

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 53.07

**ИСТОЧНИК ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ИНДУКЦИОННО-СВЯЗАННОГО ВЧ-РАЗРЯДА В
ВОДОРОДЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПЫЛЕВЫХ
ОБЛАКОВ ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ**

©2025 г. А. В. Водопьянов^{а,*}, Е. И. Преображенский^а, М. Е. Викторov^а

^аИнститут прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова

Российской академии наук

Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

**e-mail: avod@ipfran.ru*

Поступила в редакцию 02.07.2025 г.

После доработки 19.08.2025 г.

Принята к публикации 15.09.2025 г.

Описывается источник вакуумного ультрафиолетового излучения для фотоионизации пылевых частиц в лабораторных модельных экспериментах по исследованию динамики пылевых облаков вблизи поверхности Луны. Источником вакуумного ультрафиолетового излучения является индукционно-связанный ВЧ-разряд в водороде. Показано, что излучение в линии L_{α} (длина волны 121.6 нм, энергия кванта 10.2 эВ) составляет до 150 мВт при мощности, вкладываемой в разряд, на уровне 50 Вт. Плотность мощности излучения на расстоянии 10 см от источника составляет $4 \cdot 10^{-5}$ Вт/см², что превышает плотность мощности излучения Солнца на поверхности Луны в этом диапазоне длин волн. Таким образом, открываются перспективы для использования предложенного источника излучения в лабораторном моделировании динамики пылевых облаков.

1. ВВЕДЕНИЕ

Один из существенных факторов, определяющих динамику пылевых облаков в приповерхностных областях луны, – это фотоионизация пылевых частиц солнечным излучением [1–3]. Поэтому для лабораторного моделирования динамики пылевых частиц и пылевых облаков необходим источник вакуумного ультрафиолетового излучения с требуемыми интенсивностью и спектральной характеристикой. Красная граница фотоэффекта для пылевых частиц реголита составляет 200 нм [4], поэтому спектр излучения источника должен заходить в область вакуумного ультрафиолетового излучения. Эффективность

фотоионизации будет зависеть от интенсивности свечения именно в диапазоне длин волн менее 150 нм, где эффективность фотоионизации близка к максимальной [4]. Уровень интенсивности фотоионизирующего излучения, необходимый для проведения экспериментов по динамике пылевых частиц, должен быть сопоставим с уровнем интенсивности солнечного излучения в этом диапазоне вблизи орбиты Земли за пределами атмосферы. Эта величина составляет приблизительно 0.08 Вт/(м²·нм), она может значительно (в разы) варьироваться из-за непостоянства активности Солнца [5–7]. Концепция проводимого лабораторного моделирования [8] предусматривает расположение источника вакуумного ультрафиолетового излучения в том же вакуумном объеме, что и пылевое облако, поэтому наиболее подходящим источником представляется индукционно-связанный ВЧ-разряд в водороде.

В настоящей работе описываются эксперименты по исследованию параметров излучения такого разряда. Линии излучения атомарного водорода, лежащие в видимом диапазоне и в диапазоне вакуумного ультрафиолетового излучения, — это серии Бальмера и Лаймана (см. табл. 1). Интенсивность излучения молекулярного водорода значительно меньше излучения атомарного [9] и не будет учитываться.

Таблица 1. Длины волн линий излучения водорода в вакуумном ультрафиолетовом и оптическом диапазонах

n_2	Серия Лаймана ($n_1=1$)		Серия Бальмера ($n_1=2$)	
	Линия	λ , нм	Линия	λ , нм
2	L_α	121.567	—	—
3	L_β	102.572	H_α	656.466
4	L_γ	97.254	H_β	486.269
5	L_δ	94.974	H_γ	434.169
6	L_ϵ	93.780	H_δ	410.290
∞	L_∞	91.127	H_∞	364.56

Наибольший интерес с точки зрения фотоионизации представляет излучение серии Лаймана, энергии фотонов для линий L_α , L_β и L_γ составляют 10.2, 12.1 и 12.7 эВ, они являются достаточными для проявления фотоэффекта у большинства материалов. Энергии квантов излучения линий H_α , H_β и H_γ составляют 1.9, 2.5 и 2.8 эВ, и эти кванты не могут давать вклада в фотоионизацию пылевых частиц.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальный стенд сконструирован на основе четырехпроходного креста со стандартными вакуумными портами CF 160. На верхнем фланце креста располагается кварцевая трубка с внешним диаметром 50 мм и толщиной стенок 3 мм, герметично состыкованная со специальным водоохлаждаемым фланцем стандарта CF 160 (см. рис. 1). Для создания плазмы индукционного разряда внутри кварцевой колбы был использован генератор Cesar RF Power, работающий с частотой 13.56 МГц (1 на рис. 1). Максимальная выходная мощность 600 Вт. Пятивитковый индуктор располагался в средней части кварцевой трубки. Верхняя часть кварцевой трубки герметично состыкована с узлом ввода газа 2. Для регулировки потока газа в диапазоне от 4 до 100 ст.см³/мин использовался электронный регулятор массового расхода газа Bronkhorst. Откачка газа проводилась с помощью спирального безмасленного форвакуумного насоса 3 с максимальной производительностью 35 м³/ч. В ходе экспериментов давление в газоразрядной камере изменялось с помощью регулировки потока газа в диапазоне от 10⁻² до 10 мбар. Давление измерялось емкостным манометрическим преобразователем Setra 4 с номиналом 10 мбар. В экспериментах в качестве плазмообразующего газа использовался водород.

Рис. 1. Схема и фотография экспериментальной установки...

Для измерения характеристик вакуумного ультрафиолетового излучения водородной плазмы использовался абсолютно калиброванный фотоэлектронный умножитель ФЭУ-142 с полупрозрачным теллур-цезиевым катодом, электростатической фокусировкой электронов и LiF-входным окном (5 на рис. 1). Спектральный диапазон длин волн регистрируемого излучения составляет от 112 нм до 400 нм. Коротковолновая граница чувствительности прибора определяется входным LiF-окном, длинноволновая граница обусловлена характеристиками фотокатода.

Зависимость спектральной чувствительности от длины волны приведена по данным паспорта прибора на рис. 2. Чувствительность составляет 10000 А/Вт при напряжении питания ФЭУ 2140 В.

Рис. 2. Спектральная чувствительность ФЭУ-142. Штриховкой показана величина ошибки

ФЭУ устанавливался в нижней части камеры на расстоянии $D = 60$ см от центра плазмы. Для дополнительного уменьшения сигнала ФЭУ был обернут в черную бумагу с отверстием площадью $S_{\text{det}} = 0.071$ см². Соответственно, на фотокатод попадает доля общего излучения плазмы $S_{\text{det}} / 4\pi D^2 = 1/640000$. Зависимость чувствительности ФЭУ от приложенного напряжения приведена на рис. 3. Эта зависимость была измерена в стандартных условиях

горения разряда, скорость подачи газа 30 ст. см³/мин, давление в камере составляло 0.33 мбар, мощность ВЧ-излучения 220 Вт.

