

А. М. Осипова¹✉, А. А. Якименко^{1,2}

Платформа для экспериментов по локализации акустического источника с учётом факторов окружающей среды

¹Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: rowleynau@mail.ru

Аннотация. В статье представлена разработанная платформа, предназначенная для проведения экспериментов по локализации акустических источников с учётом влияния факторов окружающей среды. Актуальность данной работы связана с отсутствием доступных программных инструментов, которые позволяют проводить математическое моделирование методом разности времён прихода сигнала (TDOA) с автоматическим учётом метеорологических условий. Цель исследования заключается в создании клиент-серверного приложения, позволяющего решать прямую и обратную задачи акустической локализации в веб-браузере, без необходимости установки дополнительного программного обеспечения. При реализации платформы были использованы Python с микрофреймворк Flask для серверной части, реляционная база данных PostgreSQL и для интерактивной визуализации API Яндекс.Карт. При локализации учитывается влияние погодных условий, включая температуры, влажности, а также скорости и направления ветра на эффективную скорость распространения звука, а также реализован учёт типа подстилающей поверхности посредством интеграции данных с внешних сервисов (Open-Meteo, Open-Elevation, Overpass). Платформа предоставляет пользователям возможность создавать, сохранять в базе данных и взаимодействовать с собственными проектами, а также организовать автоматизированные серийные эксперименты с изменением выбранных параметров и последующим экспортом результатов в формате CSV. Представленная разработка может быть полезна для научных и образовательных учреждений, занимающихся исследованием точности методов акустической локализации в условиях изменяющихся метеословий.

Ключевые слова: акустическая локализация, TDOA, веб-платформа, влияние факторов окружающей среды

А. М. Osipova¹✉, А. А. Yakimenko^{1,2}

A platform for experiments on acoustic source localisation, taking environmental factors into account

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: rowleynau@mail.ru

Abstract. This article presents a newly developed platform designed for conducting experiments on the localisation of acoustic sources, taking into account the influence of environmental factors. The relevance of this work stems from the lack of available software tools that enable mathematical modelling using the time difference of arrival (TDOA) method with automatic consideration of meteorological conditions.

The aim of the research is to create a client-server application that enables the direct and inverse problems of acoustic localisation to be solved in a web browser, without the need to install additional software. The platform was implemented using Python with the Flask microframework for the server-side, a PostgreSQL relational database, and the Yandex.Maps API for interactive visualisation. The localisation process takes into account the influence of weather conditions, including temperature, humidity, and wind speed and direction, on the effective speed of sound propagation; it also accounts for the type of underlying surface through the integration of data from external services (Open-Meteo, Open-Elevation, Overpass). The platform enables users to create, save to a database and interact with their own projects, as well as to organise automated batch experiments involving changes to selected parameters and the subsequent export of results in CSV format. This development may be useful for scientific and educational institutions engaged in researching the accuracy of acoustic localisation methods under changing weather conditions.

Keywords: acoustic localisation, TDOA, web platform, influence of environmental factors

Введение

Задача определения положения источника звукового сигнала методом разности времён прихода сигнала (TDOA) широко применяется в различных областях, включая мониторинг городского шума и поисково-спасательные операции [1–3]. Точность локализации по TDOA существенно зависит от внешних факторов, таких как температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра, а также типа подстилающей поверхности [4, 5]. Поскольку скорость звука варьируется в зависимости от этих условий, использование фиксированного значения может приводить к систематическим ошибкам при определении координат источника.

В данной работе поставлена задача разработки веб-платформы для проведения экспериментов по локализации акустического источника с учётом влияния факторов окружающей среды.

Методы и материалы

Для локализации акустического источника выбран метод TDOA (Time Difference of Arrival) [4], основанный на измерении разницы времени прихода акустического сигнала к приемникам. Временная задержка между двумя приемниками выражается как:

$$\Delta t_{i(j)} = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}}{c_i} - \frac{\sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2}}{c_j}, \quad (1)$$

где $\Delta t_{i(j)}$ – временная задержка между i -м и j -м приемниками; (x, y) – координаты источника звука; (x_i, y_i) , (x_j, y_j) – координаты i -го и j -го микрофонов C_i , C_j – скорость звука для соответствующих микрофонов.

