

УДК 533.9.082.5.

PACS: 52.25.Dg.

DOI: 10.51368/1996-00948-2023-6-11-18

EDN: UFNUGJ



Воздействие коронного разряда на почву

*В. Л. Бычков, А. П. Шваров, П. А. Горячкин, Д. Е. Сороковых, Д. В. Бычков,
Д. Н. Ваулин, В. А. Черников*

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния плазмы коронного разряда на чернозём, краснозём и торф. Воздействие длительностью от 10 до 60 минут производили коронными разрядами положительной и отрицательной полярности, которые создавались при помощи много игольчатого верхнего электрода при напряжении 10 кВ и токе 100 мкА. Установлено, что продукты плазмохимии атмосферного воздуха в коронных разрядах взаимодействуют с почвенным поглощающим комплексом и изменяют его физико-химическое состояние. Выявлено влияние коронного разряда в изменении их электропроводности. Ионизация и диссоциация молекул воздуха при воздействии коронного разряда приводит к увеличению электропроводности чернозёма, краснозёма и торфа. Показано, что при использовании коронного разряда при обработке почвы увеличивается плотность заряда в двойном электрическом слое почвенной мицеллы, о чем свидетельствует увеличение показателя электропроводности почвенных паст. Разнонаправленность результатов обработки обработанных субстратов минеральной (чернозем, краснозем) и органогенной (торф) природы, выраженной в изменении кислотности, свидетельствует о различии механизмов восприятия электрических разрядов почвенной матрицей.

Ключевые слова: коронный разряд, дисперсные материалы, чернозём, краснозём, почва, обработка.

Введение

Исследование действия газовых разрядов на почву проводились с середины

XIX века [1, 2], в [1–5] были исследованы эффекты воздействия кистевых, стримерных, электродных и барьерных разрядов. Изучались процессы, влияющие на свойства почвы, возможность ее обеззараживания, изменение ее структуры; химические, механические, и транспортные изменения в почве и их влияние на рост растений. Основное внимание обращалось на изменение биологических характеристик растений. В последнее время возник интерес к созданию на Земле мест экстремальной жизнедеятельности [6, 7]. Воздействие плазмы на почву и растения представляет интерес и при создании искусственных почв для выращивания растений, предназначенных для лечения людей от редких заболеваний. В миссиях на Марс и Венеру также необходимо активировать почву для выращивания растений в теплицах [6, 7]. В настоящее

Бычков Владимир Львович, в.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: bychvl@gmail.com

Шваров Александр Петрович, доцент, к.б.н.

Горячкин Павел Алексеевич, аспирант.

Сороковых Дмитрий Евгеньевич, студент.

Бычков Дмитрий Владимирович, студент.

Ваулин Дмитрий Николаевич, н.с., к.ф.-м.н.

Черников Владимир Антонович, доцент, к.ф.-м.н.

Московский государственный университет

им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 26.09.2023

После доработки 12.10.2023

Принята к публикации 19.10.2023

© Бычков В. Л., Шваров А. П., Горячкин П. А.,

Сороковых Д. Е., Бычков Д. В., Ваулин Д. Н.,

Черников В. А., 2023

время аспекты воздействия на почву плазмы разрядов, создаваемых в атмосфере над поверхностью Земли, остаются малоизученными. Так непонятна природа появления глубоких отверстий в почве в период грозовой активности [8]. Исследования плазмы коронного разряда [8, 9] в воздухе показывают, что эта плазма содержит большое количество положительных и отрицательных ионов, а также нейтральных частиц, которые отсутствовали в воздухе до воздействия плазмы. Расчеты [10, 11] кинетики сухого воздуха под действием разряда показывают, что в нем появляются положительные ионы с концентрациями NO^+ и O_2^+ до $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, отрицательные ионы O^- , O_2^- , O_3^- с концентрациями до $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и основные нейтральные частицы $\text{NO} \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\text{O} \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\text{O}_3 \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Во влажном воздухе при концентрации молекул воды H_2O 0,5–3,9 % (об.) под действием разряда появляются основные положительные ионы и отрицательные ионы $\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_2 \sim \text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_4$ с концентрацией до $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и нейтральные компоненты $\text{O} \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\text{NO} \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\text{O}_3 \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [12], которые могут влиять на протекание процессов в почвенном покрове. Кроме того, появляется большое количество колебательно и электронно-возбужденных молекул азота и кислорода, которые также могут влиять на процессы, происходящие в почвенном покрове. Всё это показывает перспективность использования газовых разрядов над поверхностью почвы не только для стерилизации или улучшения ее качества за счет добавки O_3 , но также за счет появления NO , O и других активных частиц, влияющих на физику и химию процессов в почве [13, 14].

