

УДК 52.77
EDN: OARCOA

PACS: 52.80.Hc

Нитризация почвы коронным разрядом

© В. Л. Бычков*, И. Г. Степанов, П. А. Горячкин, А. П. Шваров, Д. В. Бычков,
А. А. Логунов

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

* E-mail: bychvl@gmail.com

Статья поступила в редакцию 9.09.2025; после доработки 19.11.2025; принята к публикации 20.02.2026

Шифр научной специальности: 1.3.9

Проведены экспериментальные и теоретические исследования возможности нитризации дерновоподзолистой почвы. Полученные экспериментальные результаты показывают, что электропроводность образца пахотного горизонта дерновоподзолистой почвы растет со временем воздействия плазмы, электропроводность почвенной пасты после обработки в течение 2 часов равняется 285 мкСм/см, после обработки в течение 4 часов – 317 мкСм/см, при контрольном значении электропроводности образца 115 мкСм/см. Содержание нитратов в водной вытяжке из почвы показывает рост их концентрации за 2 часа обработки до 14,5 мг/л и дальнейшим снижением концентрации при обработке 4 часа 12,8 мг/л, по отношению к контрольному значению 9 мг/л. Расчеты показывают рост концентрации в плазме азотных компонентов. Их нарабатываемые концентрации достигают $5 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, что по порядку величины близко к экспериментальному значению нарабатываемых нитратов за время эксперимента. Результаты подтверждают идею о возможности использования коронного разряда для нитризации бедных почв.

Ключевые слова: нитризация, дерновоподзолистая почва, электропроводность, нитраты, воздух, эксперимент, расчеты.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-48-53

Введение

Задачи по обработке почвы газовым разрядом представляются актуальными с точки зрения приложений в сельском хозяйстве. Они связаны с обеззараживанием воздуха, зерна, улучшением плодородия почвы, модификации ее компонентов, изменением их проводимости, химического состава, генерацией в них активных частиц [1–7]. Наша работа посвящена этим вопросам. В ней мы исследуем вопрос насыщения почвы компонентами азота, т. е. может ли воздействие коронного разряда приводить к нитрификации почвы.

Как известно, [2] азот – важнейший питательный элемент всех растений: он входит в состав таких важных органических веществ, как белки, нуклеиновые кислоты, нуклеопр-

теиды, хлорофилл, алкалоиды, фосфатиды и др. Содержание азота в растениях существенно изменяется в зависимости от вида растений, их возраста, почвенно-климатических условий выращивания культуры и т. д. Доступные растениям азотистые соединения образуются главным образом из органического вещества почвы в результате его разложения. Запасы азота в почве пополняются в основном в результате азотфиксирующей деятельности свободноживущих и клубеньковых микроорганизмов и поступления его с атмосферными осадками. Запас азота в почве в некоторой степени пополняется азотом атмосферных осадков.

По данным литературы [2], с осадками на каждый гектар ежегодно поступает от 2 до 11 кг азота. Известные источники пополнения

природных запасов азота представляют практический интерес, но они поставляют лишь часть азота, который уносится с урожаями сельскохозяйственных культур. Поэтому следует принимать меры для увеличения плодородия почвы и, прежде всего, пополнения в ней запасов азота.

В опытах с изотопом ^{15}N [2] показано, что потери азота из-за улетучивания в среднем составляют 15% от внесенного, иногда они достигают 30%. Наибольшее количество азота из-за улетучивания теряется в виде аммиака (NH_3), молекулярного азота (N_2) и закиси азота (N_2O). Значительная часть газообразного азота теряется из почвы вследствие процесса денитрификации [2]. Этот процесс восстановления нитратного азота почвы до свободного газообразного азота (N_2) происходит в результате жизнедеятельности почвенных организмов. Процесс денитрификации идет через ряд промежуточных этапов [2]



Молекулярный азот и закись азота являются основными газообразными продуктами биологической денитрификации, за счёт улетучивания которых происходят потери азота из почв. Задачей данной работы являлось выяснение вопроса, можно ли при помощи плазмы коронного разряда, реализованной в воздухе вблизи поверхности почвы проводить нитрификацию почвы. Т. е. можно ли ослабить реализацию процесса (1).

Наши исследования проводились как экспериментально с использованием отрицательного коронного разряда, так и теоретически на основе модели плазмы разряда. Для проведения этих исследований служили следующие соображения [1, 8]. Время дрейфа образованных ионов на типичной длине иглы электрода в электрическом поле коронного разряда порядка $5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-7}$ с в воздухе много меньше типичного времени обработки почвы, достигающего 1–4 ч. Образованные в плазме воздуха активные частицы при действии диффузии также быстро двигаются к поверхности почвы. Так, характерное время диффузии частиц, образованных в плазме, к поверхности почвы находится в диапазоне 0,3–1 с, что также меньше времени обработки почвы плазмой коронного разряда, достигаю-

щего 1–4 ч. Поэтому можно считать, что образование активных частиц в воздухе коронным разрядом, которые в наших условиях влияют на процессы в почве, является важным результатом воздействия плазмы.