Рис. 3. Чувствительность ФЭУ в зависимости от напряжения на катоде

Дальнейшие измерения проводились с нагрузкой 1000 Ом при напряжении на ФЭУ 1.5 кВ. Таким образом, итоговый коэффициент пересчета напряжения выходного сигнала ФЭУ в мощность излучения плазмы 4π ст. рад во всем диапазоне чувствительности приемника составляет 0.42 Вт/В.

Для разделения излучения в видимом диапазоне и излучения в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне устанавливалась кварцевая пластина (6 на рис. 1) толщиной 4 мм, коротковолновая граница пропускания которой составляет 180 нм. Таким образом, проводя измерения интенсивности излучения с кварцевой пластиной и без нее, можно вычислить мощность излучения в диапазоне длин волн 112–180 нм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерения проводились в широком диапазоне параметров по давлению газа и мощности ВЧ-нагрева плазмы. Ниже на рис. 4 приведены зависимости сигнала ФЭУ от мощности, вкладываемой в плазму, для трех давлений. Все приведенные значения соответствуют ситуации, когда плазма представляет собой яркую светящуюся область внутри индуктора, свечение в остальных областях вакуумной камеры значительно менее интенсивное. Под вкладываемой в плазму мощностью подразумевается разность между поданной на индуктор мощностью и отраженной обратно. Подстройкой колебательного контура в узле согласования удавалось добиться того, чтобы отраженная мощность не превышала 20% от падающей.

Рис. 4. Измеренные зависимости сигнала с выхода ФЭУ от мощности, подводимой в плазму, для разных давлений, без кварцевой пластины

Давление регулировалось путем изменения скорости подачи газа при неизменной скорости откачки. Измерения проводились при скоростях подачи водорода 20, 30 и 40 ст. см³/мин. На рис. 5 приведены зависимости сигнала ФЭУ от мощности при давлении 0.11 мбар с установленной кварцевой пластиной и без нее. На графике видно, что различие существенно во всем диапазоне мощностей. Разность сигналов между двумя графиками соответствует излучению в диапазоне от 112 нм до 180 нм. На рис. 6, 7 приведены такие же зависимости для давлений 0.24 и 0.38 мбар соответственно.

Рис. 5. Зависимость сигнала ФЭУ от мощности, подводимой в плазму, при давлении 0.11 мбар с кварцевой пластиной (красные квадраты) и без нее (синие ромбы)

Рис. 6. Зависимость сигнала ФЭУ от мощности, подводимой в плазму, при давлении 0.24 мбар с кварцевой пластиной (красные квадраты) и без нее (синие ромбы)

Рис. 7. Зависимость сигнала ФЭУ от мощности, подводимой в плазму, при давлении 0.38 мбар с кварцевой пластиной (красные квадраты) и без нее (синие ромбы)

Зная абсолютные значения чувствительности ФЭУ, можно пересчитать полученные данные в мощность излучения в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне. На рис. 8 приведены зависимости абсолютной интенсивности излучения в диапазоне длин волн 112–180 нм от мощности, вкладываемой в плазму, для разных давлений.

Рис. 8. Интенсивность свечения водородной плазмы в диапазоне экстремального ультрафиолетового излучения

Интересным результатом является то, что мощность вакуумного ультрафиолетового излучения водородной плазмы превышает 50 мВт во всем диапазоне параметров, а при определенных условиях она может достигать 150 мВт. Ошибка определения мощности оценивается в 50%, она обусловлена, прежде всего, возможной деградацией фотокатода. По всей видимости, вся мощность сосредоточена в линии L_{α} с длиной волны 121.6 нм, энергия кванта составляет 10.2 эВ. Это единственная линия атомарного водорода, попадающая в диапазон 112–180 нм. Мощность излучения в 50 мВт на расстоянии 10 см от разряда будет составлять $4 \cdot 10^{-5}$ Вт/см², что превышает интенсивность излучения Солнца на поверхности Луны в этом диапазоне длин волн. Описанные измерения проводились при давлении в камере 0.11–0.38 мбар, в этом диапазоне давлений вакуумное ультрафиолетовое излучение уже может распространяться на значительные расстояния. По оценкам длина резонансного поглощения излучения линии L_{α} составляет порядка 1 м, поэтому поглощением излучения на пути распространения до детектора можно пренебречь. Вместе с тем, такое давление является достаточно низким для исследования динамики пылевых частиц вследствие фотоионизации.

Для дополнительного подтверждения корректной работы схемы измерений проводились измерения интенсивности свечения аргоновой плазмы. При схожих по давлению условиях плазма аргона излучает в 10 и более раз менее интенсивно по сравнению с плазмой водорода, что объясняется отсутствием линий излучения атомарного аргона в исследуемом диапазоне.

Для измерения спектрального состава излучения в оптическом диапазоне использовался спектрометр SOL 150DUO. Спектры снимались в тех же режимах горения плазмы, для которых измерялась интенсивность свечения в вакуумном ультрафиолете. Типичный спектр (режим поддержания плазмы: давление 0.38 мбар, мощность 300 Вт)

приведен на рис. 9. Спектр состоит из линий H_α , H_β и H_γ излучения серии Бальмера.

Рис. 9. Спектр излучения водородной плазмы в полулогарифмическом масштабе, давление 0.38 мбар, мощность 300 Вт

По соотношению интенсивностей линий серии Бальмера были оценены значения температуры электронов плазмы в различных режимах разряда [10, 11]. На рис. 10 приведены зависимости температуры электронов от мощности при различных давлениях.

Рис. 10. Температура электронов в зависимости от мощности нагрева плазмы для различных давлений

