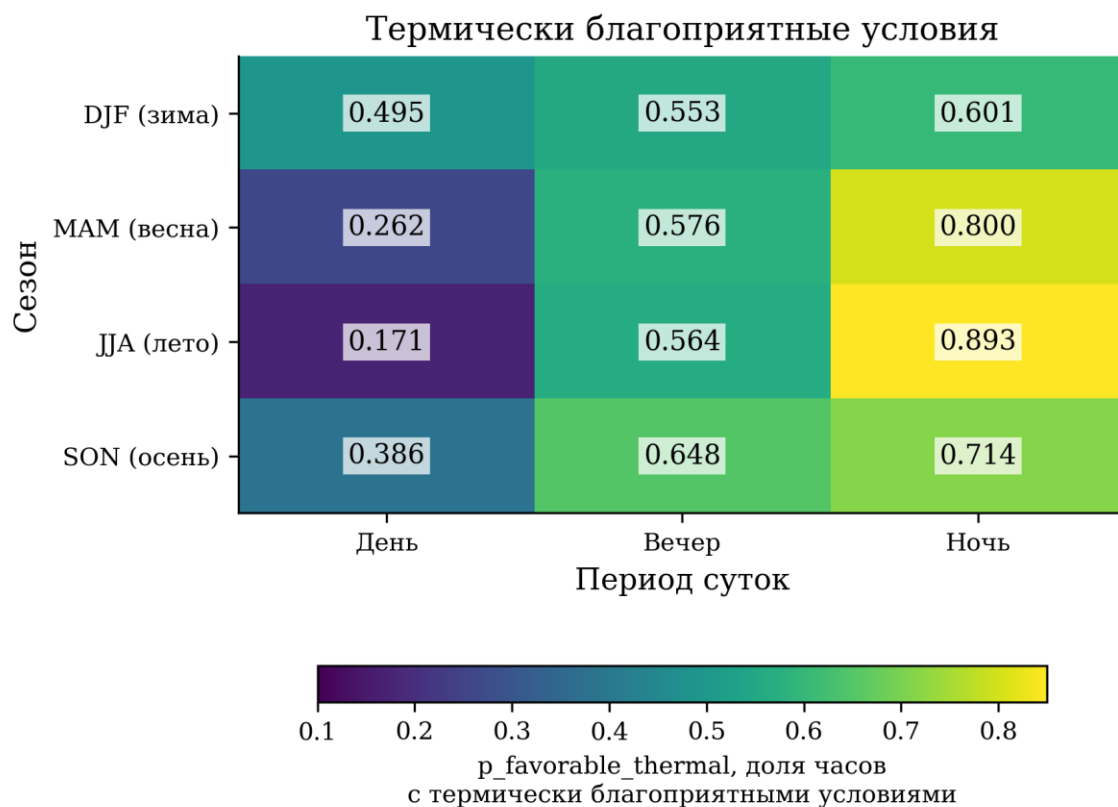


Рисунок 4.5 — Сезонно-суточная динамика термической компоненты $p_{\text{благ}}^{\text{терм}} Ri$ для центральной ячейки СПб: коэффициент DJF-ночь / JJA-день $\approx 4,08\times$.

Контраст между зимней ночью и летним днём в термической компоненте: DJF-ночь — 0,59, JJA-день — 0,145, отношение **4,08×**. Объяснение — наложение двух независимых факторов:

— **Продолжительность тёмного времени суток.** На 60° с.ш. в зимнее солнцестояние день ~ 5 ч 53 мин, в летнее ~ 18 ч 51 мин. Продолжительность ночи: 17 ч в DJF против 6,5 ч в JJA — контраст $\sim 2,6\times$ обеспечивает первый множитель.

— **Термический режим подстилающей поверхности.** Средняя зимняя температура в СПб $\sim -5^\circ\text{C}$; преобладают слабоветренные условия с устойчивым приповерхностным охлаждением. Летом средняя $\sim +17^\circ\text{C}$; солнечная радиация JJA-день превосходит JJA-вечер в 30–40 раз, обеспечивая интенсивное конвективное перемешивание. Это даёт второй множитель.

Совместное действие формирует $4,08\times$. Операционные следствия: (1) дневная и ночная нормы шума распространяются в существенно различных физических условиях, формируя асимметричную ширину буферных зон (§ 4.5); (2) континентальный характер сезонно-суточной структуры устойчивости СПб отличается от прибрежных регионов Западной Европы (количественное сопоставление с Ирландией — § 4.9.4).

4.6.4 Пространственный паттерн



Рисунок 4.6 — Среднегодовая климатологическая вероятность $p_{\text{благ}}$ для домена Санкт-Петербурга; усреднено по 18 секторам, 4 сезонам, 3 периодам $L_{\text{ден}}$.

Пространственный размах среднегодовых значений — от 0,66 до 0,74 (8 п.п.) — умеренный для домена $1,0^\circ \times 1,5^\circ$, указывающий на доминирование синоптических, а не локальных факторов. Северо-восточные ячейки ($60,4^\circ$ – $60,6^\circ$ с.ш., восточное побережье Ладожского озера) демонстрируют максимум $p_{\text{благ}} \in [0,73; 0,74]$, соответствующий преобладающему движению циклонов с запада-юго-запада на восток-северо-восток; юго-западный угол — минимум 0,66–0,67. Центральная городская ячейка СПб — $p_{\text{благ}}^- = 0,68$.

