

УДК: 534.2, 504.064

OECD: 1.03

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.008

## Сравнительный анализ отечественных и зарубежных методик учёта метеорологических факторов при прогнозировании акустического загрязнения

Себурев А.В.

Аспирант, кафедра Е5, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

В статье сопоставляются подходы к прогнозированию акустического загрязнения, закрепленные в российских (ГОСТ 31295.2-2005) и европейских (CNOSSOS-EU) нормативах. Актуальность исследования определяется значительными погрешностями (до 15-20 дБА), к которым приводит применение отечественных детерминированных методик в сложных метеоусловиях, характерных для климата РФ. Цель – выявить методологические ограничения российского стандарта и обосновать необходимость его гармонизации с передовой зарубежной практикой. С помощью системного анализа и численного моделирования на эталонных волновых моделях продемонстрировано, что упрощения в ГОСТ 31295.2 не дают корректно описать ветровую рефракцию. Это приводит к переоценке уровня шума в зоне акустической тени и недооценке его при попутном ветре. Сделан вывод о перспективности адаптации вероятностного подхода CNOSSOS-EU для повышения точности и достоверности прогнозов при проектировании санитарно-защитных зон.

**Ключевые слова:** акустическое загрязнение, санитарно-защитная зона, ветровая рефракция, ГОСТ 31295.2, CNOSSOS-EU, моделирование шума

## *Comparative analysis of domestic and foreign methods for considering meteorological factors in predicting acoustic pollution*

*Seburev A.V.*

*Ph.D. student, Department E5, D.F. Ustinov Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia*

### **Abstract**

*The article compares the approaches to acoustic pollution prediction, established in the Russian (GOST 31295.2-2005) and European (CNOSSOS-EU) regulatory frameworks. The relevance of the study is determined by significant discrepancies (up to 15-20 dB) resulting from the application of domestic deterministic methods in complex meteorological conditions, characteristic of the Russian climate. The aim is to identify the methodological limitations of the Russian standard and to substantiate the need for its harmonization with advanced foreign practices. Through systematic analysis and numerical modeling using reference wave models, it is demonstrated that the simplifications in GOST 31295.2 do not allow for a correct description of wind refraction. This leads to an overestimation of the noise level in the acoustic shadow zone and an underestimation*

in downwind conditions. A conclusion is drawn about the prospects of adapting the CNOSSOS-EU probabilistic approach to improve the accuracy and reliability of forecasts when designing sanitary protection zones.

**Keywords:** acoustic pollution, sanitary protection zone, wind refraction, GOST 31295.2, CNOSSOS-EU, noise modeling

## Введение

Акустическое загрязнение урбанизированных территорий становится все более острой проблемой в связи с ростом городов и развитием промышленных зон в непосредственной близости от жилой застройки. Обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия населения требует точного прогнозирования уровней шума, что является ключевой задачей при обосновании размеров санитарно-защитных зон (СЗЗ) промышленных предприятий [1], [2]. Точность таких прогнозов напрямую зависит от корректности учёта факторов, влияющих на распространение звука в атмосфере.

Ключевым фактором, определяющим дальнейшее распространение звука, является состояние атмосферного пограничного слоя. Наличие вертикальных градиентов скорости ветра и температуры приводит к явлению рефракции (искривления) звуковых лучей [3]. В условиях попутного ветра (downwind) или при температурной инверсии звуковая энергия «прижимается» к земле, создавая эффект «звукового канала» и приводя к аномальному повышению уровней шума. В условиях встречного ветра (upwind) формируется так называемая метеорологическая зона акустической тени с резким падением уровня звука [4]. Следует пояснить, что в отличие от строительной нормативной базы, где под акустической тенью понимается исключительно пространство за физическим экраном-препятствием, в атмосферной акустике данный термин обозначает область у поверхности земли, в которую не попадают прямые звуковые лучи вследствие их искривления вверх. Игнорирование этих эффектов, особенно на расстояниях свыше 500 м, может приводить к ошибкам прогнозирования, достигающим 15-20 дБА.

