

АКУСТИКА КИПЕНИЯ С НЕДОГРЕВОМ НА ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВАТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

М.С. Лебедев, А.А. Тагильцев, А.В. Кулик, В.М. Чудновский

Исследуются акустические сигналы, возникающие при кавитации, инициированной лазерным нагревом воды в окрестности торца оптоволокну, погружённого в воду. Показано, что рост и схлопывание паровой фазы в окрестности торца оптоволокну (лазерного нагревательного элемента), по которому распространяется лазерное излучение, генерируют характерные для элементарного акта вскипания акустические сигналы, которые предшествуют появлению сигналов большой амплитуды. Установлено, что сигналы большой амплитуды вызваны ударными волнами, возникающими при коллапсе основного пузырька и вторичных пузырьков – «отскоков».

Ключевые слова: кавитация, паровые пузырьки, лазерное излучение, нагрев, вскипание, звуковой импульс, акустические колебания, ударные волны

Введение

Кавитация, инициированная лазерным нагревом жидкости, возникает при ее вскипании с недогревом [1], когда паровой пузырёк возникает в относительно «холодном» окружении – в среде с температурой ниже температуры насыщения. В таких условиях паровой пузырёк увеличивается до некоторого максимального объёма, а затем начинает ускоренно схлопываться, что, собственно, и определяет его как кавитационный [1, 2]. Нагрев жидкости, рост и схлопывание пузырька, а также рост и схлопывание вторичных пузырьков – «отскоков», возникающих при вскипании с недогревом, сопровождаются генерацией звука и ударных волн. В работе исследуются акустические сигналы, возникающие при вскипании воды под действием непрерывного лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1,47$ мкм, проходящего по оптоволокну. Кончик кварц-кварц полимерного оптоволокну диаметром 600 мкм установлен торцом вертикально вниз в кювете с водой при температуре среды 300 К.

Результаты исследований имеют множество практических применений в области обработки и очистки поверхностей, а также в технологических процессах, связанных с воздействием мощных акустических сигналов, ударных волн и кумулятивных струй на различные материалы, в том числе представляющие интерес для подводной техники.

Методика и результаты эксперимента

На рис. 1 показаны кадры видеосъёмки лазерного нагрева и вскипания воды в окрестности торца оптоволокну, по которому распространяется лазерное излучение мощностью 5 Вт с длиной волны 1,47 мкм. Это излучение хорошо поглощается в воде с коэффициентом $k \sim 25$ см⁻¹ [3], что позволяет инициировать вблизи торца оптоволокну объёмное вскипание жидкости. Съёмка велась в стеклянной кювете с размерами 12,5 × 2,3 × 4,1 см, заполненной недеаэрированной водой. Использовалась скоростная видеокамера FASTCAM SA3 (режим съёмки 252000 кадров в секунду), когда подсвечивающее лазерное излучение с длиной волны 520 нм направлено в объектив видеокамеры.

Из рис. 1 следует, что в результате поглощения в окрестности торца оптоволокну лазерное излучение локально нагревает воду до температуры кипения. Возникает пузырёк, который нарастает, а затем, по причине контакта с окружающей «холодной» жидкостью, схлопывается с генерацией кумулятивных струй. Первые 4 кадра (рис. 1) показывают относительно медленный процесс нагрева воды (появление затемненной области перед торцом оптоволокну) за время $\tau = 6 \times 10^{-2}$ с. Это время на два порядка больше времени роста и схлопывания пузырька $\tau = 4,5 \times 10^{-4}$ с (кадры 5–17, рис. 1). На кадрах 18–36 показаны рост