4.6.5 Направленный сигнал

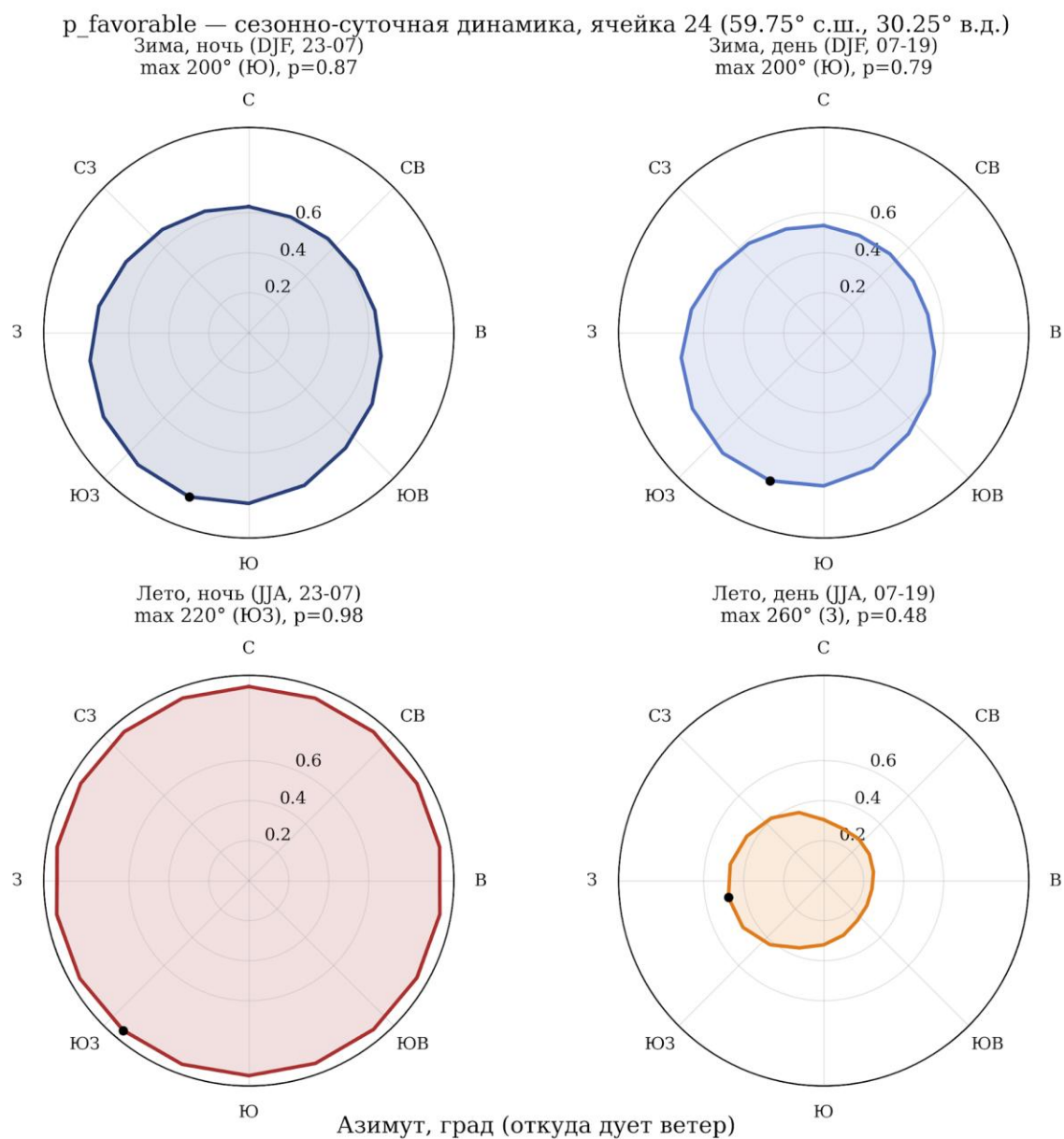


Рисунок 4.7 — Сезонно-суточная динамика посекторной благоприятности для центральной ячейки СПб; четыре сезон×период категории.

В годовом среднем максимум $p_{\text{благ}}$ для центральной ячейки СПб — сектор $\theta_{ISO} = 60^\circ$ ($\theta_{from} = 240^\circ$, юго-запад), согласующийся с траекториями атлантических циклонов. Анизотропия в годовом среднем $\sim 1,3$ — умеренное значение. Сезонно-суточная вариация направленной структуры ярче, чем

сезонная вариация скалярного среднего: в JJA-день анизотропия наиболее выражена (пик в $\theta_{from} = 280^\circ$, западное направление при конвективно-активной дневной атмосфере); в DJF-ночь анизотропия минимальна — термический компонент изотропно повышает $p_{\text{благ}}$ во всех секторах.

4.6.6 Формат выходного файла

Справочная таблица сохранена в файле data/processed/p_favorable_spb.nc (140 КБ, NetCDF-4, метаданные CF-1.10). Параллельно — data/processed/p_favorable_cnossos.nc (102 КБ) с термическим компонентом на классификаторе Пасквилла–Тёрнера без каскада.

Таблица 4.12

Переменная	Размерность	Описание
p_favorable	(lat, lon, sector, season, period)	Совокупная вероятность по основному каналу
p_favorable_wind	(lat, lon, sector, season, period)	Только ветровой компонент
p_favorable_thermal_Ri	(lat, lon, season, period)	Термический (осн. канал, секторно-независимый)
p_favorable_thermal_Ri_strict	(lat, lon, season, period)	Ri_b без каскада
p_favorable_thermal_PG	(lat, lon, season, period)	Паскуилл (для § 4.9)
p_favorable_thermal_invL_*	(lat, lon, season, period)	1/L строгий / умеренный
n_samples	(lat, lon, season, period)	Число часов в выборке

Таблица 4.6.3 — Структура файла p_favorable_spb.nc.

Глобальные метаданные включают: источник входных данных [14], период 2014-01-01 — 2024-12-31, методологическую основу [5, 10], конвенцию направления (ИСО 9613-2). Файл совместим со стандартными библиотеками CF-метаданных и пригоден для архивного депозита.

4.7 Валидация термического компонента по данным радиозондирования Воейково

Поскольку термический компонент даёт ведущий вклад в общую благоприятность (51,2 % суммарно против 26,2 % ветрового; § 4.4.4), обоснование достоверности термической классификации — методологически центральное звено валидации. Сопоставление Ri_b^{ERA5} с $Ri_b^{\text{зонд}}$, реконструированным из вертикальных профилей зондов станции Воейково, выполнено на *одинаковой высотной опоре* 10 м → 100 м.

4.7.1 Постановка валидации

Станция Воейково (59,952° с.ш., 30,707° в.д., высота 79 м над уровнем моря) — единственная действующая станция аэрологического зондирования в районе СПб; срочные запуски дважды в сутки в 00 и 12 UTC. Источник — открытый архив Университета Вайоминга. Идентификатор по WMO менялся: код 26063 до 31 октября 2018 г., после — 26075; парная выборка строится без деления по периодам. Протокол согласования: ближайшая ERA5-метка с допуском ±45 мин; ближайшая ячейка ERA5 (60,0° с.ш., 30,75° в.д.).

4.7.2 Выборка и

Из 8 036 теоретических запусков 2014–2024 успешно загружено 7 770 (96,7 %). После (наличие значений на 10 м, конечность входов Ri_b , $S^2 \geq 1,0 \text{ м}^2/\text{с}^2$ — зеркальное условие § 4.3.4) сформирована парная выборка $N = 4\,451$. Сезонная стратификация приблизительно равномерна.

4.7.3 Бинарная согласованность и асимметричная матрица

Таблица 4.13

	ERA5: неуст.	ERA5: уст.	Всего
--	--------------	------------	-------

Зонд: неуст.	1 824 (41,0 %)	1 289 (29,0 %)	3 113
Зонд: уст.	112 (2,5 %)	1 226 (27,5 %)	1 338
Всего	1 936	2 515	4 451

Таблица 4.7.1 — Матрица сопряжённости бинарной классификации (порог $Ri_b \geq 0,1$, $N = 4\,451$).

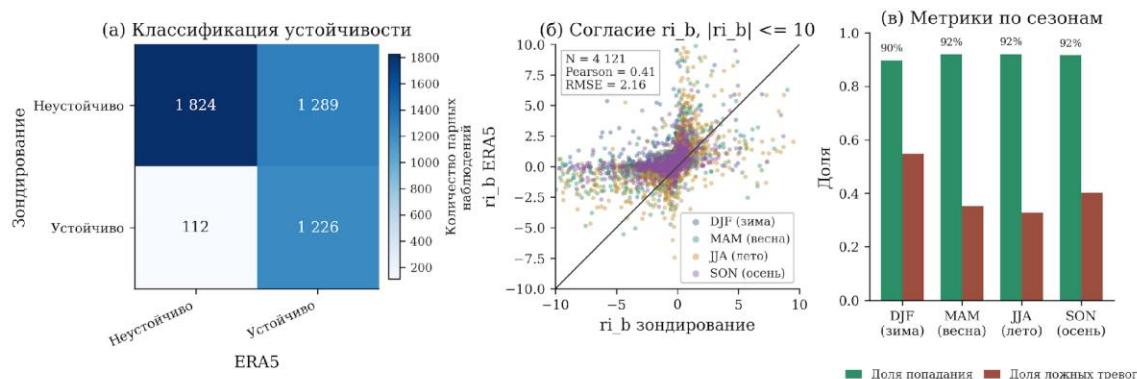


Рисунок 4.8 — Валидация Ri_b (ERA5) по зондовым данным Воейково: (а) матрица сопряжённости; (б) сопоставление значений Ri_b в диапазоне $|Ri_b| \leq 10$ ($N = 4\,121$); (в) сезонная стратификация.