В отечественной практике для расчёта шума применяется ГОСТ 31295.2-2005, реализующий детерминированный подход. Он учитывает метеорологические условия через единую усреднённую поправку  $C_{met}$ , что является значительным упрощением и не позволяет адекватно моделировать сложные сценарии ветровой рефракции. В то же время, в странах Европейского Союза внедрена и утверждена единая методика CNOSSOS-EU (Common Noise Assessment Methods in Europe), основанная на вероятностном подходе. В современных зарубежных исследованиях подчеркивается, что переход на этот метод со старых детерминированных стандартов (включая ISO 9613-2, аналогичный отечественному ГОСТ) выявляет существенные различия в расчетах из-за принципиально иных моделей распространения звука и оценки его затухания поверхностью на больших расстояниях [13]. Данная методика разделяет все метеоусловия на классы (например, благоприятные и однородные) и рассчитывает долгосрочные уровни шума с учётом вероятности возникновения каждого класса, что обеспечивает более высокую физическую адекватность [6].

В результате формируется научно-техническое противоречие. С одной стороны, технологии дистанционного зондирования, как, например, лидарное сканирование, уже сегодня позволяют получать детальные вертикальные профили ветра [7], [8]. Одновременно с этим теория распространения волн в неоднородных средах также хорошо развита [9], [10]. Однако, с другой стороны, в инженерной практике продолжают доминировать нормативные методики, использующие упрощенные модели. Эти модели неспособны ассимилировать точные метеорологические данные. Такое

несоответствие снижает точность экологических экспертиз, что, в свою очередь, ведет либо к необоснованным затратам на шумозащиту, либо к повышенным рискам для здоровья населения [11], [12]. Научная новизна данной работы состоит в том, что проводится системный анализ и дается количественная оценка ограничениям отечественного норматива на фоне современных моделей.

Поэтому цель настоящей работы – сопоставить отечественный (ГОСТ 31295.2) и зарубежный (CNOSSOS-EU) подходы к учёту метеорологических факторов. Это позволит выявить ограничения российской инженерной методики и обосновать необходимость её гармонизации с передовыми вероятностными моделями.

## 1 Методологические подходы к учёту метеорологических факторов

В данном разделе проведён детальный анализ двух ключевых подходов к прогнозированию затухания звука на местности: детерминированного, закреплённого в российском стандарте ГОСТ 31295.2-2005, и вероятностного, лежащего в основе европейской методики CNOSSOS-EU.

### 1.1 Отечественный подход: детерминированная модель по ГОСТ 31295.2-2005

Российская нормативная база основывается на инженерном (энергетическом) методе, который идентичен международному стандарту ISO 9613-2. Основным принцип – расчёт долгосрочного усреднённого уровня звука  $L_{AT}(LT)$  путём введения единой поправки  $C_{met}$  на метеорологические условия к базовому расчёту, выполненному для благоприятных условий распространения (попутный ветер)  $L_{AT}(DW)$ .

Расчёт производится по формуле:

$$L_{AT}(LT) = L_{AT}(DW) - C_{met}, \quad (1)$$

где  $L_{AT}(LT)$  – долгосрочный усреднённый уровень звука на длительном интервале времени, дБА;

$L_{AT}(DW)$  – эквивалентный уровень звука, рассчитанный для благоприятных условий распространения, дБА;

$C_{met}$  – поправка на метеорологические условия, дБА.