Данная работа является продолжением исследований работы [15], в которой исследовалось воздействие коронного разряда на чернозем, глину и песок при малых временах воздействия плазмы (порядка 1 минуты).

В отличие от [15] в данной работе мы значительно увеличили время воздействия и добавили новые объекты воздействия. При больших длительностях обработки отрицательная корона оказывает более сильное воздействие, чем положительная. Учитывая, что коронные разряды наиболее просты в реализации и маломощны, их можно рассматривать, как перспективные устройства в местах экстремальной жизнедеятельности.

Экспериментальная методика

Схема экспериментального устройства и его фотографии представлены на рисунке 1. Напряжение изменялось в пределах 5–25 кВ, ток изменялся в пределах 20–200 мкА, ток измерялся с помощью миллиамперметра А, напряжение измерялось с помощью внутреннего вольтметра источника В. Верхний электрод состоит из набора игл (до 30 штук) диаметром 2 мм с радиусом наконечника 0,4 мм. Образцы почвы помещались в кюветы из металла или диэлектрика. Расстояние от поверхности образца почвы до кончиков игл составляло 5–15 мм. Металлические кюветы были цилиндрическими диаметром 130 мм, высотой 18 мм, пластиковые кюветы были цилиндрическими высотой 7 мм и диаметром 100 мм. Сама кювета выполняла роль электрода. Коронный разряд в воздухе возникает при комнатной температуре и атмосферном давлении, когда расстояние между электродами находится на расстоянии нескольких сантиметров [15, 16]. Обработку проводили в течение 10–60 минут при этом дисперсный материал в кювете перемешивали для гомогенизации образца (рис. 1). Определение pH, содержания NO_3 и NH_4 производилось потенциометрическим методом с использованием ионоселективных электродов и анализатором жидкости «Эксперт 001» [17].