Категориальные показатели: бинарная согласованность 68,5 %; каппа Коэна $\kappa = 0,402$ (умеренное согласие); доля «устойчиво» по зонду 30,1 %, по ERA5 56,5 %; доля попадания 91,6 %; доля ложных тревог 41,4 %.

Главный вывод: ERA5 v2 систематически переоценивает частоту устойчивых стратификаций — сдвиг +26 п.п. Распределение ошибок асимметрично: пропуски истинной устойчивости только 2,5 %, но избыточная идентификация неустойчивости как устойчивости 29,0 %. Бинарная согласованность 68,5 % не достигает жёсткого критерия ≥ 70 %, но превышает мягкий ≥ 60 %; каппа 0,402 уверенно превышает целевой $\geq 0,35$.

Валидация — мягкий проход с зарегистрированным систематическим сдвигом.

4.7.4 Сезонная стратификация

Таблица 4.14

Сезон	N	Согласованность, %	κ	Зонд уст., %	ERA5 уст., %
DJF	987	52,3	0,163	15,7	60,2
MAM	1 102	74,0	0,494	33,8	54,4
JJA	1 127	78,5	0,578	45,5	59,7
SON	1 235	67,5	0,367	24,0	52,5

Таблица 4.7.2 — Сезонная стратификация показателей согласия.

Три содержательных факта: (1) *лучшее согласие в JJA* ($\kappa = 0,578$) — летние пограничные слои с выраженным суточным циклом ERA5 разрешает хорошо; (2) *зимний минимум близок к шуму* ($\kappa = 0,163$) — известная слабость глобальных реанализов в условиях глубоко устойчивых полярных пограничных слоёв с продолжительными радиационными инверсиями [18]; (3) *методологическая инвариантность ERA5 относительно сезонных вариаций* — по зонду доля устойчивости меняется по сезонам сильно (15,7–45,5 %), по ERA5 слабо (52,5–60,2 %), что указывает на «слепоту» классификатора в фиксированном слое к режимам приземной инверсии, проникающей выше 100 м (зимой) либо ограниченной несколькими метрами (летние утренние часы).

4.7.5 Численное согласование

На ограничении $|Ri_b| \leq 10$ ($N = 4\,121$, 92,6 %): коэффициент Пирсона $r = 0,413$, RMSE 2,16 единиц Ri_b , систематическое смещение по непрерывной шкале близко к нулю. Ранговая корреляция Спирмена на полной выборке $\rho = 0,649$ — устойчива к выбросам и характеризует *монотонное* согласие: ERA5 правильно ранжирует часы по степени устойчивости независимо от точных численных

значений. Первичной метрикой валидации остаётся бинарная согласованность через порог $Ri_b \geq 0,1$.

4.7.6 Связь с выбором классификатора

Таблица 4.15

Источник	Доля «устойчиво», %	Отклонение от зонда, п.п.
Радиозонд (Воейково, $n = 4\,451$)	30,1	0
Ri_b + каскад (основной канал)	51,2	+21,1
Ri_b строгий	48,2	+18,1
Паскуилл–Тёрнер	28,3	–1,8
1/L умеренный	16,6	–13,5
1/L строгий	3,5	–26,6

Таблица 4.7.3 — Сопоставление среднедоменных долей пяти классификаторов с зондовым эталоном.

Пасквилла–Тёрнера согласуется с эталоном в пределах 2 п.п.; остальные варианты дают существенные отклонения. Две импликации:

— **Для интерпретации § 4.6:** среднедоменное $p_{\text{благ}}^{\text{терм}}$ в основном канале Ri_b +каскад (55,5 % после агрегации) — *оптимистичная верхняя оценка*; Паскуилл (31,7 % после агрегации) — валидационно-якорная нижняя граница. Чувствительностный анализ § 4.6.2 представляет эти две оценки как методологический интервал [31,7 %; 55,5 %].

— **Для сопоставления с CNOSSOS-EU:** международная методология [11, 10] использует именно Пасквилла–Тёрнера; Паскуилл-вариант v2-климатологии *одновременно валидационно-якорный и методологически совместимый* с зарубежной практикой. Это совпадение делает `p_favorable_cnossos.nc` независимым методологическим ориентиром, поддержанным двумя различными аргументами — валидационным (§ 4.7) и методологическим (§ 4.9).

4.7.7 Ограничения

Ограничения валидации: одна станция к востоку от центра СПб (пространственная репрезентативность зоны); парные часы только 00 и 12 UTC (переходные периоды не охвачены); различие во временном интегрировании (~30 мин восхождения зонда против мгновенного состояния ERA5); точечная локализация против ~28-километровой ячейки реанализа; сезонная неравномерность сэмплирования устойчивости (15,7 % зимой против 45,5 % летом). Несмотря на эти ограничения, валидация даёт количественно характеризованную и физически согласованную оценку качества термической классификации.

4.8 Валидация ветровой компоненты по данным станции 26063

4.8.1 Постановка

Станция 26063 (59,968° с.ш., 30,307° в.д., высота 4 м) — действующая метеостанция первого класса с почасовыми синоптическими наблюдениями WMO. Источник — открытый источник Meteostat. Из 96 381 часов доступной выборки за 2014–2024 сформирована парная выборка $N = 94\,283$ (97,8 %), для которой одновременно определены оценки $p_{\text{благ_ветр}}(\text{сектор}, t)$ из двух источников: ERA5 v2 (по полям u_{10}, v_{10} , ячейка 59,75° с.ш., 30,25° в.д.) и станция (по фактическим измерениям). Случаи штиля (2 954 часа) оставлены в знаменателе с принудительным «не благоприятно».

4.8.2 Сводные показатели согласия

Среднее по 18 секторам $p_{\text{благ_ветр}}^-$: по станции 20,24 %, по ERA5 v2 24,47 %; систематическое смещение **+4,23 п.п.** Среднеквадратичная ошибка посекторных оценок $\text{RMSE} = 5,54$ п.п. Из 18 секторов в 12 (66,7 %) расхождение не превышает 5 п.п.; в 6 секторах (преимущественно в северо-восточном

квадранте) — 7–11 п.п. По непрерывной шкале: Пирсон по скорости ветра $r = 0,621$; косинусное согласие по направлению 0,825 (ERA5 воспроизводит направление точнее, чем модуль скорости).