Ключевым элементом модели является сама поправка  $C_{met}$ , которая рассчитывается эмпирически и зависит исключительно от геометрии расположения источника и приёмника. Методика разделяет все сценарии на два условия:

1. Малые расстояния (или большие высоты источника/приёмника), где влиянием метеорологии пренебрегают:

$$C_{met} = 0 \text{ при } d_p \leq 10 \cdot (h_s + h_r), \quad (2)$$

2. Значительные расстояния. В этом случае для учета метеоусловий вводится поправочный коэффициент, рассчитываемый по формуле:

$$C_{met} = C_0 \cdot [1 - 10 \cdot (h_s + h_r) / d_p] \text{ при } d_p > 10 \cdot (h_s + h_r), \quad (3)$$

где  $C_0$  – эмпирический фактор, зависящий от местных метеорологических условий (статистики ветра, температурных градиентов), дБА;

$d_p$  – проекция расстояния от источника до расчётной точки на горизонтальную плоскость, м;

$h_s$  – высота источника шума над землёй, м;

$h_r$  – высота приёмника (расчётной точки) над землёй, м.

Главным ограничением данного подхода является отсутствие строгой формулы для вычисления величины  $C_0$  в условиях РФ. Стандарт предписывает использование приближенных значений (в диапазоне от 0 до 5 дБА) или опору на локальный опыт. Применение такого детерминированного подхода, где все многообразие метеорологических явлений усредняется до одного коэффициента, не дает возможности адекватно оценить риски, возникающие при редких, но акустически значимых погодных условиях.

## 1.2 Зарубежный подход: вероятностная модель CNOSSOS-EU

Ключевое отличие европейской методики CNOSSOS-EU от отечественного стандарта заключается в использовании принципов геометрической акустики и вероятностного анализа. Предложенный подход опирается не на привычное усреднение метеорологических параметров, а на их четкое разделение на два типа. Первый – это благоприятные условия (сюда мы относим попутный ветер и температурную инверсию), из-за которых звуковые лучи изгибаются к поверхности земли. Второй тип – однородные условия, соответствующие штилю или встречному ветру. В этом случае лучи либо распространяются прямолинейно, либо уходят вверх. По сути, мы имеем дело с физически обоснованным разделением состояний атмосферы.

Расчёт итогового долгосрочного уровня звука  $L_{LT}$  выполняется как вероятностно-взвешенная сумма:

$$L_{LT} = 10 \cdot \lg [p \cdot 10^{0,1 \cdot L_F} + (1 - p) \cdot 10^{0,1 \cdot L_H}], \quad (4)$$

где  $L_F$  – уровень звука при благоприятных условиях (F), дБА;

$L_H$  – уровень звука при однородных условиях (H), дБА;

$p$  – вероятность появления благоприятных условий за рассматриваемый период (будь то год или сезон), безразмерная величина ( $0 \leq p \leq 1$ ).

Примечательно, что вместо эмпирического коэффициента  $C_0$ , который используется в российском ГОСТ, здесь вводится параметр  $p$ . Значение вычисляется на базе детального анализа климата конкретной местности – изучается «роза ветров» и статистика температурных инверсий. Важно, что учет кривизны звуковых лучей (рефракции) делает модель физически адекватной, что подтверждается современными исследованиями [3], [9]. Если условия благоприятны, радиус кривизны луча  $R$  можно аппроксимировать следующей формулой:

$$R = C_0 / \alpha_{lin}, \quad (5)$$

где  $C_0$  – скорость звука в неподвижной среде, м/с;

$\alpha_{lin}$  – линейный градиент эффективной скорости звука, зависящий от вертикального профиля ветра, 1/с.

Примечательно, что моделирование подобных искривленных траекторий позволяет довольно наглядно описать физику процесса. Становится понятно, как вообще возникают зоны акустической тени. И где именно формируются области усиления шума (рисунок 1).

Переход к вероятностному методу дает возможность наконец-то отказаться от жесткой оценки по принципу «наихудшего случая». На смену ей приходит куда более взвешенный анализ долгосрочных акустических рисков. Для регионов с переменчивой погодой это критически важно. Ведь только так получается полноценно учесть их реальную климатическую специфику [10], [11]. Что немаловажно, точные данные о

профиле ветра сегодня можно получить, используя методы дистанционного зондирования [7], [8]. Это делает модель еще более прикладной.