Температура электронов составляет от 0.7 до 1 эВ во всем диапазоне исследованных параметров. Ошибка определения температуры составляет 15%. Такие значения температуры характерны для водородных ВЧ-разрядов низкого давления. Температура уменьшается с увеличением давления при оптимальной мощности. Можно также отметить, что максимум светимости в вакуумном ультрафиолетовом излучении достигается при тех параметрах, при которых температура электронов максимальна.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Индукционно-связанная плазма водорода является эффективным источником излучения в диапазоне вакуумного ультрафиолетового излучения. Измерения демонстрируют, что мощность вакуумного ультрафиолетового излучения водородной плазмы превышает 50 мВт во всем диапазоне параметров, а при определенных условиях она может достигать 150 мВт. Вся эта мощность сосредоточена в линии L_α с длиной волны 121.6 нм, энергия кванта 10.2 эВ; на расстоянии 10 см от разряда плотность мощности излучения будет составлять не менее $4 \cdot 10^{-5}$ Вт/см², что превышает интенсивность излучения Солнца на поверхности Луны в этом диапазоне длин волн. Это открывает перспективы для использования описанного источника излучения в лабораторном моделировании динамики пылевых облаков. Температура электронов составляет от 0.7 до 1 эВ во всем диапазоне исследованных параметров, максимум светимости в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне достигается при тех параметрах экспериментов, при которых температура электронов максимальна.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики по направлению “Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов И.А., Захаров А.В., Зеленый Л.М. и др. // *Астрономический журнал*. 2023. Т. 100. №1. С. 41. <https://doi.org/10.31857/s0004629923010115>
2. Zelenyi L.M., Popel S.I., Zakharov A.V. // *Plasma Phys. Rep.* 2020. V. 46. № 5. P. 527. <https://doi.org/10.1134/S1063780X20050104>
3. Wang X., Schwan J., Hsu H.W., Grün E., Horányi M. // *Geophys Res. Lett.* 2016. V. 43. № 12. P. 6103. <https://doi.org/10.1002/2016GL069491>
4. Попель С.И., Захаров А.В., Зеленый Л.М. // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49. № 1. С. 12. <https://doi.org/10.31857/s0367292122600935>
5. Lean J. // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 1987. V. 92. № D1. P. 839. <https://doi.org/10.1029/JD092iD01p00839>
6. Richmond J.L., Machacek J.R., Charles C., Boswell R.W. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2025. V. 279. № 1. P. 11. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/add9a4>.
7. Петров Г.И. Моделирования теплового режима космических аппаратов и окружающей его среды. Москва: Машиностроение, 1971.
8. Зеленый Л.М., Викторов М.Е., Моисеенко С.Г. // *Физмат*. 2024. Т. 2. № 1. С. 3. <https://doi.org/10.56304/S2949609824010087>.
9. Terry J.L. // *J. Vac. Sci. Technol., A*. 1983. V. 1. № 2. P. 831. <https://doi.org/10.1116/1.572005>
10. Преображенский Е.И., Синцов С.В., Водопьянов А.В. // *Письма в ЖТФ*. 2023. Т. 49. №24. С. 25. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2023.24.56866.33A>
11. Harrison J.A., Craggs J.D. // *J. Electron. Control.* 1958. V. 4. № 4. P. 289. <https://doi.org/10.1080/00207215808953849>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема и фотография экспериментальной установки: 1 – ВЧ- генератор, 2 – узел подачи газа, 3 – вакуумный насос, 4 – датчик давления, 5 – ФЭУ, 6 – кварцевая пластина.
- Рис. 2.** Спектральная чувствительность ФЭУ-142. Штриховкой показана величина ошибки.
- Рис. 3.** Чувствительность ФЭУ в зависимости от напряжения на катоде.
- Рис. 4.** Измеренные зависимости сигнала с выхода ФЭУ от мощности, подводимой в плазму для разных давлений, без кварцевой пластины.
- Рис. 5.** Зависимость сигнала ФЭУ от мощности, подводимой в плазму, при давлении 0.11 мбар с кварцевой пластиной (красные квадраты) и без нее (синие ромбы).
- Рис. 6.** Зависимость сигнала ФЭУ от мощности, подводимой в плазму, при давлении 0.24 мбар с кварцевой пластиной (красные квадраты) и без нее (синие ромбы).
- Рис. 7.** Зависимость сигнала ФЭУ от мощности, подводимой в плазму, при давлении 0.38 мбар с кварцевой пластиной (красные квадраты) и без нее (синие ромбы).
- Рис. 8.** Интенсивность свечения водородной плазмы в диапазоне экстремального ультрафиолетового излучения.
- Рис. 9.** Спектр излучения водородной плазмы в полулогарифмическом масштабе при давлении 0.38 мбар и мощности 300 Вт.
- Рис. 10.** Температура электронов в зависимости от мощности нагрева плазмы для различных давлений.

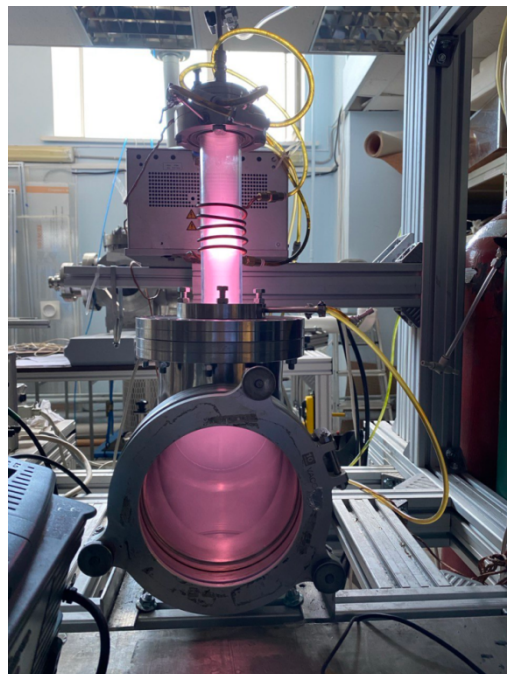
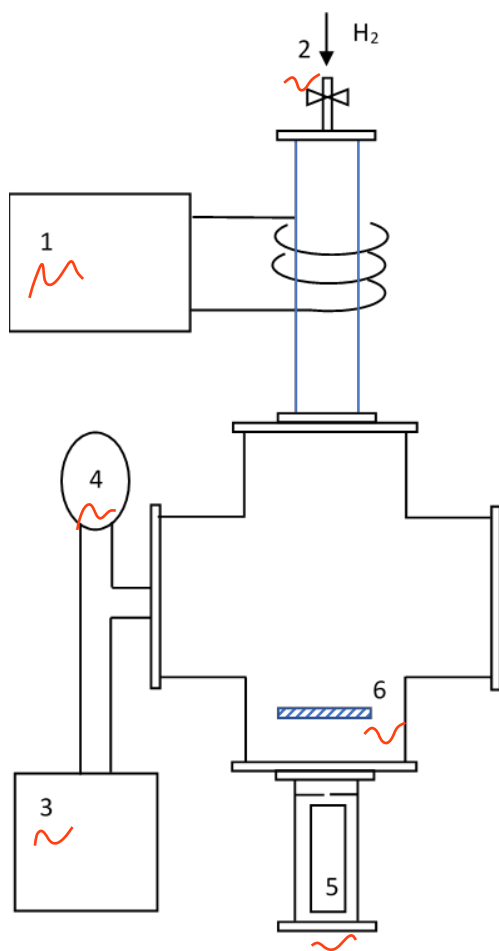


Рис. 1.