Скорость распространения звука сильно зависит от погодных условий. В исследованиях отмечают такие параметры, как температура, влажность и ветер [5].

Формула Лапласа [6] используется для расчёта скорости звука в воздухе с учётом температуры и влажности:

$$C = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}}, \quad (2)$$

где C – скорость звука, γ – коэффициент адиабаты (для воздуха $\approx 1,4$), R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура в Кельвинах, M – молярная масса воздуха. При увеличении содержания водяного пара эффективная молярная масса смеси уменьшается, что изменяет скорость звука.

Влияние ветра учитывается поправкой на направление и скорость воздушного потока относительно направления звуковой волны [7]. Эффективная скорость звука при ветре определяется формулой:

$$C_{\text{вект}} = C + v_{\text{ветра}} \cdot \cos(\theta_{\text{ветра}} - \theta_{\text{звука}}), \quad (3)$$

где $C_{\text{вект}}$ – эффективная скорость распространения звука в заданном направлении, C – скорость звука в неподвижном воздухе (рассчитанная по формуле Лапласа), $v_{\text{ветра}}$ – скорость ветра, $\theta_{\text{ветра}}$ – направление ветра, $\theta_{\text{звука}}$ – направление распространения звука.

При распространении акустической волны на открытой местности на сигнал влияет тип подстилающей поверхности. Для учёта этого эффекта применяется модель эквивалентного поверхностного импеданса, предложенная в работе по распространению звука над водной поверхностью [8]. В разработанном алгоритме модель применяется разных типов подстилающей поверхности. Отражение звуковой волны от поверхности описывается коэффициентом отражения:

$$R = \frac{Z_s - \rho c}{Z_s + \rho c}, \quad (4)$$

где Z_s – эффективный акустический импеданс поверхности, ρ – плотность воздуха, C – скорость звука.

Платформа реализована с использованием клиент-серверной архитектуры. Серверная часть написана на Python и обеспечивает обработку HTTP-запросов, взаимодействие с базой данных PostgreSQL и выполнение математических расчётов. Клиентская часть реализована в формате одностраничного веб-приложения и включает в себя карту на базе API Яндекс. Обмен данными происходит с помощью REST API в формате JSON. Для защиты API-запросов применяется аутентификация по Bearer-токену. Сервер также взаимодействует с внешними API: Open-Meteo, Open-Elevation и Overpass.

Ознакомиться с моделью базы данные можно на рисунке 1. Она содержит следующие основные таблицы: users с полями идентификатор, email, даты регистрации и входа, таблицу datasets с идентификатором, названием, даты создания и изменения, внешним ключом на пользователя, таблицу registrators с идентификатором, названием, координатами, временем прихода сигнала, погрешностью, метеопараметрами и внешним ключом на проект, таблицу sources с идентификатором, названием, координатами, внешним ключом на проект.