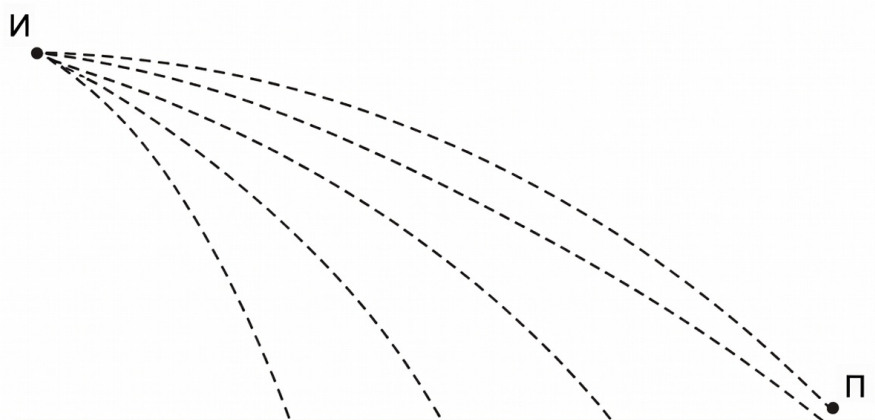


Рисунок 1 – Схема рефракции звуковых лучей при благоприятных метеоусловиях.

Траектории (пунктирные линии), исходящие от источника (И), изгибаются к земле и достигают приёмника (П) как напрямую, так и после отражений (составлено автором на основе [5])

Таким образом, проведённый анализ выявляет фундаментальные различия в детерминированном и вероятностном подходах. Для наглядного сопоставления ключевых концепций, используемых в российской и европейской нормативных базах, сведём их основные характеристики в сравнительную таблицу (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методологических подходов к учёту метеорологических факторов

Параметр сравнения	ГОСТ 31295.2 (РФ)	CNOSSOS-EU (ЕС)	Ключевое различие
Основной подход	Детерминированный, оценка по «наихудшим» условиям.	Вероятностный, оценка долгосрочного риска.	Фундаментальное различие в философии оценки: от фиксации одного значения к управлению рисками.
Модель атмосферы	Упрощённая, однородная среда.	Стратифицированная среда, учёт рефракции (искривления лучей).	Европейский подход физически более корректен, позволяет моделировать зоны тени и усиления звука.
Метеорологическая коррекция	Эмпирическая поправка $C_{met}$ , основанная на коэффициенте $C_0$ без строгой методики расчёта.	Вероятностный класс $r$ , рассчитываемый на основе анализа розы ветров и статистики инверсий.	Подход ЕС требует детальных климатических данных, но обеспечивает более точный и адекватный прогноз.

Продолжение таблицы 1

Результат расчёта	Единый усреднённый уровень звука $L_{AT}(LT)$ .	Вероятностная сумма уровней для разных классов условий	Модель ЕС позволяет оценить не только средний уровень, но и распределение шумовой нагрузки во времени.
-------------------	---	--	--

## 2 Количественная оценка расхождений методик

Для количественной оценки расхождений между детерминированным отечественным подходом и более физически адекватными моделями было выполнено численное моделирование. В качестве эталонной модели, способной точно описывать волновые эффекты в движущейся среде (включая рефракцию и дифракцию), был использован метод параболического уравнения (PE, Parabolic Equation), который в современной атмосферной акустике считается «золотым стандартом» для задач прогнозирования на больших расстояниях [3], [4]. В зарубежной практике модели на основе широкоугольного параболического уравнения (WAPE) активно применяются в целях точного описания акустического поля сложных источников над поглощающей и шероховатой поверхностью земли в рефракционной атмосфере [14]. При этом современные модификации математического аппарата PE направлены на создание фазосохраняющих алгоритмов, исключающих накопление кумулятивных фазовых погрешностей при дальнем распространении звука в стратифицированной движущейся среде с произвольными градиентами скорости ветра и звука [15].