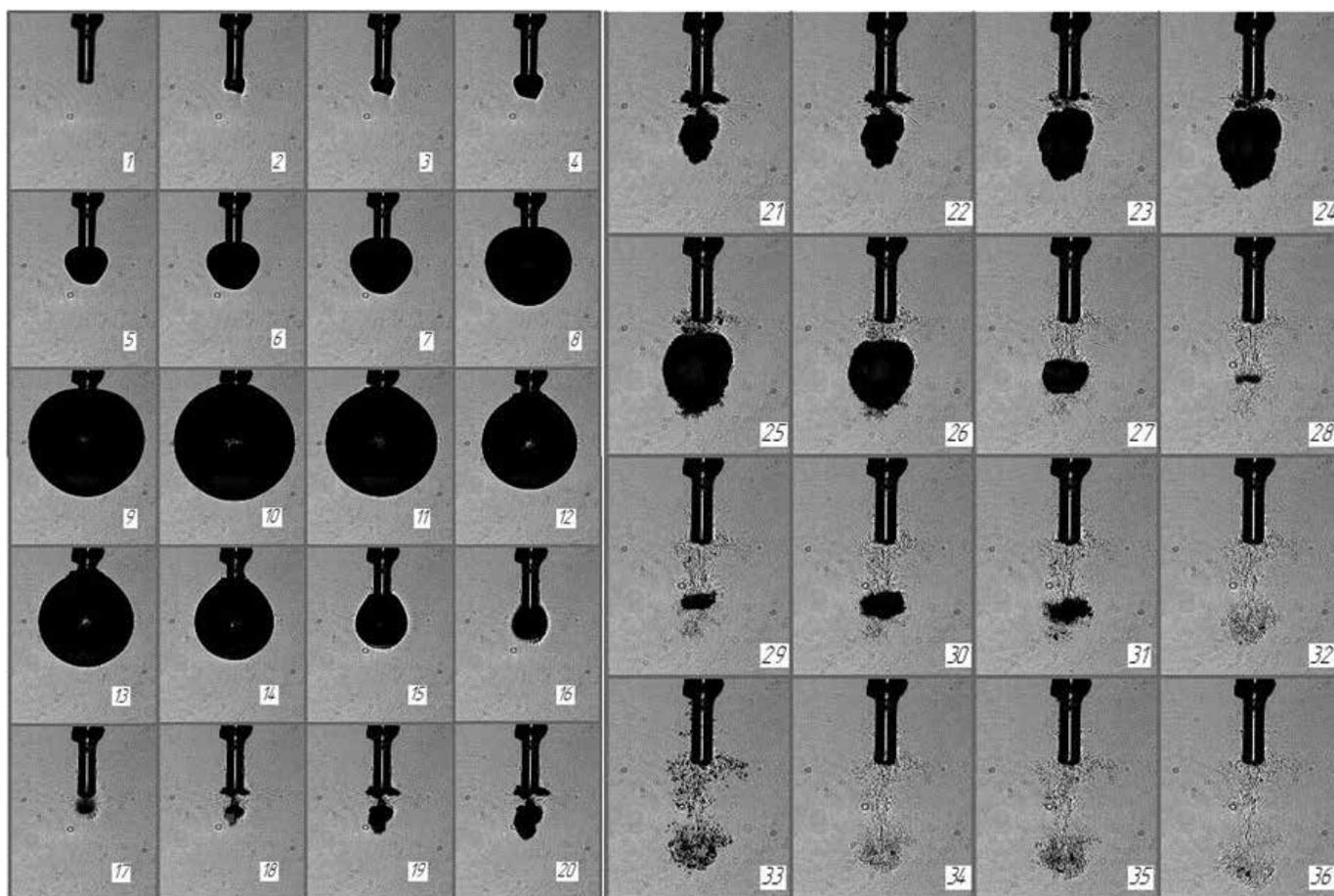


Рис. 1. Рост и схлопывание парового пузырька при лазерном нагреве и вскипании воды в окрестности кончика оптоволоконна

и схлопывание «отскока» (вторичное вскипание [4]) и затопленная кумулятивная струя, направленная вглубь жидкости. На всех этапах динамики парового пузырька возникает звук, особенно в начальный момент ускоренного роста и в момент схлопывания, когда возникают ударные волны.