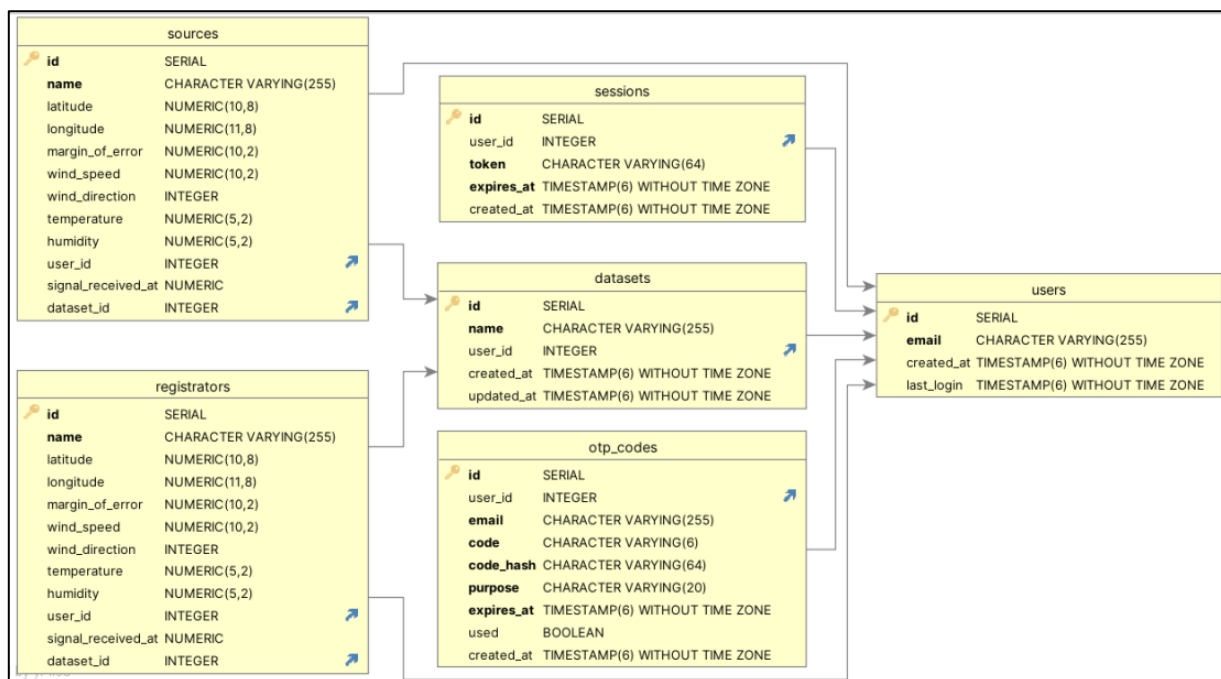


Рис. 1. Физическая модель базы данных

Пользовательский интерфейс включает в себя страницу аутентификации и основную. Страница аутентификации содержит поле ввода адреса электронной почты и кнопку «Получить код». После отправки кода на экране появляется поле для ввода шестизначного ОТП-кода с обратным отсчётом истечения периода действия кода. При успешной верификации выполняется переход на рабочую область.

Основная страница (рис. 3) содержит интерактивную карту, меню и боковой панели управления. При вызове контекстного меню карты, можно добавить на карту регистратор или источник.

В верхней части расположено меню с разделами «файл», включающее свойства, сохранение, загрузку и создание проектов, «панель» с управлением отображения легенды и учёта погодных условий, «эксперименты», а также кнопки для решения обратной и прямой задач и выхода из аккаунта.

Модальное окно свойств проекта содержит три вкладки: «Главная» с названием проекта, датой создания и последнего изменения, «Элементы» со списком регистраторов и источников текущего проекта с возможностью удаления и «Добавить» с выбором регистраторов и источников из других проектов пользователя для повторного использования.

Модальное окно «мои проекты» содержит список проектов пользователя с поиском по названию, информацией о датах и количестве элементов, а также кнопками открытия и удаления проекта.

В правой панели находится дата фиксации времени прихода сигнала. Также, как было описано ранее, в нем могут быть отображены легенда и режимы влияния погодных условий. Настройки учета влияния позволяют настраивать не

только сам факт учета, но и определить способ получения значений либо из сторонних арі, либо задание вручную.

У регистраторов, размещенных на карте, есть контекстное меню, позволяющее удалить элемент или открыть параметры (рис. 2). Окно параметров содержит название, координаты, время получения сигнала, погрешность измерения, а также температура, скорость и направление ветра, влажность, если включен их учет при локализации. Изменения применяются при нажатии на кнопку «Изменить».

Рис. 2. Окно параметров регистратора

Панель результатов расположена в нижней части экрана. После проведения вычислений в ней появляются значения учитываемых погодных условий, скоростью распространения звукового сигнала и координаты регистраторов и источника. При серийном эксперименте результат дополняется графиком.

Результаты

Рассмотрим сценарий использования платформы от аутентификации до проведения эксперимента.

На первом этапе осуществляется аутентификация: пользователь переходит на стартовую страницу, вводит адрес электронной почты и получает шестизначный ОТР-код. Этот код вводится в соответствующее поле, после чего система проверяет его правильность и инициирует сессию. При первом входе автоматически создаётся учётная запись пользователя.