Моделирование проводилось для точечного источника шума (на расчетной частоте 500 Гц) на высоте  $h_s = 2$  м над акустически мягкой поверхностью (трава) на расстояниях до 600 м. Сравнение проводилось для двух принципиально разных метеорологических сценариев, которые наиболее ярко демонстрируют ограничения инженерного подхода.

### 2.1 Сценарий 1: Распространение против ветра

Этот сценарий имитирует формирование зоны акустической тени. Ветер направлен от приёмника к источнику, что приводит к искривлению звуковых лучей вверх, от поверхности земли.

При сопоставлении теоретических результатов расчёта затухания звука для инженерной модели (ГОСТ 31295.2) и эталонных волновых моделей на базе параболического уравнения (PE) выявляются принципиальные физические расхождения. Инженерная модель ГОСТ 31295.2, построенная на детерминированном энергетическом подходе, описывает только плавное и монотонное затухание звука. В свою очередь, строгие волновые решения, представленные в современной литературе по вычислительной атмосферной акустике, демонстрируют совершенно иную физическую картину. На расстоянии около 400 м волновые модели фиксируют резкое падение уровня звука, которое соответствует физической границе формирования зоны метеорологической акустической тени.

Уровень звука внутри этой зоны, в отличие от результатов расчёта по ГОСТ, оказывается значительно ниже. Согласно верифицированным теоретическим данным, в этой области расхождение уровней звукового давления (на частоте 500 Гц) может достигать 15-25 дБ. Данный факт свидетельствует о том, что отечественная методика, неспособная описать эффект рефракции вверх, приводит к существенной переоценке уровня шума на наветренной стороне от источника. Это, в свою очередь, может стать

причиной необоснованного увеличения расчётных размеров СЗЗ и избыточных затрат на шумозащитные мероприятия.

## 2.2 Сценарий 2: Распространение по ветру

В данном сценарии имитируется формирование «звукового канала» за счёт рефракции лучей вниз. При определённых градиентах скорости ветра становится возможным многократное отражение звука от земли, что является причиной интерференции прямой и отражённых волн.

Сопоставление теоретических подходов показывает, что инженерная модель ГОСТ 31295.2 описывает только усреднённое энергетическое затухание, полностью игнорируя фазовые взаимодействия. В то же время точные волновые решения на базе параболического уравнения (PE) способны в полной мере описать сложную интерференционную структуру поля [14]. Данная структура проявляется в выраженном чередовании пространственных максимумов и минимумов уровня звукового давления, обусловленных конструктивным и деструктивным сложением волн.

Хотя энергетическая модель ГОСТ в среднем неплохо описывает уровень «по ветру», она не может предсказать локальные интерференционные максимумы. Если жилая застройка попадает в такой максимум, то в случае тонального шума (например, от трансформаторов [12]) это может вызвать превышение нормативов и жалобы населения, даже при формальном соблюдении ПДУ в усреднённом расчёте. Следовательно, недооценка пиковых уровней шума отечественной методикой в подобных условиях формирует риски для акустического комфорта и здоровья населения.

## Заключение

Проведенный в работе сравнительный анализ выявляет системное методологическое противоречие в отечественной практике прогнозирования шума. На первый взгляд, нормативная база РФ (ГОСТ 31295.2-2005) устанавливает предельно жесткие требования к соблюдению ПДУ. Но при этом сама же опирается на сильно упрощенную детерминированную модель. Физика ветровой и температурной рефракции здесь полностью игнорируется. В условиях сложного климата, типичного для множества российских регионов, такое допущение ведет к серьезным проблемам. На средних и больших расстояниях в прогнозах вылезают огромные погрешности – вплоть до 15–25 дБА.