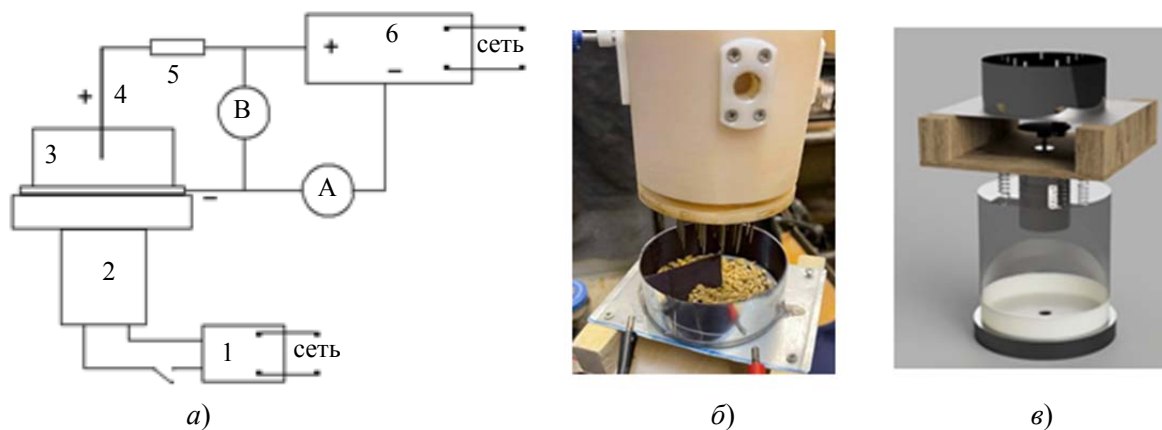


Рис. 1. Блок схема установки – а), б) – общий вид установки, в) – вид мешалки дисперсного материала. 1 – источник питания электромотора, 2 – электрический моторчик, создающий вибрации, 3 – кювета, 4 – много игольчатый электрод, 5 – балластное сопротивление, 6 – источник высоковольтного напряжения

Используемые образцы

Чернозём. Типичный маломощный (Липецкая область, Данковский район. Классификация 2004 года: игратионно-мицелярный карбонатсодержащий среднекарбонатный на покровных суглинках [14]).

Краснозём. Образец (окрестности г. Чакви, республика Грузия, территория НИИ чая и субтропических культур).

Торф низинный, Муром.

В таблице 1 приводятся некоторые характеристики чернозема и краснозема.

Таблица 1

Свойства чернозема и краснозема

Объект	Содержание частиц <0,01 мм	Содержание гумуса по Тюрину, %	Полная удельная поверхность, м ² /грамм	Ёмкость катионного обмена, мг-экв/100 г	Плотность поверхностного заряда почвы, мг-экв/м ² ·10 ⁻³
Чернозём, слой 10–20 см	70,0	9,1	128	48,64	3,8
Краснозём, слой 5–15 см	71,0	5,12	146	17,52	1,2

Ёмкость катионного обмена – 101,2 мг-экв/100 г.

Основным параметром воздействия газоразрядной плазмы на природные объекты является их электропроводимость. Электрические параметры почв зависят от плотности подвижных электрических зарядов, которые включают катионы почвенного поглощающего комплекса (ЕКО) и ионы почвенного раствора. На величину электропроводимости естественных минеральных объектов оказывают некоторые параметры, приведенные в таблице 1. В органогенных объектах в наибольшей степени за величину электропроводимости можно отнести степень разложения

и связанную с ней степень гумификации растительных остатков. Это определяет высокую емкость катионного обмена (ЕКО). В эксперименте использованы образцы торфа с величиной ЕКО равной 101,2 мг-экв/100 г.

Результаты экспериментов

Чернозём. В таблице 2 приведены данные по образцам чернозёма в воздушно-сухом состоянии (влажность 1,5 %) после обработки положительной (ПК) и отрицательной коронной (ОК). Воздействие плазмы увеличило

электропроводность образцов от 8 до 31 %. Воздействие отрицательной короны оказалось более сильным, нежели положительной короны, поскольку поток отрицательных ионов коронного разряда в этом эксперименте лучше фиксировался твердой фазой минерального компонента, чем в случае потока положительных ионов. Следует отметить снижение вели-

чины рН (увеличение кислотности) водной суспензии образцов с дистиллированной водой в соотношении 1:2,5. Есть большая вероятность образования в газовой фазе при коронном разряде ионных структур азота (NO_3^-) и их фиксация образцами чернозёма. За счет иона NO_3^- происходит слабое подкисление образца.

Таблица 2

Результаты обработки. Чернозем (почва воздушно сухая)

Вариант опыта (время воздействия, минут)	ЕС пасты, МкСм/см	Δ ЕС пасты по сравнению с контролем, МкСм/см	рН водной 1:2,5
ПК			
60	1035	155	6,66
40	976	96	6,71
20	970	90	6,72
10	950	70	6,73
ОК			
60	1153	273	6,54
40	1075	195	6,64
20	1055	175	6,66
10	1020	140	6,66
Контроль, без обработки	880		6,92

ЕС – удельная электропроводность.