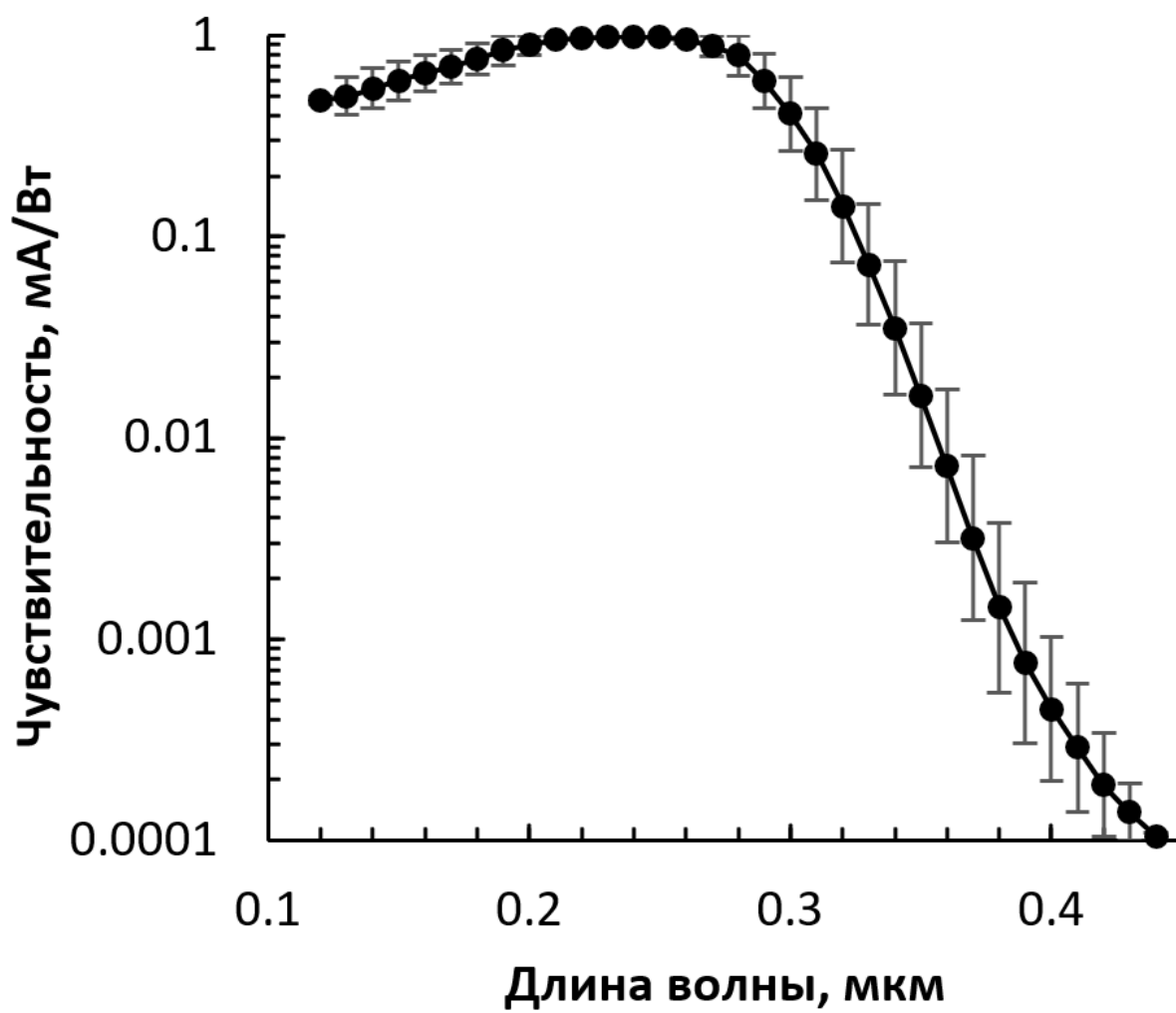


Рис. 2.

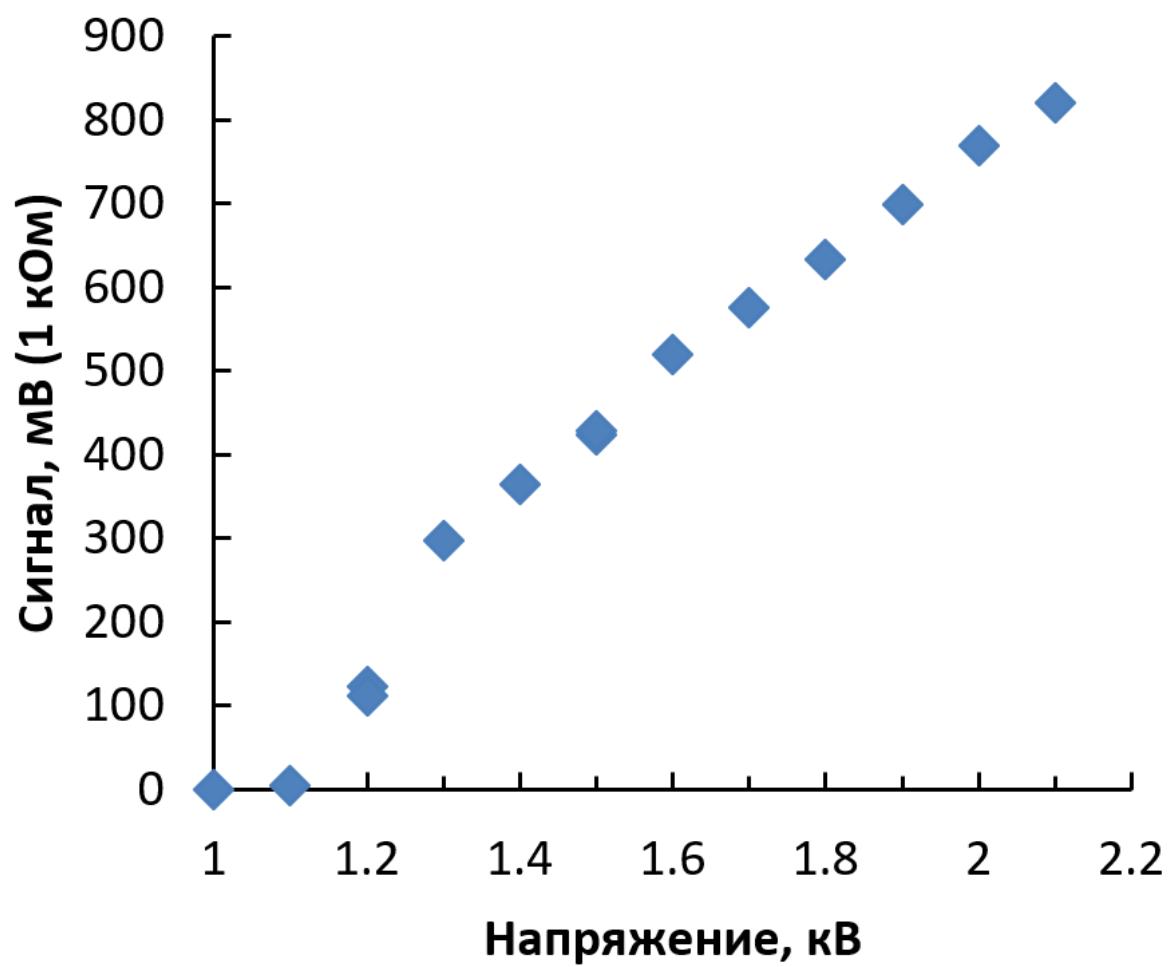


Рис. 3.