Что примечательно, численное моделирование вскрыло двойственную природу этих самых погрешностей:

1. С одной стороны, при встречном ветре отечественная методика сильно завышает прогнозируемый шум в зоне акустической тени. Как результат – мы часто получаем совершенно необоснованное увеличение размеров СЗЗ;

2. В то же время пиковые уровни шума в зонах интерференционных максимумов при попутном ветре она, наоборот, занижает. Так формируются реальные риски для здоровья населения. Особенно если речь идет о тональном шуме промышленных объектов.

Европейский же подход (методика CNOSSOS-EU) на этом фоне демонстрирует куда более высокую физическую адекватность. Потому что он изначально базируется на вероятностной оценке погоды и учитывает ту самую кривизну звуковых лучей.

Подводя итог, всё это прямо указывает на острую необходимость разработки адаптированной методики. Иначе повысить достоверность экологических экспертиз в РФ просто не выйдет. Суть ее должна заключаться в интеграции вероятностного подхода к анализу метеоданных. А также во внедрении алгоритмов расчета кривизны звуковых

лучей прямо в отечественную нормативную практику. Подобный шаг наконец-то позволит уйти от устаревшей оценки по принципу «наихудшего случая». Мы сможем перейти к более обоснованному анализу долгосрочных акустических рисков. Причем используя ту климатическую информацию, которая уже давно доступна в России.

### Список использованных источников

1. Ветрова Н.М., Вереха Т.В., Меннанов Э.Э., Судьева Д.В. Экологическая безопасность урбанизированных рекреационных территорий в зоне влияния объектов транспортного строительства // Экономика строительства и природопользования. - 2022. - N 1-2 (82-83). - С. 145-151.
2. Саулова Т.А., Ефремова И.С. Оценка акустического комфорта центральных районов города Красноярска // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. - 2022. - Т. 2. - С. 703-705.
3. Долгушин Д.М., Долгушина О.В., Извеков Ю.А. Лучевая модель траектории упругих волн в неоднородной среде // Международный научно-исследовательский журнал. - 2024. - N 6 (144). - С. 1-8. DOI: 10.60797/IRJ.2024.144.6.
4. Шуруп А.С. Акустическая томография природных сред // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. - 2024. - Т. 79, N 6. - Артикул 2460301. - 20 с.
5. 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 // Official Journal of the European Union. - 2015. - L 168. - P. 1-82.
6. ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613-2:1996) Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета. - М.: Стандартинформ, 2006. - 23 с.
7. Баранов Н.А. Восстановление вектора скорости ветра по данным лидарного зондирования методом сплайн-аппроксимации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. - 2023. - N 2(30). - С. 83-97. DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.009.
8. Сущенко А.А. Об актуальности исследования задач акустической томографии методами теории переноса излучения // Вестник ДВО РАН. - 2021. - N 2. - С. 104-114.
9. Семенова И.В., Корнеева А.А. Поле направленного низкочастотного акустического излучателя в пограничном слое атмосферы // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. - 2023. - Т. 29, N 1. - С. 64-73. DOI: 10.18287/2541-7525-2023-29-1-64-73.
10. Васильева А.В., Забалканская Л.Э., Буторина М.В., Васильев А.П. Расчет затухания шума железнодорожного транспорта в условиях сельской застройки // Noise Theory and Practice. - 2024. - Т. 10, N 4. - С. 59-68.
11. Терехов А.Л. Разработка методов снижения шума на газотранспортных предприятиях и внедрение полученных результатов // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». - 2024. - N 4 (60). - С. 223-236.
12. Буторина М.В., Васильев А.П., Васильева А.В. Расчет распространения внешнего шума промышленного предприятия // Noise Theory and Practice. - 2025. - Т. 11, N 3. - С. 32-42.
13. Kok A., Bakermans M., Buitelaar S. Noise mapping 2021: how to compare results to previous rounds? // Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association (Forum Acusticum). - Turin, Italy, 2023. - P. 2347-2354. DOI: 10.61782/fa.2023.0202.