Эксперименты с влажной почвой. Поскольку в природной обстановке почва имеет разную степень увлажнения несомненный интерес представляет влияние фактора влажности на действие коронного разряда. Образцы чернозёма в воздушно-сухом состоянии (влажность 1,5 %) были увлажнены капиллярно до влажности 8 % и до влажности 15 %. Увлажнение образцов чернозёма привело к снижению эффекта обработки короной (таблица 3), причем более высокая влажность образцов привела к подавлению эффекта обработки электропроводности почвенных паст, как и кислотности водной суспензии (1:2,5). Этот эффект можно связать с тем, что в случае влажной почвы появляется много комплексных ионов типа $\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_2$, чья подвижность значительно ниже, чем у простых ионов. Поскольку электропроводность образцов зависит обратно пропорционально от подвижности ионов, то с повышением влажности будет рас-

ти молекулярный вес ионов, снижаться их подвижность, а, следовательно, проводимость образцов.

Краснозём. Результаты обработки краснозёма плазмой отрицательной короны приведены в таблице 4. Следует отметить в этом случае низкую электропроводность паст (предел пластичности) 340–380 МкСм/см. С другой стороны, высокая проводимость водной суспензии в соотношении твердая фаза – вода 1:2,5 (суспензия отфильтрована через бумажный фильтр) приводит к обратному эффекту. Превышение электропроводности вытяжки обработанных образцов по сравнению с контролем немного превосходят аналогичные превышения проводимости почвенных паст. Можно предположить, что продукты воздействия плазмы на воздух в данном опыте в меньшей степени фиксировались твердой фазой почвы. При этом значительная часть этих продуктов перешла в жидкую фазу.

Таблица 3

Результаты обработки. Чернозём. Почва увлажнена

Вариант опыта (время воздействия, минут)	ЕС пасты, МкСм/см	рН водной, 1:2,5	ЕС водной, 1:2,5
ОК, влажность 8 %			
60	1024	6,70	435
40	960	6,82	420
20	936	6,90	386
ОК, влажность 15 %			
60	970	6,85	315
40	950	6,87	282
20	925	6,88	272
Контроль, без обработки	880	6,92	314

Таблица 4

Результаты обработки краснозёма плазмой отрицательной короны

Вариант опыта (время воздействия, минут)	ЕС пасты, МкрСм/см	ЕС вытяжки 1:2,5, МкрСм/см	рН вытяжки 1:2,5
Контроль, без обработки	340	243	4,53
20	357	283	4,42
40	365	308	4,35
60	380	311	4,00

В вытяжке использована дистиллированная вода с рН = 7,03 и ЕС = 11 МкрСм/см.

Отметим, следующее: минералогии краснозёма преобладает высокодисперсный глинистый минерал – каолинит, кристаллическая решетка которого имеет жесткую структуру, не имеющую межпакетных пространств. Поэтому в удельной поверхности краснозёма доминирует внешняя поверхность (более 90 % от полной поверхности). Внешняя поверхность минерала не способна фиксировать заряженные ионы, именно поэтому электропроводность почвенной пасты невелика, а проводимость вытяжки наоборот значительна.

При обработке наблюдался сдвиг величин рН в более кислую область. Несмотря на тот факт, что необработанный образец краснозёма имеет довольно кислую реакцию

(рН = 4,53), обработка его разрядом дополнительно сдвигает реакцию среды в более кислую область. По величине кислотности краснозём превосходит даже относительно кислые дёрново-подзолистые почвы.

Торф. Обработка органогенного материала (торфа) коронным разрядом также показала тенденцию роста электропроводности по сравнению с контролем (необработанный образец), выявленную при обработке образцов минеральной природы (чернозём, краснозём). При этом также зафиксировано более сильное воздействие отрицательной короны в отношении электропроводности по сравнению с воздействием положительной короны (таблица 5).