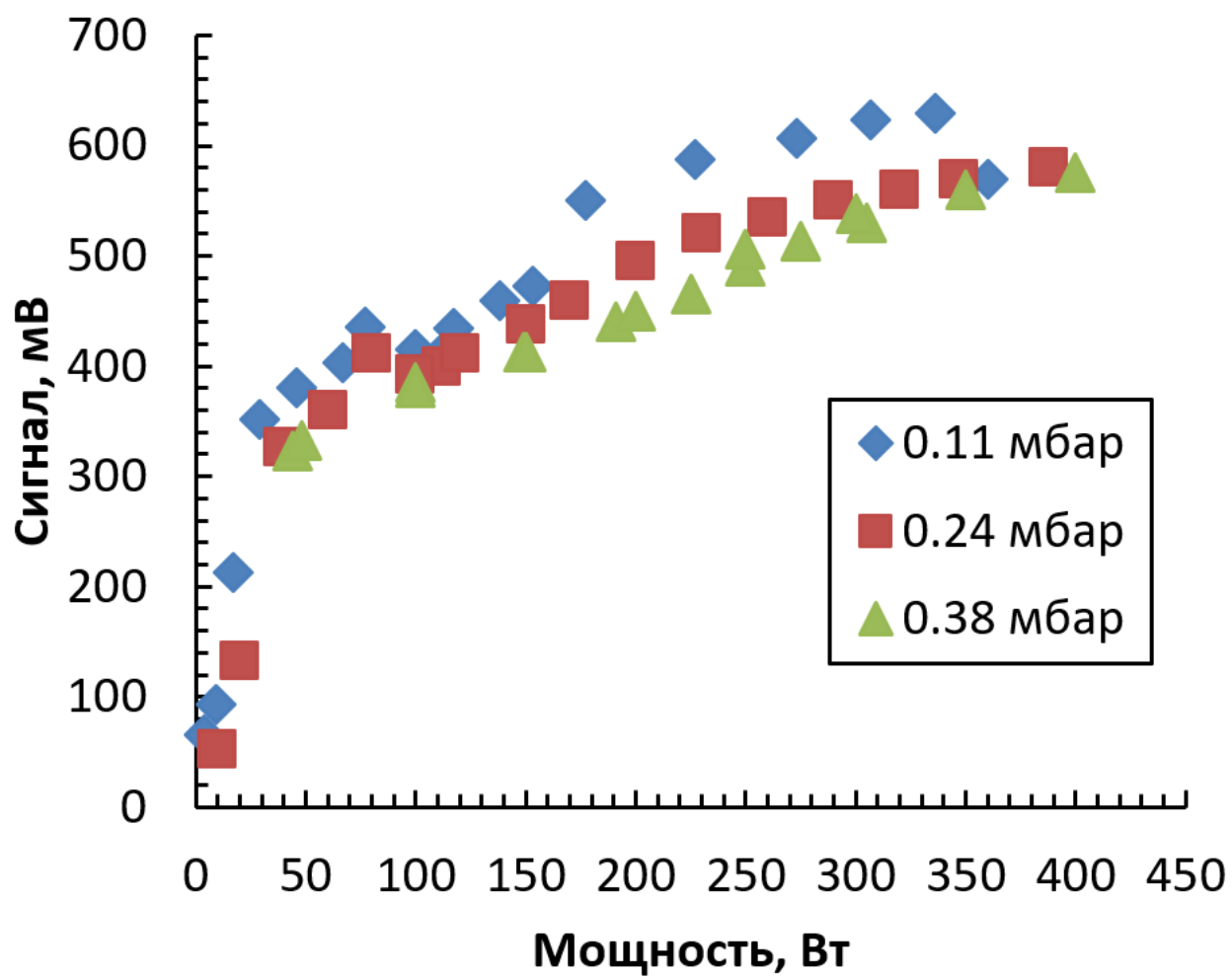


Рис. 4. .