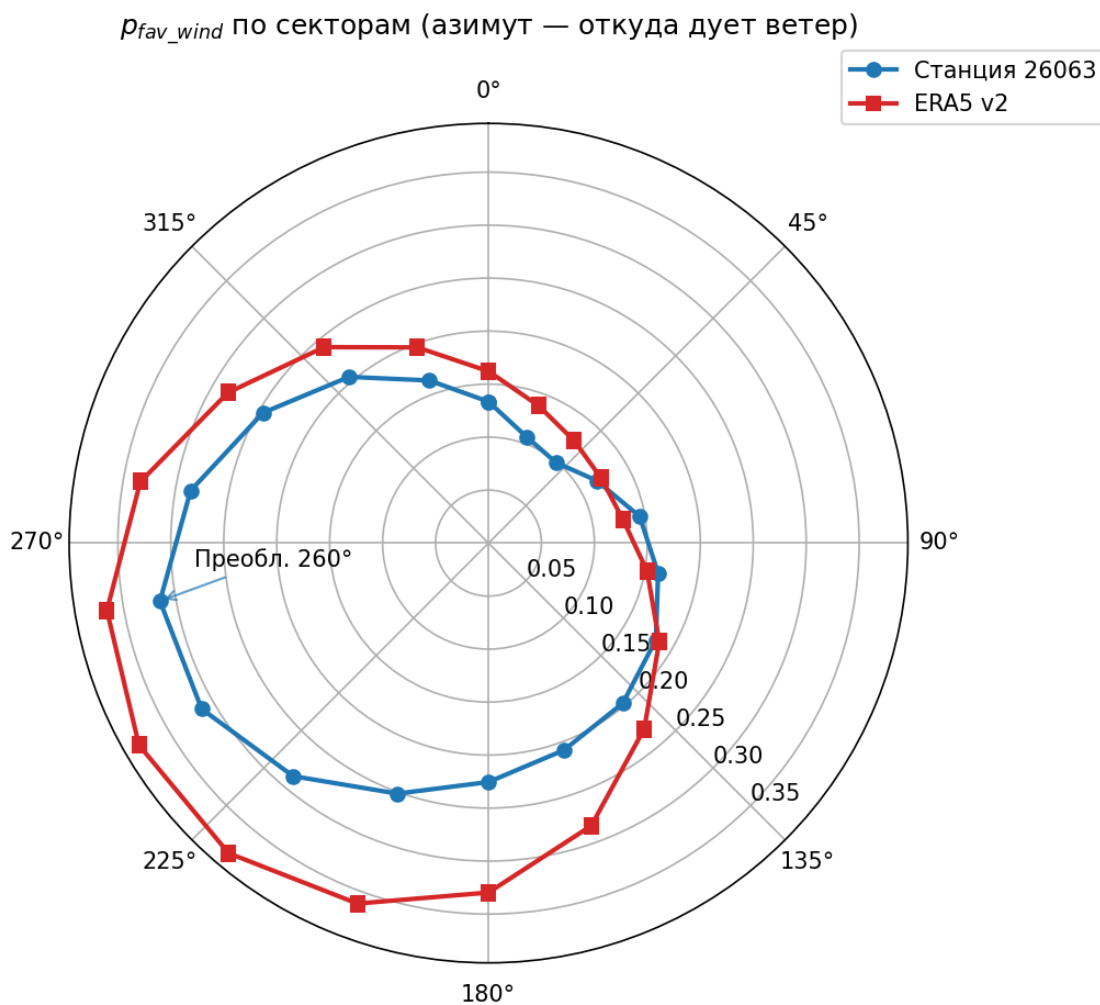


Рисунок 4.9 — Валидация ветрового компонента $p_благ_ветр$ по данным станции 26063 ($N = 94\,283$): полярная диаграмма посекторных оценок.

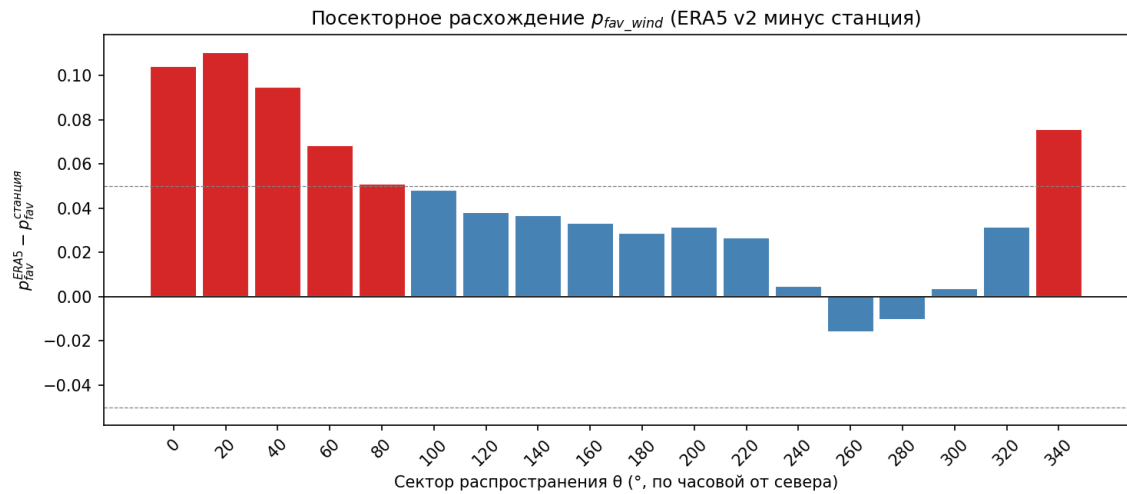


Рисунок 4.10 — Валидация ветрового компонента `p_благ_ветр` по данным станции 26063 ($N = 94\,283$): столбчатая диаграмма посекторных расхождений ERA5 – станция.

4.8.3 Посекторная структура расхождения

Расхождение имеет содержательную направленную структуру. *Дуга переоценки*: в шести секторах $\theta_{ISO} = 340^\circ\text{--}80^\circ$ ERA5 переоценивает на 5–11 п.п., максимум +11,0 п.п. в $\theta_{ISO} = 20^\circ$ — распространение в северо-восточный квадрант, в метеорологической конвенции — ветры с юго-запада. *Мягкая дуга недооценки*: в секторах $\theta_{ISO} = 260^\circ\text{--}280^\circ$ ERA5 недооценивает до 1,6 п.п.

Двухсторонняя структура объясняется двумя механизмами:

— **Маргинальная благоприятность около порога $u_{thr} = 2,0$ м/с.** Преобладающие юго-западные ветры умеренной скорости (среднеклиматологическая модуль в СПб $\sim 3\text{--}4$ м/с) часто оказываются *вблизи* порога. Малые расхождения в модуле скорости ($RMSE \sim 1,2$ м/с) в маргинальных условиях дают диспропорциональные различия бинарной классификации. ERA5 систематически даёт чуть более высокую среднюю скорость (сглаживание на масштабе 25 км, неучёт городской шероховатости).

— **Направленная городская шероховатость.** Станция 26063 — открытая площадка Пулковской обсерватории; ячейка ERA5 $\sim 25 \times 25$ км охватывает как открытые пригородные территории, так и плотную городскую застройку. Для ветров с открытых направлений (юго-запад через Финский залив) станция и ячейка дают близкие значения; для ветров с континентальных направлений (с северо-востока через застройку) пограничный слой над городской ячейкой систематически снижен по скорости приземного ветра.

Среднегодовое смещение +4,23 п.п. — итог компенсации двух разнонаправленных эффектов.

4.8.4 Двухканальная схема и совместный вывод

Таблица 4.16

Компонент	Эталонный источник	Смещение ERA5, п.п.
Термический (Ri_b +каскад)	Радиозонд Воейково	+21,1
Термический (Паскуилл–Тёрнер)	Радиозонд Воейково	–1,8
Ветровой (u_{10}, v_{10})	Станция 26063	+4,23

Таблица 4.8.1 — Двухканальная валидационная схема.

ERA5 v2 систематически переоценивает оба компонента благоприятности относительно независимых эталонов; ветровой умеренно (+4,2 п.п.) и направленно-структурированно, термический в основном канале существенно (+21,1 п.п.) и однородно по сезонам. Альтернативный канал Пасквилла–Тёрнера согласован с эмпирической истиной в пределах 2 п.п. Согласованность направления смещения двух компонентов указывает на единый системный эффект параметризации физических процессов в реанализе в условиях умеренно высоких широт.

Операционные следствия: (1) среднедоменное $p^-_{\text{благ}} = 68,9\%$ из § 4.6.1 — оптимистичная верхняя оценка; более осторожная оценка, поддержанная

обоими каналами, — $p_{\text{благ}}^{-\text{CNOSSOS}} = 52,8 \%$ (§ 4.9.2); (2) сезонная и направленная структура климатологии устойчива относительно выбора классификатора — *содержательные климатологические выводы работы устойчивы относительно методологической неопределённости*; (3) при применении в проектной практике следует представлять две оценки — основную и валидационно-якорную.