Измерение акустических сигналов, возникающих в процессе лазерной кавитации, инициированной на лазерном нагревательном элементе, проводили с использованием широкополосного калиброванного гидрофона 8103 (производство Bruel & Keiur, полоса частот 0,1–180 кГц, чувствительность при приеме 26 мкВ/Па) в прозрачной камере из стекла размерами 26×10×16 см, заполненной водой (рис. 2).

Оптоволоконно с помощью многозвенных держателей с захватами удерживается в центре камеры так, чтобы

торцевая его часть находилась в водном объеме на средней глубине на различных расстояниях от гидрофона. Выходной сигнал гидрофона регистрировался милливольтметром ВЗ-56 и усиленным поступал на внешнюю звуковую карту Sound Blaster X-Fi 5.0 (максимально поддерживаемая частота дискретизации 200 кГц, уровень квантования разрядностью 24 бит, регистрируемая полоса частот 100–45000 Гц), далее записывался и обрабатывался на ПК. Для регистрации, обработки сигналов и визуализации результатов использовалась программа SpectraPlus. В экспериментах использовалось лазерное излучение оптической мощностью 6 Вт.

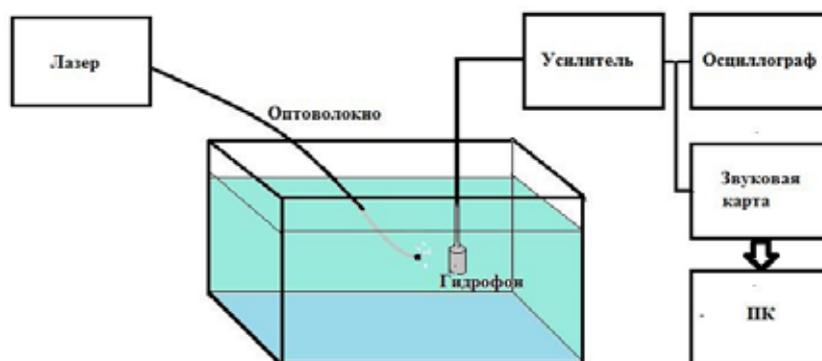


Рис. 2. Схема эксперимента

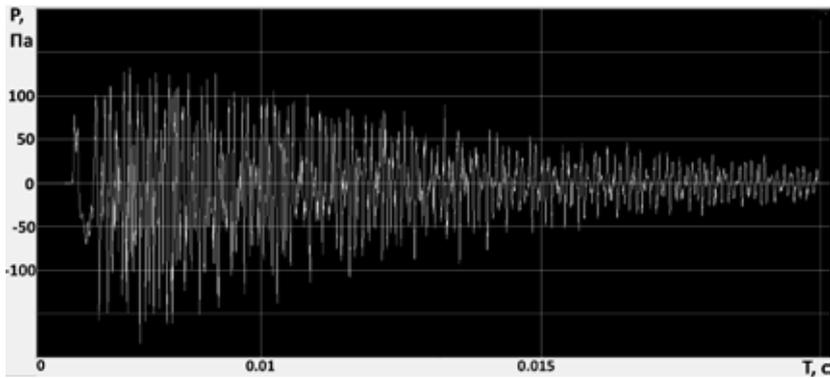


Рис. 3. Запись сигнала во временной области

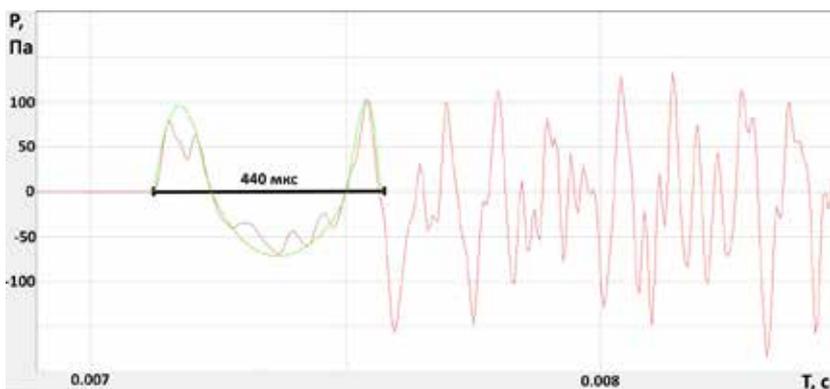


Рис. 4. Масштабированный фрагмент начала сигнала