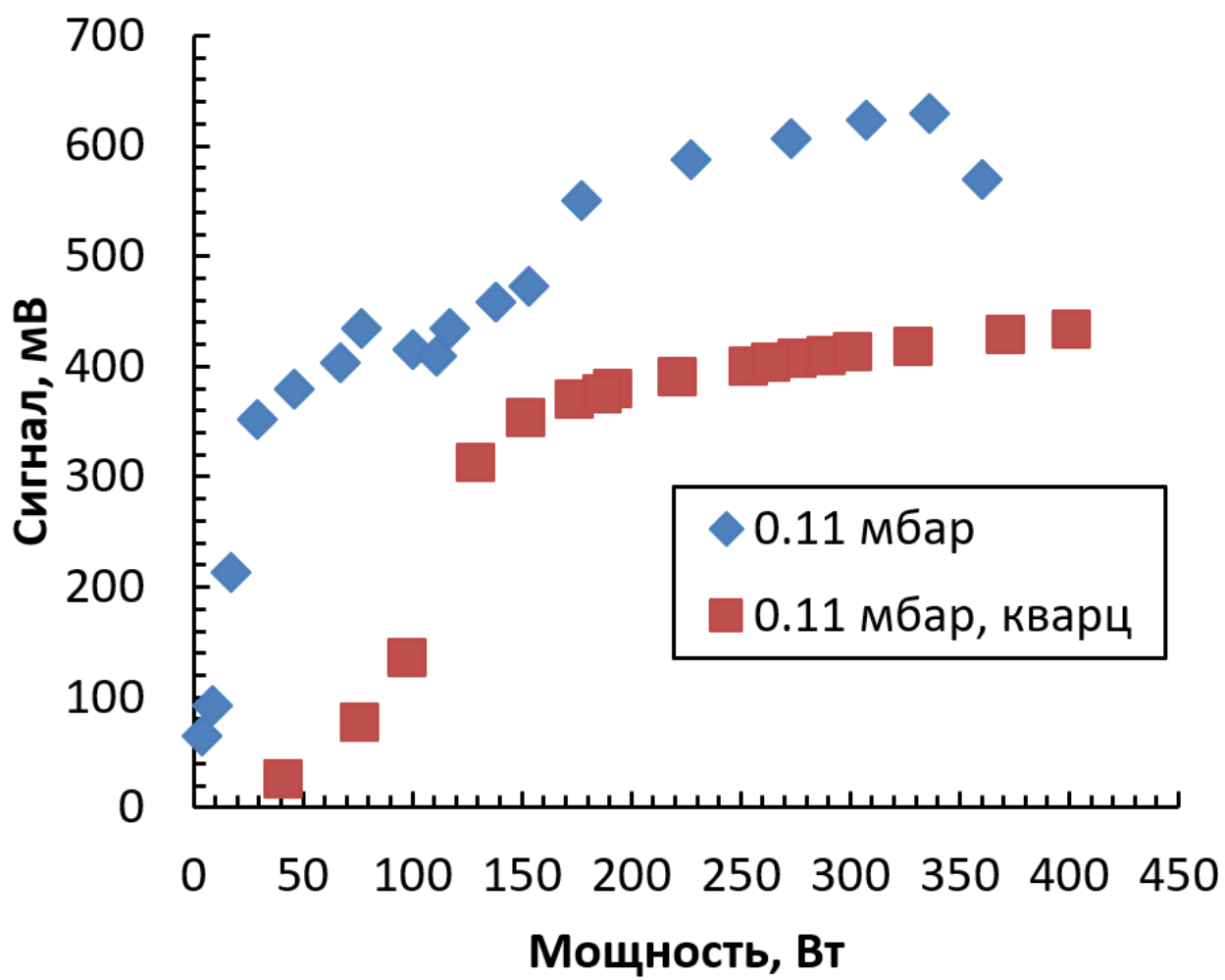


Рис. 5.

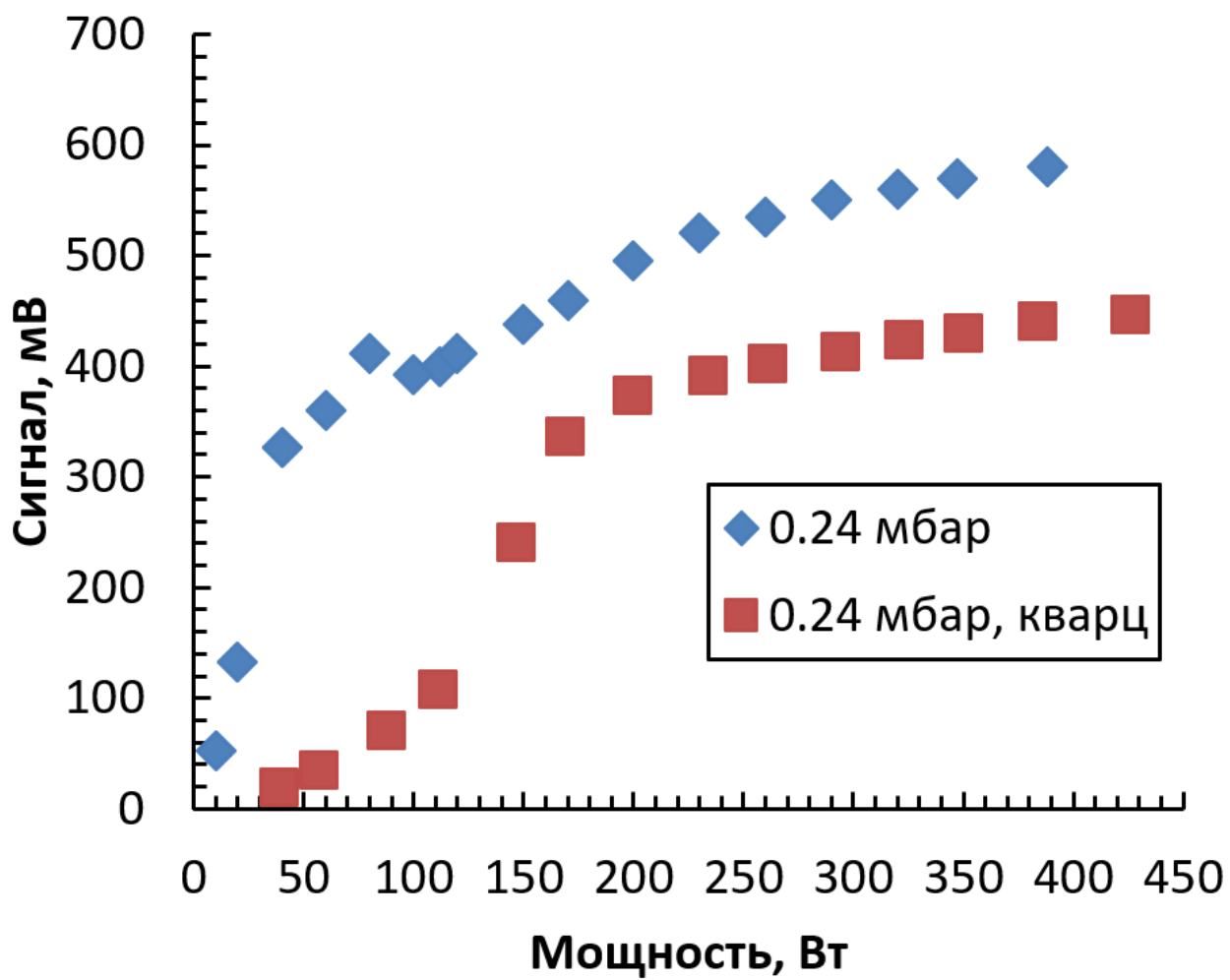


Рис. 6.