Двухканальная валидационная схема отличает работу от большинства известных публичных реализаций CNOSSOS-EU в Европе: ирландская реализация [13] содержит детальное описание метеорологического обоснования без независимой валидации.

4.9 Сопоставление с методологией CNOSSOS-EU и зарубежными реализациями

4.9.1 CNOSSOS-EU как методологическая рамка

CNOSSOS-EU — гармонизированная методология оценки шума окружающей среды JRC [10], обязательная для государств-членов ЕС по [11]. Annex II §2.5.6 определяет p как «mean occurrence of favourable conditions in the direction of the path» с критерием благоприятности через два альтернативных условия: проекция приземного ветра $u_{\parallel} \geq 2,0$ м/с *либо* класс устойчивости Пасквилла–Тёрнера принадлежит $\{E, F, G\}$. Существенно: Директива *не публикует численных значений* — это методологическое предписание, а не таблица констант; публичные региональные реализации существуют для Ирландии [13], Италии, отдельных регионов Германии и Франции. Россия не является государством-членом; российской публичной региональной реализации до настоящей работы не существовало.

Методологическая позиция настоящей работы двойная: пайплайн рассчитывает посекторную благоприятность по схеме Annex II, обеспечивая методологическое соответствие; основной канал Ri_b +каскад применяет более

физически прямой классификатор устойчивости, представляющий методологическое расширение CNOSSOS-EU. Оба варианта сохранены параллельно (§ 4.6.6).

4.9.2 Прямое методологическое соответствие

Для эмпирической демонстрации соответствия выполнен отдельный расчёт $p_{\text{благ}}^{\text{CNOSSOS}}$ с термическим компонентом по Annex II:

$$\text{favorable}^{\text{CNOSSOS}}(t, c, \theta) = [u_{\parallel} \geq 2 \text{ м/с}] \vee [\text{Пасквилл} \in \{E, F, G\}].$$

Входы и метод агрегации идентичны основному каналу с подменой термического признака. Выходной артефакт — data/processed/p_favorable_cnossos.nc (102 КБ). Среднедоменное $p_{\text{благ}}^{\text{CNOSSOS}} = 52,8 \%$. Разность с основным каналом ($p_{\text{благ}}^{-\text{Ri+каскад}} = 68,9 \%$) составляет **16,1 п.п.** — чисто методологический эффект выбора классификатора на идентичных входных данных, изолированный от климатических и пространственных эффектов.

4.9.3 Методологический эффект: количественное расщепление

Таблица 4.17

Сезон	Период	$Ri_b + \text{каскад}, \%$	CNOSSOS, %	Δ , п.п.
DJF	день	63,4	52,2	11,2
DJF	вечер	70,1	59,8	10,3
DJF	ночь	72,7	59,8	12,9
MAM	день	37,0	30,5	6,5
MAM	вечер	65,1	56,2	8,9
MAM	ночь	86,0	75,8	10,2
JJA	день	34,2	25,6	8,6
JJA	вечер	69,1	43,2	25,9
JJA	ночь	97,2	78,5	18,8
SON	день	58,2	43,9	14,3
SON	вечер	80,7	66,0	14,7
SON	ночь	86,2	68,3	17,9

Таблица 4.9.1 — Сезонно-периодное сопоставление основного канала и CNOSSOS-верного расчёта для центральной ячейки СПб.

Во всех 12 комбинациях CNOSSOS закономерно ниже основного канала; размах от +6,5 п.п. (МАМ-день) до +25,9 п.п. (JJA-вечер); среднеарифметическое +13,4 п.п. Эффект слабее в переходные сезоны (МАМ) — частые переходы между конвективным и устойчивым состояниями выравнивают оба классификатора; сильнее в крайних (DJF, JJA), где режимы выражены и Ri_b +каскад обнаруживает устойчивость, которую Паскуилл пропускает (привязан к ветру и инсоляции, а не к прямой термодинамической характеристике). Максимум 25,9 п.п. в JJA-вечер — специфическое сочетание раннего летнего вечернего охлаждения с продолжающейся положительной инсоляцией в высоких широтах. Связь с § 4.7: основной канал даёт оптимистичную верхнюю оценку, CNOSSOS-верный — оценку, согласованную с эмпирической истиной.

4.9.4 Климатологическое сопоставление с Ирландией

Прямое сопоставление возможно благодаря [13] — посекторные значения $\%P_f$ для всех 26 графств Ирландии по схеме NORD2000 (одной из двух разрешённых [11] методологий) за 1990–2020 гг. Сопоставление с графством Dublin (приморская столичная агломерация, 53° с.ш., морская климатология) — центральная городская ячейка Санкт-Петербурга (60° с.ш., континентальная):

Таблица 4.18

Период Lden	Дублин, %	СПб (CNOSSOS), %	Δ , п.п.
День 07–19	≈ 40	38,1	–1,9
Вечер 19–23	≈ 52	56,3	+4,3
Ночь 23–07	≈ 52	70,6	+18,6

Таблица 4.9.2 — Среднегодовая $p_{\text{благ}}$: Санкт-Петербург (CNOSSOS-верный) vs Дублин.

Три климатологических факта:

— *Дневной период*: СПб (38,1 %) $\approx$ Дублин (~40 %) — универсальная для умеренных широт климатология конвективного дневного пограничного слоя; различие климата дневного режима практически не затрагивает.

— *Вечерний период*: СПб превышает Дублин на ~4 п.п. — более раннее вечернее переход к устойчивой стратификации при ускоренном заходе солнца на 60° с.ш.

— *Ночной период*: СПб превышает Дублин на +18,6 п.п. — ключевой климатический сигнал. Объяснение двух независимых факторов: (а) бóльшая продолжительность тёмного времени суток на 60° с.ш. зимой создаёт длительные периоды радиационного охлаждения; (б) континентальный характер климата СПб поддерживает выраженную ночную стратификацию, тогда как над прибрежными зонами Ирландии океанический воздух ослабляет ночные инверсии.

Главный климатологический вывод: ночной разрыв +18,6 п.п. *сохраняется при методологически сопоставимых критериях* — обе оценки выполнены по CNOSSOS-EU-верной схеме. Этот разрыв не является артефактом выбора классификатора, а представляет проявление принципиально различной климатологии распространения звука. В этом — эмпирическое обоснование тезиса о необходимости региональной CNOSSOS-EU климатологии для российских условий.