На втором этапе происходит создание проекта и размещение элементов. После авторизации на экране отображается основная страница с интерактивной картой. При помощи контекстного меню (клик правой кнопкой мыши) пользователь добавляет регистраторы, которые визуализируются на карте. Расположим 3 регистратора с погрешностью 20% по координатам широта 54°54'21,90" долгота 82°38'58,83", широта 54°57'12,72" долгота 82°47'57,71" и широта 54°51'2,36"

долгота 82°50'35,91" времени получения сигнала 19.71715848 21.65986442 23.48788087 соответственно и погрешностью измерения 20% у каждого.

Третий этап связан с настройкой среды. В боковой панели пользователь управляет учетом определенных факторов среды. Метеорологические параметры могут задаваться как вручную через параметры регистратора, так и подгружаться автоматически с использованием API по дате проведения эксперимента. Выберем учет температуры, влажности, скорости и направления ветра с автоматической подгрузкой.

Четвёртый этап предусматривает выполнение расчёта. При нажатии на кнопку «Рассчитать» координаты регистраторов и параметры учета среды передаются на сервер, где решается задача TDOA с учетом заданных условий. Результаты отображаются на карте в виде источника звукового сигнала, области погрешности и направления ветра, а также в нижней панели: координаты источника, площадь области погрешности и таблица с параметрами регистраторов, вводных и рассчитанных, как показано на рисунке 3.

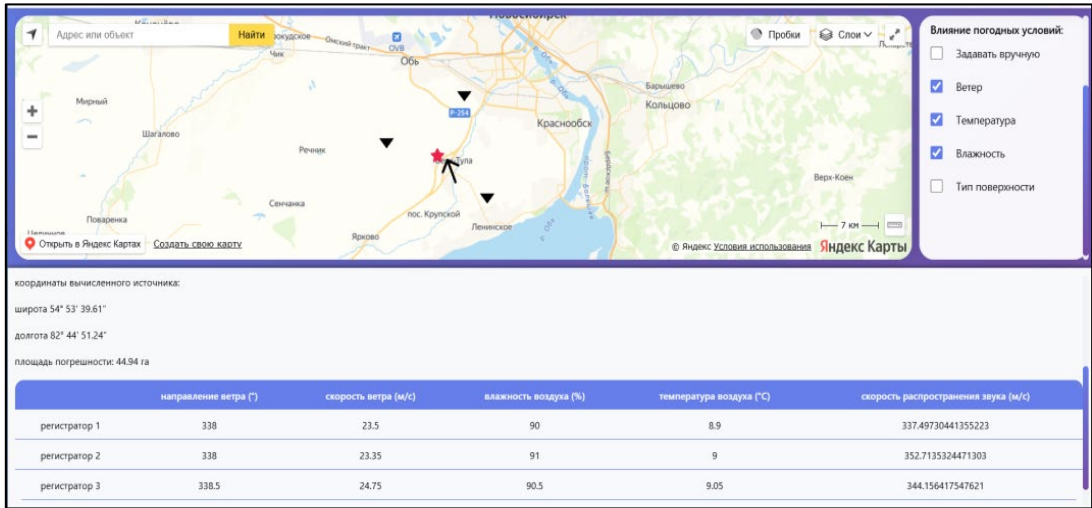


Рис. 3. Результаты локализации источника звукового сигнала с учетом температуры, влажности, скорости и направления ветра и автоматической подгрузкой

На пятом этапе проведем серийные эксперимент с температурой окружающей среды. Для исследования пользователю необходимо открыть окно настройки соответствующего эксперимента, задать диапазон и количество шагов. Определим диапазон от -30 до 30 с шагов 10. Платформа автоматически выполняет серию расчётов, формирует сводную таблицу и строит график зависимости площади неопределённости от температуры (рис. 4). Результаты можно экспортировать в формате CSV и png.