На рис. 3 показан типичный акустический сигнал, генерируемый при нагреве и вскипании воды в окрестности торца оптоволоконна, на рис. 4 – осциллограмма зарегистрированного в начале процесса фрагмента сигнала, на рис. 5 – спектрограмма, а на рис. 6 – амплитудно-частотный спектр в режиме удержания/представления максимальных значений амплитуды («Peak Hold»). Гидрофон установлен на расстоянии 20 мм от торца оптоволоконна.

Спектр указывает на появление низкочастотной составляющей в начале записи в полосе до $\sim 7\text{--}8$ кГц, предвещающей более высокочастотный процесс на двух преобладающих частотах $\sim 8,6$ кГц и $\sim 12,5$ кГц.

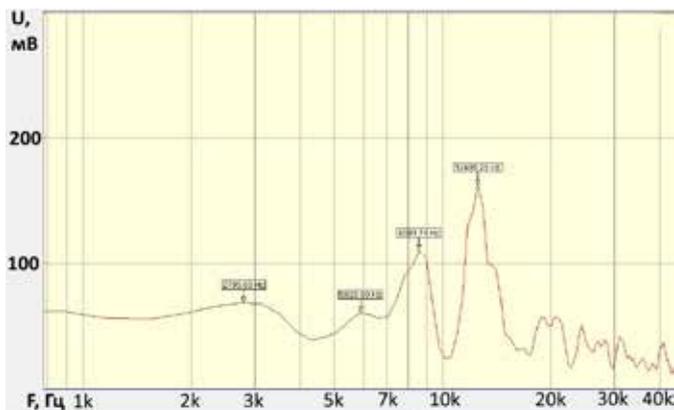


Рис. 6. Амплитудно-частотное представление сигнала (см. рис. 3)

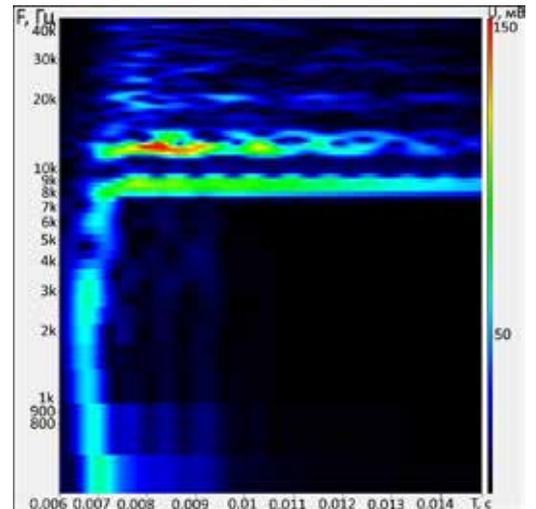


Рис. 5. Спектрограмма фрагмента сигнала (размер окна анализа 512 отсчетов)

Из рис. 3 и 4 следует, что вначале возникает акустический сигнал с амплитудой до ~ 75 Па и длительностью $\tau \sim 440$ мкс, который предшествует последующему цугу сигналов с более высокими амплитудами, экспоненциально уменьшающимися во времени. Длительность этого первого сигнала очень близка длительности роста и схлопывания парового кавитационного пузырька (450 мкс), показанного на рис. 1 (кадры 5–17). Если сравнить форму этого сигнала с формой сигнала, полученного Б.М. Дорофеевым [6] для элементарного акта вскипания (роста и схлопывания одиночного пузырька), то подобие очевидно (см. рис. 2, огибающая, выделенная зеленым цветом).