4.9.5 Импликации

Методологически: пайплайн v2 реализует Annex II §2.5.6 на корректных входных данных; параллельный основной канал Ri_b +каскад — расширение CNOSSOS-EU, обоснованное физической интерпретируемостью числа Ричардсона; двухчастный выход обеспечивает совместимость как с международной рамкой, так и с расширенной методологической позицией. Эмпирически: ночной разрыв +18,6 п.п. с Ирландией количественно подтверждает необходимость региональной CNOSSOS-EU климатологии — зарубежные таблицы без региональной коррекции систематически *занижали* бы ночную благоприятность и ширину буферных зон для ночного контура 45 дБА на ~30–50 м (§ 4.5.3). В международной перспективе: настоящая работа — одна из первых публично доступных региональных CNOSSOS-EU климатологий для российского региона; сопоставление с Ирландией показывает, что выбор между двумя разрешёнными методологиями на содержательную картину сезонно-суточного цикла не влияет — основной источник межрегиональной вариативности климатический, а не методологический. Двухканальная валидационная схема (§§ 4.7, 4.8) методологически отличает работу от большинства публичных реализаций CNOSSOS-EU [13] и потенциально применима в других региональных контекстах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прямые ответы на пять задач Введения

Задача 1 — систематизация нормативной базы Российской Федерации в области расчёта транспортного шума. Систематизация проведена в Главе 1 в трёхуровневой иерархии «методический — проектный — санитарно-гигиенический». Установлено, что несущий документ методического уровня [4] (трансляция [5]) через формулу (22) и Примечание 1 к ней прямо устанавливает требование определения метеорологической поправки C_0 из локальных метеорологических статистических данных, однако ни один действующий документ — ни ГОСТ серии 31295, ни [6], ни [7] — не предоставляет ни методики получения этой климатологии, ни численных значений C_0 для регионов РФ. Систематический поиск в основных профильных журналах и базах за 2020–2025 гг. публикаций, восполняющих этот пробел, не выявил. Сопоставление с международной практикой показало, что в Финляндии, Ирландии, Германии, Польше, Дании, Швеции, Норвегии аналогичная задача решена и нормативно внедрена; прямого аналога для какого-либо региона РФ в открытой литературе до настоящей работы не существовало.

Задача 2 — описание физических механизмов влияния метеорологических условий на распространение звука. Механизмы описаны в Главе 2 в форме двухканальной структуры. Перенос акустической энергии в стратифицированной движущейся атмосфере полностью определяется эффективным профилем $c_{eff}(z) = c(T) + u \cdot \hat{n}_{SR}$, разложимым на термический и ветровой вклады в градиент $a = a_T + a_W$. Благоприятные условия по ИСО 9613–2 формируются двумя независимыми механизмами — омнинаправленным (термическая инверсия) и секторным (попутный ветер с проекцией $u_{\parallel} \geq u_{thr}$), — что служит физическим обоснованием посекторного и сезонно-суточного разрешения климатологии в Главе 3. Дополнительно проведено систематическое

сопоставление классификаторов устойчивости приземного слоя (Паскуилл–Гиффорд, объёмное число Ричардсона Ri_b , длина Монина–Обухова) с фиксацией границ применимости в прибрежной городской среде и документированных несогласий [15, 18].

Задача 3 — разработка методики расчёта метеорологической поправки C_{met} из реанализа. Методика формализована в Главе 3 как двухсценарное расширение базовой расчётной схемы ГОСТ 31295.2-2005 в архитектуре CNOSSOS-EU [10, 11]. Климатология посекторной вероятности благоприятных условий $p_{\text{благ}}(\sigma, s, \tau)$, зависящая от 18-секторного азимута, четырёх календарных сезонов и трёх периодов L_{den} , есть эмпирически калибруемая региональная реализация Примечания 1 к формуле (22). Источник входных данных — глобальный реанализ ERA5 [14] (2014–2024 гг., домен 59,5–60,5° с.ш., 29,5–31,0° в.д., сетка 5×7 ячеек, 96 432 почасовых отметки на ячейку); наземная сеть Росгидромета в Северо-Западном регионе не обеспечивает посекторного разрешения, реанализ обеспечивает. Методологический отпечаток — триангуляция трёх независимых классификаторов устойчивости (Ri_b на фиксированном слое 10–100 м над поверхностью, обратная длина Монина–Обухова $1/L$ из канонических ECMWF-полей, Паскуилл–Тёрнер) с явной фиксацией статистики расхождения и каскадной подстановкой Пасквилла в часы $Ri_b = \text{NaN}$. Принципиальное решение — переход с пары «2 м — 1000 гПа» на фиксированный слой 10–100 м через переменные u_{100}, v_{100} — устраняет подповерхностную экстраполяцию, имеющую место в **27,49 %** часов климатологии СПб (самостоятельное региональное климатологическое следствие).

Задача 4 — реализация методики в виде программной системы. Программная реализация (Глава 4) выполнена как воспроизводимый пайплайн `noise-meteo-spb` (Python, CDS API через `cdsap`) **в архитектуре «один этап — один модуль — один кэшируемый артефакт»**

с строгим разделением ответственности: загрузка ERA5 → классификация устойчивости (три классификатора параллельно) → посекторная благоприятность с каскадом → климатологическая агрегация → двухканальный выход. Объем выходного артефакта — $35 \times 18 \times 4 \times 3 = 7\,560$ значений на канал, формат NetCDF-4 с метаданными CF-1.10. Параллельно разработано веб-приложение интерактивной демонстрации (React, Recharts) — единичный расчёт по методике [8] с интерактивным варьированием всех входов, включая метеорологические. Полная воспроизводимость обеспечена вынесением численных параметров в конфигурационный файл и кэшированием промежуточных артефактов.

Задача 5 — тестовый расчёт с валидацией. Тестовый расчёт выполнен для участка КАД км 105 (§ 4.5). Дневной контур 55 дБА [39]: средний по 18 секторам радиус 84–97 м в климатологических сценариях против 112 м в статическом режиме — сжатие на 13–25 %, отражающее конвективное рассеяние звука вверх. Ночной контур 45 дБА [7]: 392–434 м против статических 444 м — приближение к статической оценке с сезонным размахом 42 м; ночная буферная зона почти впятеро превышает дневную при одинаковом источнике. Двухканальная станционная валидация: термический канал по радиозондовым данным Воейково ($N = 4\,451$) — каппа Коэна $\kappa = 0,402$ (умеренное согласие), систематическое смещение основного канала Ri_b +каскад +21,1 п.п., при этом Паскуилл–Тёрнер согласуется с эталоном в пределах 2 п.п.; ветровой канал по синоптической станции WMO 26063 ($N = 94\,283$) — RMSE = 5,54 п.п. по 18 секторам, смещение +4,23 п.п., направление воспроизводится точнее модуля скорости (косинусное согласие 0,825 против $r = 0,621$). Двухканальная валидационная схема отличает настоящую работу от большинства публичных реализаций CNOSSOS-EU [13], в которых независимая валидация отсутствует.

Сводка ключевых количественных результатов

Сводка центральных количественных результатов работы:

— *Артефакт изобарической пары*: подповерхностная экстраполяция «2 м — 1000 гПа» в **27,49 %** часов 2014–2024 гг. — ранее не оценённое количественно ограничение наивных Ri_b -расчётов в высоких широтах с активной циклонической деятельностью.

— *Декомпозиция благоприятных часов (основной канал, центральная городская ячейка)*: только ветровой 14,4 % + только термический 39,4 % + оба одновременно 11,8 % = **65,6 %** благоприятных; ни одного 34,4 %. Соотношение термического и ветрового вкладов — приблизительно 2 : 1.

— *Сезонно-суточный контраст термической компоненты*: DJF-ночь 0,59 / JJA-день 0,145 = **4,08×**; совместный размах $p_{\text{благ}}$ от 0,342 до 0,972 — почти трёхкратная вариация в пределах одной климатологической точки.

— *Среднедоменные оценки $p_{\text{благ}}^-$* : основной канал Ri_b +каскад — 68,9 %; CNOSSOS-верный (Паскуилл) — 52,8 %; разность **16,1 п.п.** — чисто методологический эффект выбора классификатора при идентичных входных данных, изолированный от климатических и пространственных факторов.

— *Тестовый расчёт КАД км 105*: дневной буфер 55 дБА сжимается на 13–25 % относительно статического; ночной буфер 45 дБА практически совпадает со статическим с сезонным размахом 10 %; ночная буферная зона $\approx 4,65\times$ дневной.