Результаты экспериментов с температурой					
№ эксп.	Температура (°C)	Широта источника	Долгота источника	Скорость звука (м/с)	Площадь погрешности
1	-30.00	54° 53' 43.61"	82° 45' 2.27"	312.56	38.12 га
2	-23.33	54° 53' 43.45"	82° 45' 2.00"	316.81	34.18 га
3	-16.67	54° 53' 44.26"	82° 45' 1.41"	321.01	41.05 га
4	-10.00	54° 53' 43.72"	82° 45' 1.35"	325.16	41.68 га
5	-3.33	54° 53' 44.11"	82° 45' 0.97"	329.25	39.02 га

Рис. 4. Фрагмент результатов проведения эксперимента с температурой

Обсуждение

Сквозной сценарий демонстрирует полный цикл работы с платформой. При решении обратной задачи с тремя регистраторами и автоматической подгрузкой метеоданных вычисленный источник локализован в точке 54°53'39,61" с.ш., 82°44'51,24" в.д. с площадью неопределённости 44,94 га. Эффективные скорости звука для регистраторов различаются вследствие пространственной вариации метеопараметров и влияния ветра, что подтверждает целесообразность индивидуального расчёта скорости для каждой трассы. Серийный эксперимент с варьированием температуры от –30°C до +30°C показал высокую стабильность координатной оценки: разброс по широте не превысил 1,3", 40 м., по долготе отмечено монотонное смещение на 3,8", 45 м., связанное с систематическим влиянием ветра.

Заключение

Разработана веб-платформа для проведения экспериментов по локализации акустического источника с учётом факторов окружающей среды. В платформу интегрирована возможность автоматического получения метеорологических данных, реализованы режимы решения прямой и обратной задач локализации, а также проведение серийных экспериментов.

В рамках эксперимента с использованием трёх регистраторов подтверждена функциональность платформы: локализованный источник определён с площадью области неопределённости, при этом эффективные скорости звука, рассчитанные для каждого регистратора, проявили вариативность в зависимости от локальных метеоусловий. Серийное испытание, в ходе которого температура изменялась в диапазоне от –30°C до +30°C, продемонстрировало устойчивость координатной оценки.

Таким образом, разработанная платформа предоставляет исследователям инструмент для оперативного выявления влияния окружающей среды на точность локализации, что подчёркивает её потенциал в применении при научных исследованиях и образовательной деятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Davis D. Mobile sensing for the localization and tracking of acoustic sources in urban environments / D. Davis, W. Mahmoud, M. Denis // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2023. – Vol. 153. – № 3. – P. A44.
2. 석윤정 , KIM SUNG JAE , Park S.Y., Jin Ho Suh, A Study on the Survivor Detection Module and Least-Squares Sound Source Localization Algorithm for Victim Search in Narrow Spaces. – 2025. V. 20. No.1. – P. 120 – 129.
3. Seok Y.-J., Kim S.-J, Park S.-Y., Suh J.-H. A Study on the Survivor Detection Module and Least-Squares Sound Source Localization Algorithm for Victim Search in Narrow Spaces // Journal of Korea Robotics Society. –2025. - V. 20. - No. 1.- P. 120–129.
4. Шаход Д. М. Анализ подходов и методов локализации акустических источников // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2024. – Т. 17. – № 3. – С. 380–398.
5. Sai Charan Trikootam, Maarten Hornikx The wind effect on sound propagation over urban areas: Experimental approach with an uncontrolled sound source // Building and Environment. – 2019. – № 149. – С. 561-570.
6. Hornikx M., Dohmen M., Conen K. The wind effect on sound propagation over urban areas: Predictions for generic urban sections // Building and Environment. – 2018. – № 144. – С. 519–531.
7. Суторихин И. А., Литвиненко С. А. Климатические и природные факторы, влияющие на распространение акустических волн // Известия Алтайского государственного университета. – 2011. – Т. 69. – № 1-1. – С. 197–199.
8. Vecchiotti A., Ryan T., Vignola J., Turo D. Atmospheric sound propagation over rough sea: numerical evaluation of equivalent acoustic impedance of varying sea states // Acoustics. – 2024. – Vol. 6. – P. 489–508. – DOI: 10.3390/acoustics6020026.

© А. М. Осипова, А. А. Якименко, 2026