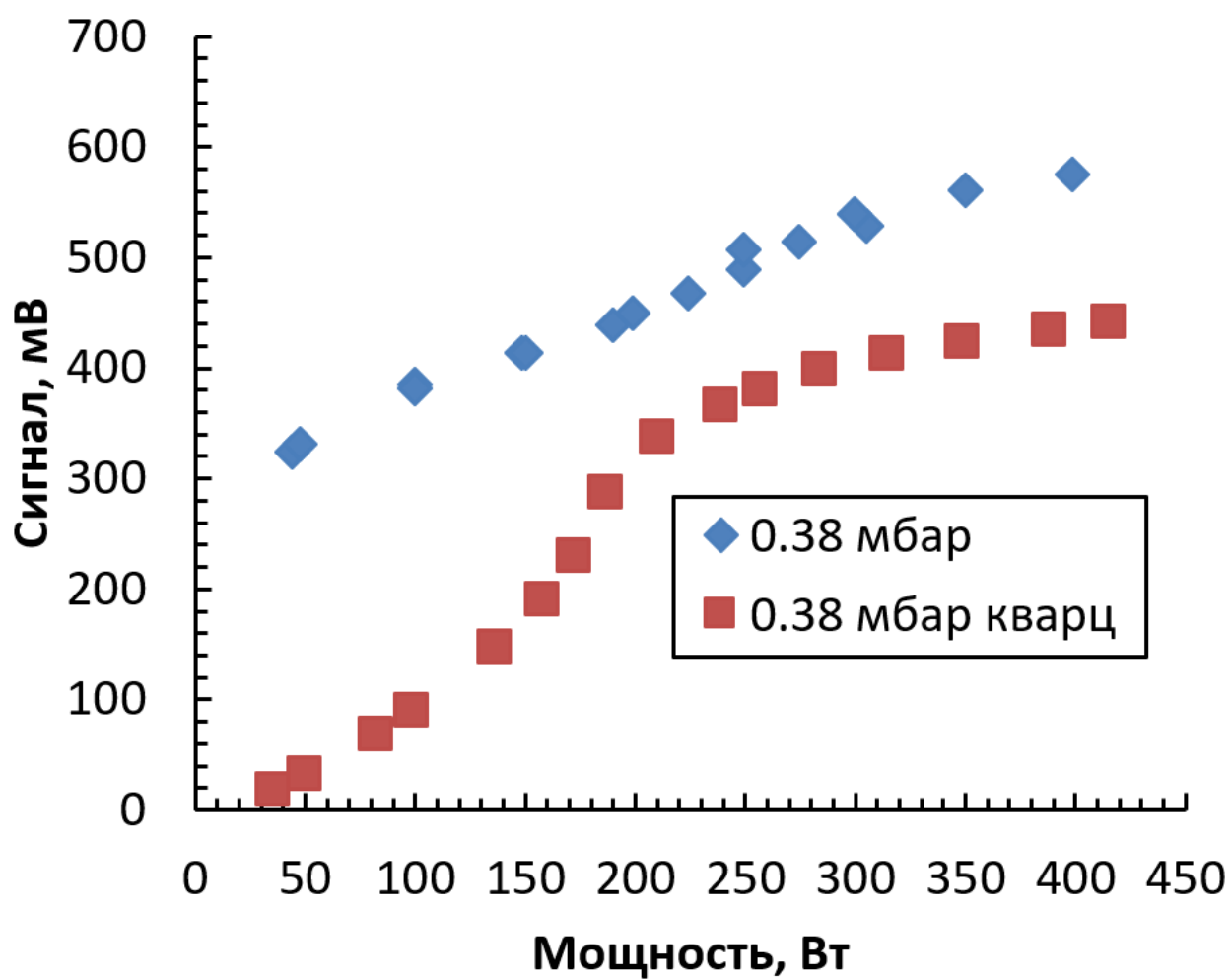


Рис. 7.

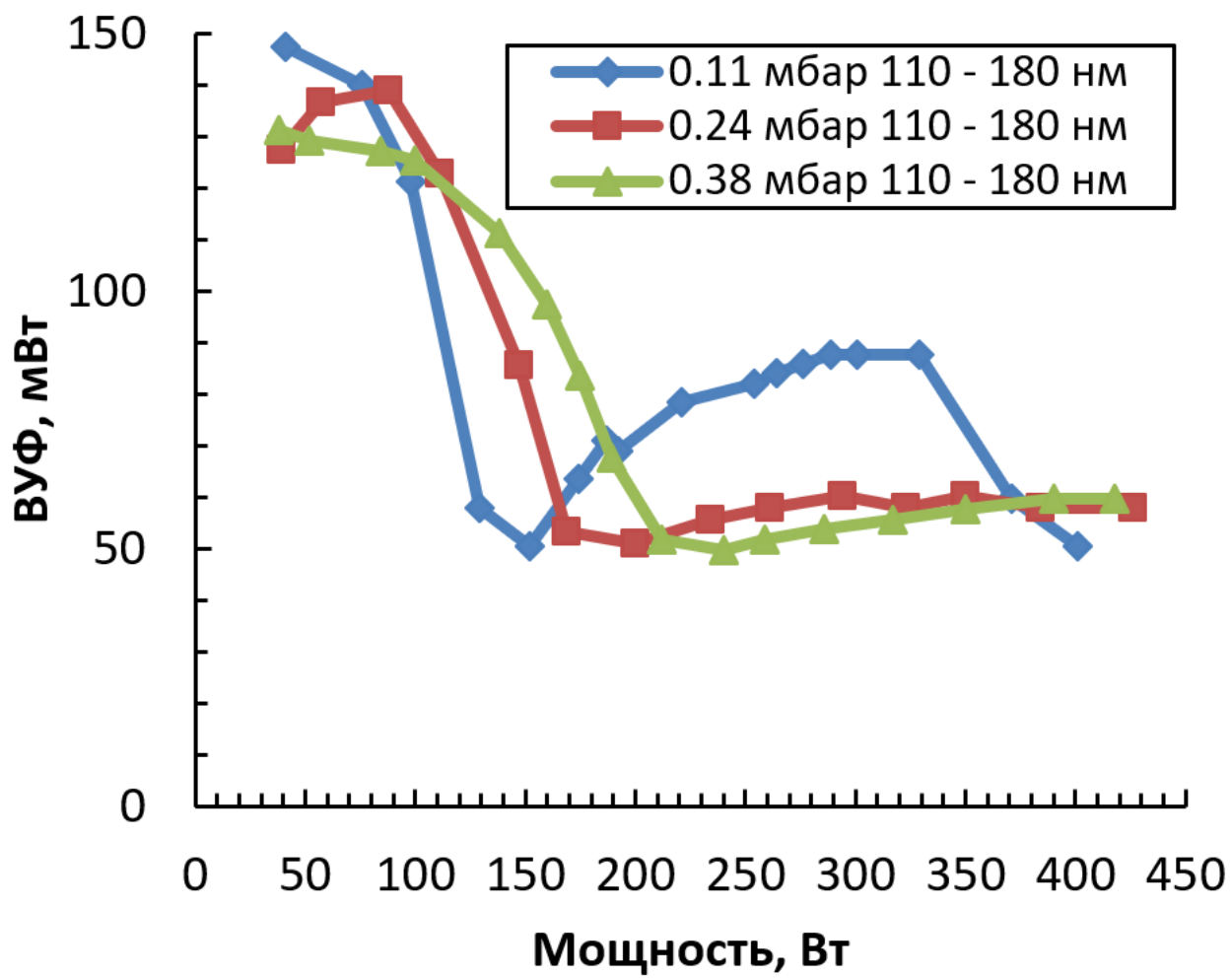


Рис. 8.