— *Валидация термического канала (Воейково)*: $\kappa = 0,402$; систематическое смещение основного канала **+21,1 п.п.**, Пасквилла **–1,8 п.п.** — одновременно валидационно-якорный и CNOSSOS-совместимый канал;

ранговая корреляция Спирмена $\rho = 0,649$ свидетельствует о монотонном согласии при наличии калибровочного сдвига.

— *Валидация ветрового канала (WMO 26063):* RMSE по 18 секторам **5,54 п.п.**, среднее смещение **+4,23 п.п.**; в 12 из 18 секторов расхождение ≤ 5 п.п.; направленная структура расхождения интерпретирована как комбинированный эффект пороговой маргинальности и неразрешённой городской шероховатости.

— *Сопоставление с Дублином (CNOSSOS-сопоставимый расчёт по [13]):* ночной разрыв **+18,6 п.п.** при близких дневных значениях (СПб 38,1 % $\approx$ Дублин $\approx$ 40 %) — климатический, а не методологический сигнал, количественно подтверждающий необходимость региональной CNOSSOS–EU климатологии для российских условий.

Научная новизна и методологическое позиционирование

Научная новизна работы определяется пятью содержательными положениями. Во-первых, представлена *первая для региона Российской Федерации* посекторная климатология вероятности благоприятных условий распространения звука, рассчитанная на нормативно совместимой методологической основе и пригодная для прямой подстановки в слот C_0 формулы (22) ГОСТ 31295.2-2005. Во-вторых, реализовано методологическое согласование с международной рамкой CNOSSOS-EU [10, 11] в форме двухканального выхода: основной канал (Ri_b +каскад)— физически прямой и методологически расширенный, CNOSSOS-верный канал (Паскуилл–Тёрнер)— одновременно валидационно-якорный и совместимый с зарубежной нормативной практикой; параллельное производство двух каналов на едином

датасете обеспечивает количественную изоляцию методологического эффекта от климатических и пространственных факторов. В-третьих, использование глобального реанализа ERA5 [14] в роли первичного метеорологического субстрата (с двухканальной станционной валидацией в обоих физических каналах) — обоснованное и эмпирически верифицированное методологическое решение, прямо переносимое на любой регион Российской Федерации без изменения программной системы; это принципиально отличает методику настоящей работы от опубликованных национальных реализаций CNOSSOS-EU, опирающихся на национальные сети станций. В-четвертых, триангуляция трёх независимых классификаторов устойчивости приземного слоя с явной фиксацией статистики расхождения [15] и фиксированная высотная опора 10–100 м над поверхностью через переменные u_{100}, v_{100} ERA5 составляют оригинальный методологический вклад в область региональной климатологии распространения звука и устраняют ранее не оцененное количественно ограничение наивных Ri_b -расчётов в умеренно высоких широтах. В-пятых, двухканальная станционная валидация термического (радиозонды Воейково) и ветрового (синоптическая станция WMO 26063) компонентов методологически отличает работу от большинства публичных реализаций CNOSSOS-EU [13], в которых независимая валидация климатологии не выполняется, и определяет переносимый контрольный инструмент качества для последующих региональных постановок.

Практическое значение

Основной операционный артефакт работы — климатологическая справочная таблица `p_favorable_spb.nc` ($35 \times 18 \times 4 \times 3 = 7\,560$ значений в стандарте NetCDF-4 с метаданными CF-1.10) — пригодна для непосредственного использования в проектной расчетной цепочке: посекторное значение $p_{\text{благ}}(\sigma, s, \tau)$ подставляется в выражение пересчёта в коэффициент C_0

Примечания 1 к формуле (22) ГОСТ 31295.2-2005 и далее в полную расчетную цепочку [6] при подготовке проектной документации защиты от шума, разработке шумовых карт по требованиям [7] и рекомендаций [1], а также при оценке селитебной территории, требующей шумозащитных мероприятий по [39]. Параллельное предоставление CNOSSOS-верного канала `p_favorable_cnossos.nc` обеспечивает совместимость с международной нормативной практикой [16, 11]. Программный комплекс `noise-meteo-spb` и веб-приложение интерактивной демонстрации могут применяться как обучающий и расчетный инструмент в учебных и проектных задачах; методика, отделенная от регионального применения, переносится на другие регионы РФ простой подменой пространственного домена при сохранении программного пайплайна. Полученная двухканальная климатологическая таблица также пригодна для самостоятельных исследовательских задач по городской климатологии Северо-Запада — анализу сезонно-суточной структуры устойчивости пограничного слоя, оценке частоты и направленности термических инверсий, сопоставлению континентальных и приморских режимов в пределах одного домена.

Ограничения и направления дальнейших исследований

Ограничения настоящей работы. Исследование ограничено одним региональным доменом (Северо–Запад РФ, домен $1^\circ \times 1,5^\circ$ вокруг Санкт–Петербурга), бинарной редукцией категорий ИСО 9613–2 $\{F, H, U\} \rightarrow \{F, H\}$ CNOSSOS–EU без сохранения градации, отсутствием натурной шумовой валидации (валидация выполнена в метеорологическом, а не акустическом канале), систематическим смещением ERA5 по термическому каналу в зимний сезон ($\kappa = 0,163$ в DJF —

известная слабость глобальных реанализов в условиях глубоко устойчивых полярных пограничных слоев с продолжительными радиационными инверсиями [18]), а также неразрешённостью городской шероховатости в ячейке $0,25^\circ$ ($\sim 25 \times 25$ км), порождающей направленную структуру расхождения с приземной станцией WMO 26063. Двухсрочное сэмплирование аэрологической станции Воейково (00 и 12 UTC) исключает переходные периоды из выборки термической валидации.

Направления дальнейших исследований. Естественное расширение работы определяется четырьмя направлениями. Во-первых, *распространение методики на другие регионы Российской Федерации* с принципиально различными климатическими режимами (южные континентальные, северные приморские, Дальний Восток) — программная система к этому подготовлена по построению. Во-вторых, *переход от бинарной редукции к непрерывной градационной модели* с тремя категориями ИСО 9613–2 или с фракционными весами в формуле C_0 , что физически точнее отражает реальную статистику переходных метеорологических состояний и потенциально устраняет часть систематического смещения основного канала. В-третьих, *полевая шумовая валидация* на репрезентативном участке (КАД км 105 или аналогичном) с одновременной регистрацией $L_{\text{АЭКВ}}$ и метеорологических параметров в течение полного годового цикла — закрытие петли «реанализ → климатология → акустический отклик». В-четвертых, *учёт городского пограничного слоя через урбан-параметризацию* мезомасштабной модели типа WRF-Urban с динамическим даунскейлингом ERA5 — повышение пространственного разрешения с 25 до 1–3 км и явный учёт городской теплоинерционной аномалии в ночном устойчивом слое, что прямо адресует направленную структуру расхождения с приземной станцией, выявленную в § 4.8. Двухканальная станционная валидационная схема, развитая в настоящей

работе, переносима в эти расширенные постановки как контрольный инструмент качества региональной климатологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Health Organization. Environmental noise guidelines for the European Region / World Health Organization Regional Office for Europe. — Copenhagen : WHO Regional Office for Europe, 2018. — 160 с.. — ISBN 978-92-890-5356-3. — Текст : непосредственный.
2. European Environment Agency. Environmental noise in Europe — 2025 // European Environment Agency : [сайт]. — 2025. — URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe-2025> (дата обращения: 25.05.2026). — Текст : электронный.
3. Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году : государственный доклад // Роспотребнадзор : [сайт]. — 2024. — URL: <https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/> (дата обращения: 25.05.2026). — Текст : электронный.
4. ГОСТ 31295.2-2005. Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2: Общий метод расчёта. — Москва : Стандартинформ, 2006. — 40 с.. — Текст : непосредственный.
5. ISO 9613-2:1996. Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: General method of calculation. — Geneva : International Organization for Standardization, 1996. — 24 с.. — Текст : непосредственный.
6. СП 276.1325800.2016. Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков. — Москва : Стандартинформ, 2016. — 80 с.. — Текст : непосредственный.
7. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. — Москва : Роспотребнадзор, 2021. — 469 с.. — Текст : непосредственный.
8. Лобатовкина Е. Г. Оценка уровня шумового воздействия транспорта методом математического моделирования (расчетный метод) : методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Проектирование и реконструкция зданий» для студентов магистратуры направления подготовки 08.04.01 Строительство / сост.: Е. Г. Лобатовкина, К. О. Ларионова ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т., каф. архитектуры гражданских и промышленных зданий. — Москва : НИУ МГСУ, 2015. — ISBN 978-5-7264-1096-8. — Текст : электронный.