Заключение

В спектре акустического сигнала определяются 4 основных максимума, составленных из сложения минимум двух перекрывающихся частотных полос. Спектрограмма показывает, что максимумы на 8,6 кГц и 12,5 кГц возникают на ~ 450 мкс позже, чем максимум 2,8 кГц. Максимумы в спектре на 8,6 кГц и 12,5 кГц близки к собственным частотам стеклянной камеры, в которой производились измерения. Отсюда следует, что начальный акустический сигнал возникает, собственно, в элементарном акте вскипания, когда одиночный паровой пузырёк нарастает

и схлопывается в недогретой до температуры насыщения водной среде, тогда как цуг последующих амплитудных колебаний – результат возбуждения колебаний стенок кюветы под действием ударных волн, возникающих при первом и последующих коллапсах кавитационного парового пузырька (см. рис. 1, кадры 17, 28, 32), а также многократно отражённых от стенок кюветы ударных волн.

Следует добавить, что акустический шум, соответствующий кипению воды, в целом не изменяется при изменении расстояния от торца оптоволоконного гидрофона. С увеличением расстояния от гидрофона до торца оптоволоконного в горизонтальной и вертикальной плоскостях характер сигнала и его спектральные составляющие в экспериментальной камере в режиме непрерывного лазерного излучения также существенно не меняются. Таким образом, в установленном режиме звуковое поле, возникающее при кипении воды в окрестности лазерного нагревательного элемента, носит диффузный характер.

Зная амплитуду акустических сигналов, можно оценить долю энергии лазерного излучения, которая перешла в звук. Оценка в приближении плоской волны для максимальных амплитуд звукового давления показывает, что в акустическую переходит ~ 1% лазерной энергии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00189, <https://rscf.ru/project/22-19-00189/>.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Несис Е.И. Кипение жидкостей. М.: Изд-во «Наука», 1973. 280 с.
2. Chudnovskii V.M., Levin A.A., Yusupov V.I., Guzev M.A., Chernov A.A. The formation of a cumulative jet during the collapse of a vapor bubble in a subcooled liquid formed as a result of laser heating // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 150. P.119286. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119286>.
3. Deng R., He Y., Qin Y., Chen Q., Chen L. Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum (900–2500 nm) // Yaogan Xuebao - Journal of Remote Sensing. 2012. Vol. 16, No. 1. P. 192–206.
4. Адамова Т.П., Чудновский В.М., Елистратов Д.С. Самопроизвольное (спонтанное) вскипание затопленных струй, генерируемых при коллапсе паровых пузырьков // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48, вып. 1. С. 19–21. DOI: 10.21883/PJTF.2022.01.51873.18991
5. Дорофеев Б.М., Волкова В.И. Акустический метод исследования роста и схлопывания пузырька пара при кипении // Акуст. журн. 2003. Т. 49, № 6. С. 794–798.

Для цитирования:

Лебедев М.С., Тагильцев А.А., Кулик А.В., Чудновский В.М. АКУСТИКА КИПЕНИЯ С НЕДОГРЕВОМ НА ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВАТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ // Подводные исследования и робототехника. 2024. №. 2 (48). С. 16–28. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_48_02_03. EDN: LYHPGX.

Справка об авторах

ЛЕБЕДЕВ Михаил Сергеевич, к.т.н., младший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7

Область научных интересов: гидроакустика, корреляционный и спектральный анализ

E-mail: lebedevms@poi.dvo.ru

Тел.: +7(423) 231-14-00

ORCID: 0000-0002-6859-2001

ТАГИЛЬЦЕВ Александр Анатольевич, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7

Область научных интересов: гидроакустические антенны и преобразователи, акустические измерения

E-mail: atagiltcev@poi.dvo.ru

Тел.: +7(423) 231-14-00

ORCID: 0000-0001-9207-4418

КУЛИК Александр Валерьевич, инженер-исследователь

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7

Область научных интересов: энергетика, кавитация, оптика

E-mail: kulik_av@dvfu.ru

Тел.: +7 (423) 231-18-50

ORCID: 0009-0000-5027-5713

ЧУДНОВСКИЙ Владимир Михайлович, д.б.н., главный научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7