Таблица 5

Результаты обработки торфа коронным разрядом

Вариант опыта (время воздействия, минут)	ЕС пасты, МкСм/см	ЕС вытяжки 1:2,5 МкСм/см	рН вытяжки 1:2,5
Контроль, без обработки	2160	230	6,80
ПК			
60	2280	–	6,90
40	2200 (?)	–	6,82
20	2245	–	6,87
10	2230	–	6,82
ОК			
60	2305	758	6,93
40	2234	595	2,85
20	2285	635	6,83
10	2240	617	6,83

При анализе состава водной суспензии из образцов торфа были выявлены следующие тенденции.

1. Электропроводность суспензий из обработанных образцов более чем в два раза превосходила аналогичный показатель суспензии контроля. Это означает, что в водорастворимое состояние перешли продукты плазмохимии атмосферного воздуха (ионного состава).

2. Зафиксировано легкое подщелачивание водной суспензии из обработанных образцов торфа по сравнению с контролем (таблица 5), что отличается от состояния суспензий из обработанных образцов минеральных субстратов (чернозем, краснозем).

Оценка электропроводности водной суспензии (соотношение почва: вода 1:2,5) у обработанных образцов по сравнению с контролем может дать ориентировочный вклад продуктов плазмохимии в изменение электропроводности объектов.

Заключение

Установлено, что продукты плазмохимии атмосферного воздуха при коронных разрядах легко взаимодействуют с почвенным поглощающим комплексом, изменяя его физико-химическое состояние.

Показано, что обработка почвы коронным разрядом увеличивает плотность заряда в двойном электрическом слое почвенной ми-

целы, о чем свидетельствует увеличение показателя электропроводности почвенных паст.

Разнонаправленность результатов обработки субстратов минеральной природы (чернозем, краснозем) и органогенной (торф), выраженной в изменении кислотности, свидетельствует о различии механизмов восприятия электрических разрядов почвенной матрицей.

Ионизация и диссоциация молекул воздуха при воздействии коронного разряда приводит к увеличению электропроводности чернозёма, краснозёма и торфа. Это наиболее ярко проявляется в случае обработки отрицательной короной в течение 10–60 минут, что значительно больше времени обработки 1 минута в [15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордеев А. М., Шешнев В. Б. Электричество в жизни растений. – М.: Наука, 1991.
2. Поздняков А. И. Электрические методы исследования почвы. – М.: Изд-во МГУ. Факультет почвоведения, 2009.
3. Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P., Panov V. A. et.al. / J. Phys. D. 2015. Vol. 48. P. 285201.
4. Mitsugi F., Ebihara K., Horibe N., Aoyagi S.-I., Nagahama K. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2017. Vol. 45. P. 3082.
5. Toporkov V. N., Korolev V. A. / Bulletin of the VIESH. 2016. Vol. 2. № 23. P. 110.
6. Blankson I. M., Foster J. E. 11-th International Conference on Plasma Assisted Technologies (ICPAT-11). – Abu Dhabi, UAE, 22–24 January, 2018. P. 15.

7. Zubrin R. How to live on Mars. – NY: Three rivers press, 2008.
8. Бычков В. Л. Искусственные и естественные шаровые молнии в атмосфере Земли. – М.: Макс Пресс, 2021.
9. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Volkov S. A., Bychkov D. V., Kostjuk A. A. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. Vol. 39. P. 2642.
10. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Kosmachevskii K. V. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2017. Vol. 45. P. 3118.
11. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Kosmachevskii K. V., Kochetov I. V. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. Vol. 41. P. 3240.
12. Naidis G. V. / J. Phys. D. 1992. Vol. 25. P. 477.
13. Воронин А. Д. Основы физики почв. – М.: Изд-во МГУ, 1986.
14. Орлов Д. С. Химия почв. – М.: Изд-во МГУ, 1992.
15. Bychkov V. L., Bikmukhametova A. R., Chernikov V. A., Deshko K. I., Mikhailovskaya T. O., Shvartov A. P. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2020. Vol. 48. P. 350. doi: 10.1109/TPS.2019.2960230
16. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009.
17. Вадюнина А. Ф. Методы исследования физических свойств почв. – М.: Агропромиздат, 1986.

PACS: 52.25.Dg.