9. ISO 9613-2:2024. Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: Engineering method for the prediction of sound pressure levels outdoors. — Geneva : International Organization for Standardization, 2024. — 56 с.. — Текст : электронный.
10. Kephelopoulos S. Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU) : JRC Reference Report / S. Kephelopoulos, M. Paviotti, F. Anfosso-Lédée. — Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2012. — 180 с.. — ISBN 978-92-79-25281-5. — Текст : электронный.
11. European Union. Законы. Commission Directive (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council : Directive (EU) 2015/996. — Brussels : European Commission, 2015. — 823 с.. — Текст : электронный.
12. Plovsing B. Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction / Plovsing B. // DELTA Acoustics Technical Report AV1849/00. — København : DELTA, 2006. — С. 1–62. — Текст : электронный.
13. Transport Infrastructure Ireland. Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU): Meteorological Correction Factors for Ireland, RE-ENV-07007 // Transport Infrastructure Ireland Publications : [сайт]. — 2022. — URL: <https://www.tiipublications.ie/library/RE-ENV-07007-02.pdf> (дата обращения: 12.05.2026). — Текст : электронный.
14. Hersbach H. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford [и др.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. — 2020. — Т. 146 — № 730. — С. 1999–2049. — Текст : электронный.
15. Одинцов С. Л. Использование масштаба Мони́на–Обухова для определения типа стратификации в приземном слое атмосферы / С. Л. Одинцов, В. А. Гладких, А. П. Камардин, И. В. Невзорова // Оптика атмосферы и океана. — 2025. — Т. 38 — № 5. — Текст : электронный.
16. European Union. Законы. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council relating to the assessment and management of environmental noise : Directive 2002/49/EC. — Brussels : European Parliament and Council, 2002. — 14 с.. — Текст : электронный.
17. Salomons E. M. Computational Atmospheric Acoustics / E. M. Salomons. — Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2001. — 335 с.. — ISBN 978-0-7923-7161-8. — Текст : непосредственный.
18. Stull R. B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology / R. B. Stull. — Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1988. — 666 с.. — ISBN 978-90-277-2769-5. — Текст : непосредственный.

19. ГОСТ 31295.1-2005. Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 1: Расчёт поглощения звука атмосферой. — Москва : Стандартинформ, 2006. — 19 с.. — Текст : непосредственный.
20. Bass H. E. Atmospheric absorption of sound: Further developments / H. E. Bass, L. C. Sutherland, A. J. Zuckerwar [и др.] // Journal of the Acoustical Society of America. — 1995. — Т. 97 — № 1. — С. 680–683. — Текст : электронный.
21. Wilson D. K. The sound speed gradient and refraction in the near-ground atmosphere / D. K. Wilson // Journal of the Acoustical Society of America. — 2003. — Т. 113 — № 2. — С. 750–757. — Текст : электронный.
22. Heimann D. Testing meteorological classifications for the prediction of long-term average sound levels / D. Heimann, E. M. Salomons // Applied Acoustics. — 2004. — Т. 65 — № 10. — С. 925–950. — Текст : электронный.
23. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере / В. И. Татарский. — Москва : Наука, 1967. — 548 с.. — Текст : непосредственный.
24. ГОСТ 20444-2014. Шум. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики. — Москва : Стандартинформ, 2015. — 20 с.. — Текст : непосредственный.
25. Пасквилл F. The estimation of the dispersion of windborne material / Пасквилл F. // The Meteorological Magazine. — 1961. — Т. 90 — № 1063. — С. 33–49. — Текст : непосредственный.
26. Gifford F. A. Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion / F. A. Gifford // Nuclear Safety. — 1962. — Т. 2 — № 4. — С. 47–51. — Текст : электронный.
27. Turner D. B. A diffusion model for an urban area / Turner D. B. // Journal of Applied Meteorology. — 1964. — Т. 3 — № 1. — С. 83–91. — Текст : электронный.
28. Обухов А. М. Турбулентность в атмосфере с неоднородной температурой / А. М. Обухов // Труды Института теоретической геофизики АН СССР. — 1946. — Т. 1. — С. 95–115. — Текст : непосредственный.
29. Монин А. С. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы / А. С. Монин, А. М. Обухов // Труды Геофизического института АН СССР. — 1954. — № 24 (151). — С. 163–187. — Текст : непосредственный.
30. Mohan M. Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification / M. Mohan, T. A. Siddiqui // Atmospheric Environment. — 1998. — Т. 32 — № 21. — С. 3775–3781. — Текст : электронный.

31. Grachev A. A. The Critical Richardson Number and Limits of Applicability of Local Similarity Theory in the Stable Boundary Layer / A. A. Grachev, E. L. Andreas, C. W. Fairall [и др.] // *Boundary-Layer Meteorology*. — 2013. — Т. 147 — № 1. — С. 51–82. — Текст : электронный.
32. Högström U. Review of some basic characteristics of the atmospheric surface layer / U. Högström // *Boundary-Layer Meteorology*. — 1996. — Т. 78 — № 3–4. — С. 215–246. — Текст : электронный.
33. Mahrt L. Stratified atmospheric boundary layers / L. Mahrt // *Boundary-Layer Meteorology*. — 1999. — Т. 90 — № 3. — С. 375–396. — Текст : электронный.
34. Roth M. Review of atmospheric turbulence over cities / M. Roth // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. — 2000. — Т. 126 — № 564. — С. 941–990. — Текст : электронный.
35. Plovsing B. Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 2: Propagation in an Atmosphere with Refraction / Plovsing B. // *DELTA Acoustics Technical Report AV 1851/00*. — København : DELTA, 2006. — С. 1–74. — Текст : электронный.
36. Salomons E. The European Harmonoise model for environmental noise prediction and its application to noise mapping / E. Salomons, D. van Maercke, J. Defrance, F. de Roo // *Acta Acustica united with Acustica*. — 2011. — Т. 97 — № 1. — С. 62–74. — Текст : электронный.
37. Гладких В. А. Сопоставление методов классификации стратификации приземного слоя атмосферы / В. А. Гладких [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. — 2025. — Т. 38 — № 9. — С. 701–708. — Текст : электронный.
38. Eurasto R. Nord2000 for road traffic noise prediction. Weather classes and statistics / Eurasto R. // *VTT Technical Research Centre of Finland, Report VTT-R-02530-06*. — Espoo : VTT, 2006. — С. 1–32. — Текст : электронный.
39. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. — Москва : Госкомсанэпиднадзор России, 1996. — 8 с.. — Текст : непосредственный.