Область научных интересов: лазерная биофизика, кавитация, гидродинамика

E-mail: vm53@mail.ru

Тел.: +7 (924) 434-79-80

ORCID: 0000-0003-2000-4810



ACOUSTICS OF BOILING WITH UNDERHEATING ON A LASER HEATING ELEMENT

M.S. Lebedev, A.A. Tagil'cev, A.V. Kulik, V.M. Chudnovskij

We study acoustic signals arising during cavitation initiated by laser heating of water in the vicinity of the end of an optical fiber immersed in water. It is shown that the growth and collapse of the vapor phase in the vicinity of the end of the optical fiber (laser heating element), along which laser radiation propagates, generate acoustic signals characteristic of the elementary act of boiling, which precede the appearance of large-amplitude signals. It has been established that large amplitude signals are caused by shock waves that arise during the collapse of the main bubble and secondary bubbles - "rebounds".

Keywords: cavitation, vapor bubbles, laser radiation, heating, boiling, sound pulse, acoustic vibrations, shock waves

References

1. Nesis E.I. Kipenie zhidkostej. Iz-vo «Nauka». Moskva. 1973. 280 p.
2. Chudnovskij V.M., Levin A.A., Yusupov V.I., Guzev M.A., Chernov A.A. The formation of a cumulative jet during the collapse of a vapor bubble in a subcooled liquid formed as a result of laser heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 150. P. 119286, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119286>.
3. Deng R., He Y., Qin Y., Chen Q., Chen L. Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum (900–2500 nm). *Yaogan Xuebao - Journal of Remote Sensing*. 2012. Vol. 16. No. 1. P. 192-206.
4. Adamova T.P., Chudnovskij V.M., Elistratov D.S. Samoproizvol'noe (spontannoe) vskipanie zatoplennyh struj, generiruemih pri kollapse parovyh puzyr'kov. *Pis'ma v ZhTF*. 2022. Vol. 48. Iss. 1. P. 19-21. DOI: 10.21883/PJTF.2022.01.51873.18991
5. Dorofeev B. M., Volkova V. I. Akusticheskij metod issledovanija rosta i shlopyvaniya puzyr'ka para pri kipenii. *Akust. zhurn*. 2003. Vol. 49. No. 6. P. 794-798.



Information about the authors

LEBEDEV Mihail Sergeevich, Ph.D., junior researcher
Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the
Russian Academy of Sciences

Work address: 690041, Vladivostok, st. Radio, 7

Research Interests: hydroacoustics, correlation and spectral analysis

E-mail: lebedevms@poi.dvo.ru

Phone: +7(423) 231-14-00

ORCID: 0000-0002-6859-2001

TAGIL'CEV Aleksandr Anatol'evich, candidate of technical sciences, associate professor, senior researcher
Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the
Russian Academy of Sciences

Work address: 690041, Vladivostok, st. Radio, 7

Research Interests: hydroacoustic antennas and transducers, acoustic measurements

E-mail: atagiltcev@poi.dvo.ru

Phone: +7(423) 231-14-00

ORCID: 0000-0001-9207-4418

KULIK Aleksandr Valer'evich, research engineer
Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the
Russian Academy of Sciences

Work address: 690041, Vladivostok, st. Radio, 7

Research Interests: energy, cavitation, optics

E-mail: kulik_av@dvfu.ru

Phone: +7 (423) 231-18-50

ORCID: 0009-0000-5027-5713

CHUDNOVSKIJ Vladimir Mihajlovich, Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher
Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the
Russian Academy of Sciences

Work address: 690041, Vladivostok, st. Radio, 7

Research Interests: laser biophysics, cavitation, hydrodynamics

E-mail: vm53@mail.ru

Phone: +7 (924) 434-79-80

ORCID: 0000-0003-2000-4810