14. Kayser B. Open access of a wide-angle parabolic equation model for sound propagation in a moving atmosphere above an absorbing and rough ground // Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association (Forum Acusticum). - Turin, Italy, 2023. - P. 5539-5544. DOI: 10.61782/fa.2023.0369.

15. Ostashev V.E., Colas J., Dragna D., Wilson D.K. Phase-preserving narrow- and wide-angle parabolic equations for sound propagation in moving media // The Journal of the Acoustical Society of America. - 2024. - Vol. 155, N 2. - P. 1086-1102. DOI: 10.1121/10.0024460.

## References

1. Vetrova N.M., Verekha T.V., Mennanov E.E., Sudyeva D.V. Environmental safety of urbanized recreational territories in the influence zone of transport construction objects // Economics of construction and nature management. - 2022. - N 1-2 (82-83). - P. 145-151.

2. Saulova T.A., Efremova I.S. Acoustic comfort assessment of the central districts of Krasnoyarsk // Actual problems of aviation and cosmonautics. - 2022. - Vol. 2. - P. 703-705.

3. Dolgushin D.M., Dolgushina O.V., Izvekov Y.A. Ray model of the trajectory of elastic waves in an inhomogeneous medium // International Research Journal. - 2024. - N 6 (144). - P. 1-8. DOI: 10.60797/IRJ.2024.144.6.

4. Shurup A.S. Acoustic tomography of natural media // Moscow University Physics Bulletin. - 2024. - Vol. 79, N 6. - Article 2460301. - 20 p.

5. 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 // Official Journal of the European Union. - 2015. - L 168. - P. 1-82.

6. GOST 31295.2-2005 (ISO 9613-2:1996) Noise. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2. General method of calculation. - Moscow: Standartinform, 2006. - 23 p.

7. Baranov N.A. Restoration of the wind velocity vector from lidar sounding data by spline approximation // Information and mathematical technologies in science and management. - 2023. - N 2(30). - P. 83-97. DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.009.

8. Sushchenko A.A. On the relevance of studying the problems of acoustic tomography by methods of radiation transfer theory // Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences. - 2021. - N 2. - P. 104-114.

9. Semenova I.V., Korneeva A.A. Field of a directional low-frequency acoustic emitter in the atmospheric boundary layer // Vestnik of Samara University. Natural Science Series. - 2023. - Vol. 29, N 1. - P. 64-73. DOI: 10.18287/2541-7525-2023-29-1-64-73.

10. Vasileva A.V., Zabalkanskaya L.E., Butorina M.V., Vasilev A.P. Calculation of noise reduction of railway transport in conditions of rural areas // Noise Theory and Practice. - 2024. - Vol. 10, N 4. - P. 59-68.

11. Terekhov A.L. Developing methods of noise reduction for gas transmission providers and implementing acquired results // Scientific and technical collection «Vesti gazovoy nauki». - 2024. - N 4 (60). - P. 223-236.

12. Butorina M.V., Vasilev A.P., Vasileva A.V. Prediction of external noise propagation from an industrial plant // Noise Theory and Practice. - 2025. - Vol. 11, N 3. - P. 32-42.

13. Kok A., Bakermans M., Buitelaar S. Noise mapping 2021: how to compare results to previous rounds? // Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association (Forum Acusticum). - Turin, Italy, 2023. - P. 2347-2354. DOI: 10.61782/fa.2023.0202.

14. Kayser B. Open access of a wide-angle parabolic equation model for sound propagation in a moving atmosphere above an absorbing and rough ground // Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association (Forum Acusticum). - Turin, Italy, 2023. - P. 5539-5544. DOI: 10.61782/fa.2023.0369.

15. Ostashev V.E., Colas J., Dragna D., Wilson D.K. Phase-preserving narrow- and wide-angle parabolic equations for sound propagation in moving media // The Journal of the Acoustical Society of America. - 2024. - Vol. 155, N 2. - P. 1086-1102. DOI: 10.1121/10.0024460.