Corona discharge influencing of soil

V. L. Bychkov, A. P. Sharov, P. A. Goryachkin, D. E. Sorokovykh, D. V. Bychkov,
D. N. Vaulin and V. A. Chernikov

Lomonosov Moscow State University
Bd. 2, 1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: bychvl@gmail.com

Received 26.09.2023; revised 12.10.2023; accepted 19.10.2023

Results of experimental studies of the influencing of corona discharge plasma on electrodes in the form of chernozem, red earth and peat are presented. The influence of the corona discharge in the change of electrical conductivity of chernozem, red earth and peat was revealed. In the experiments, corona discharges of positive and negative polarity were used. They were created using a multi-needle upper electrode. The exposure lasted from 10 to 60 minutes at a voltage of about 10 kV and a current of 100 μ A. It is shown that when using a corona discharge during processing of a soil, the charge density in the double electric layer of the soil mycelium increases, as evidenced by an increase in the electrical conductivity of soil pastes. The multidirectional nature of the results of processing treated substrates of mineral (chernozem, red earth) and organogenic (peat) nature expressed in a change in acidity indicates a difference in the mechanisms of perception of electric discharges by the soil matrix. Ionization and dissociation of air molecules under the influence of a corona discharge leads to a change (increase) in the electrical conductivity of chernozem, red earth and peat.

Keywords: corona discharge, dispersed materials, chernozem, red soil, soil, processing.

DOI: 10.51368/1996-00948-2023-6-11-18

REFERENCES

1. Gordeev A. M. and Sheshneev V. B., Electricity in life of plants, Moscow, Nauka publishers, 1991 [in Russian].
2. Pozdnyakov A. I., Electrical methods of soil investigation, Moscow, M. V. Lomonosov Moscow, MSU publishers. Faculty of Soil Science, 2009 [in Russian].

3. Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P., Panov V. A. et. al., *J. Phys. D.* **48**, 285201 (2015).
4. Mitsugi F., Ebihara K., Horibe N., Aouki S.-I. and Nagahama K., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **45**, 3082 (2017).
5. Toporkov V. N. and Korolev V. A., *Bulletin of the VIESH* **2** (23), 110 (2016) [in Russian].
6. Blankson I. M. and Foster J. E., *Proc. 11-th International Conference on Plasma Assisted Technologies (ICPAT-11)*, Abu Dhabi, UAE, 22–24 January, Abu Dhabi, 2018, pp. 15.
7. Zubrin R., *How to live on Mars*, NY, Three rivers press, Publ., 2008 [in Russian].
8. Bychkov V. L., *Natural and Artificial Ball Lightning in the Earth's Atmosphere*, Switzerland, Springer Nature, 2022. doi.org/10.1007/978-3-031-07861-3.
9. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Volkov S. A., Bychkov D. V. and Kostiuik A. A., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39**, 2642 (2011).
10. Ardelyan N. V., Bychkov V. L. and Kosmachevskii K. V., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **45**, 3118 (2017).
11. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Kosmachevskii K. V. and Kochetov I. V., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **41**, 3240 (2013).
12. Naidis G. V., *J. Phys. D.* **25**, 477 (1992).
13. Voronin A. D., *Fundamentals of soil physics*, Moscow, M. V. Lomonosov MSU publishers, 1986 [in Russian].
14. Orlov D. S., *Soil chemistry*, Moscow, M. V. Lomonosov MSU publishers, 1992 [in Russian].
15. Bychkov V. L., Bismukhametova A. R., Chernikov V. A., Deshko K. I., Mikhailovskaya T. O. and Shvarov A. P., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **48**, 350 (2020). doi: 10.1109/TPS.2019.2960230
16. Raizer Yu. P., *Gas Discharge Physics*, Dolgoprudny, Publishing House "Intellect", 2009 [in Russian].
17. Vadyunina A. F., *Methods for studying of the physical properties of soils* Moscow, Agropromizdat publishers, 1986 [in Russian].