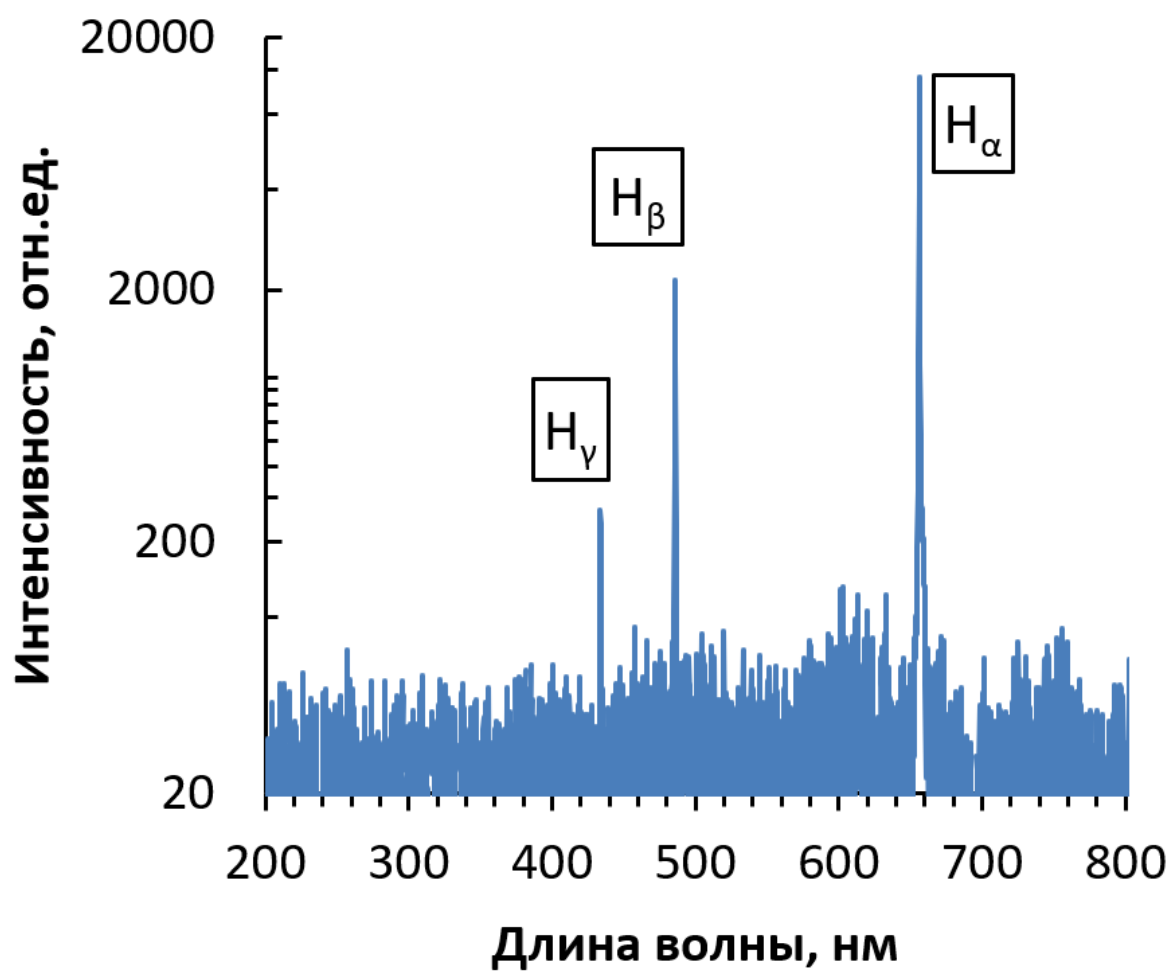


Рис. 9.

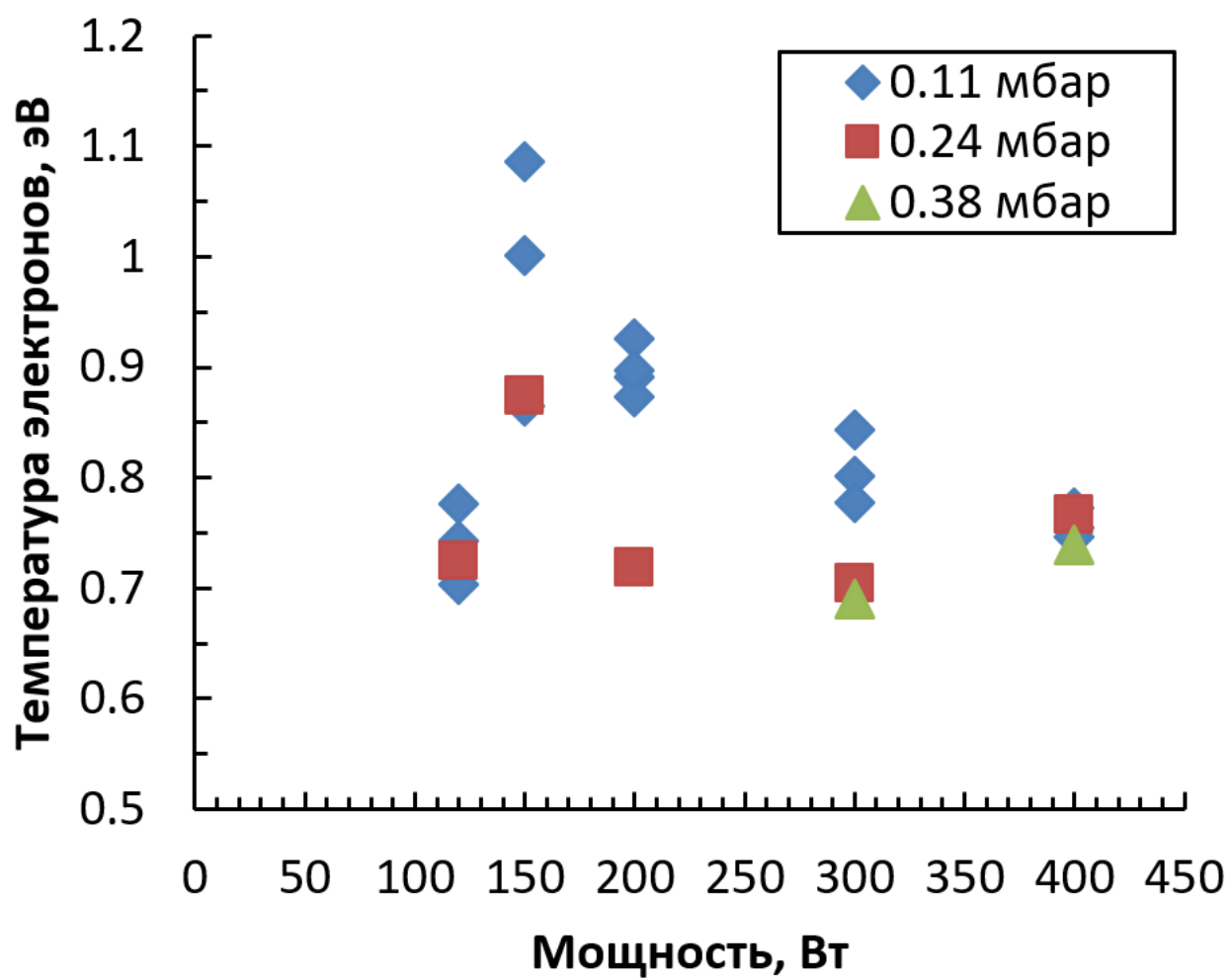


Рис. 10.