Несомненный интерес представляет влияние фактора влажности на результаты действия коронного разряда, поэтому в расчетах мы использовали модель влажного воздуха, которая отличается от модели [9]. В настоящей работе приведены результаты модельных исследований по оценке влияния плазмы коронного разряда на свойства приземного слоя воздуха вблизи поверхности почвы при реальной степени влажности, достигающей 2%, ионные компоненты которой внедряются в почву.

Эксперимент

В экспериментах использовался коронный разряд в воздухе при напряжениях 5–10 кВ, током порядка 100 мкА, описание которого представлено в [7]. Время действия разряда варьировалось от 30 минут до 4 часов. В качестве пробного разряда в эксперименте использовалась отрицательная корона. Содержание нитратов определяется в водной вытяжке при соотношении почва-вода 1:5. Продукты химических реакций в почве переходят в раствор. Содержание нитратов в растворе производится потенциал метрическим методом с использованием ион-селективных электродов на приборе иономер «ЭКСПЕРТ-001.» Прибор калибруется под конкретный ион с использованием стандартных растворов. Для нитратов используется KNO_3 .

Использован образец пахотного горизонта агродерново-подзолистой легкосуглинистой почвы на покровных суглинках, подстилаемых мореной. Координаты разреза почвы отбора образца X: 56.03867°, Y: 37.16581°, Z: 215,0 БС (Балтийская система). Местоположение: Чашниково, Солнечногорского р-на, Московской области.

Основные свойства образцов подвергнутых коронному разряду:

1. Влажность образцов – в воздушно-сухом состоянии, в состоянии гигроскопической влажности 2,81 % (0,281 г H_2O /г почвы).

2. Кислотность $\text{pH} = 5,53 - 5,56$. Содержание гумуса 2,73 %.

3. Емкость катионного обмена (ЕКО) – 14,25 мгэкв/100 г почвы.
4. Содержание физической глины (частиц < 0,01 мм) 26,8 %.
5. Удельная поверхность 51,0 м²/грамм.
6. Плотность поверхностного заряда $2,4 \times 10^{-3}$ мг/м².

Результаты эксперимента

Эксперимент показал, что электропроводность образца пахотного горизонта дерновоподзолистой почвы растет со временем воздействия плазмы, электропроводность почвенной пасты после обработки в течение 2 часов равняется 285 мкСм/см, после обработки в течение 4 часов – 317 мкСм/см, при контрольном значении электропроводности образца 115 мкСм/см. Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) контроля дерновоподзолистой водной вытяжки почвы (без обработки) 169–170 мВ, ОВП водной вытяжки из почвы растет до +187 мВ при 2 часах обработки, а затем при обработке 4 часа падает до +180 мВ. ОВП дистил. воды 147 мВ+. Исходная влажность почвы 2,8 %, насыщенная паром 6,0 %, при обработке почвы в течение 2 ч – влажность составляет 5,4 %; при обработке почвы в течение 4 ч – влажность составляет 2,9 %.

Содержание нитратов в водной вытяжке из почвы показывает рост за 2 часа до 14,5 мг/л и дальнейшим падением при обработке в 4 часа 12,8 мг/л, по отношению к контролю 9 мг/л. Итак, за 4 часа при вводимой мощности 1 Вт произошло увеличение концентрации нитратов на ~ 40 %, что больше максимальной величины потери азота в 30 % из-за улетучивания. При этом одновременно произошло улучшение качества почвы, как показали рост ОВП и электропроводности.

Модельные расчеты

В данном разделе приведены результаты модельных исследований по оценке влияния плазмы коронного разряда на свойства приземного слоя воздуха вблизи поверхности почвы. Модельные расчеты выполнялись с помощью программы Kinet, с проверкой в программном обеспечении Maple 2024, ис-

пользуя метод Розенброка. Нас интересовали в первую очередь N_xO_y соединения, и их выход из реакций, т. к. при взаимодействии с водой они образуют HNO_3 и главный источник NO_3^- в соответствии с расчетами в [10]. На основе анализа констант скоростей реакций [8–12] в модель включены 150 химических реакций и 34 компонента, участвующих в превращениях, такие как: e , O , O_2 , O_3 , O^- , O_2^- , O_3^- , O_4^- , O^+ , O_2^+ , O_4^+ , N , N_2 , N_2^+ , N_2O , NO , NO_2 , NO_3 , N_2O_5 , NO^+ , NO^- , NO_2^- , NO_3^- , NO_2^+ , H_2O , H_2O^+ , H_3O^+ , H_2 , H , H^- , OH , OH^- , HO_2 , HNO_2 , HNO_3 . Расчеты проводились для значений приведенного электрического поля: 150 Тд и влажности 2 % (в данном случае имеется в виду отношение концентрации молекул воды в воздухе к общей концентрации компонентов в воздухе). Для влажного воздуха константа скорости диссоциативного прилипания в поле при 150 Тд принималась равной $9,4 \times 10^{-10}$ см³/с, константа скорости диссоциации молекул кислорода в таком поле принималась равной $1,9 \times 10^{-8}$ см³/с, а константа скорости ионизации бралась из [8].

В случае величины электрического поля в 150 Тд концентрация O_3 выросла до 3×10^{18} см⁻³, OH (быстро расходуется, его концентрация падает за 6 секунд от 8×10^{16} см⁻³ до 2×10^0 см⁻³ (т. е. практически почти до нуля), $N_2O \approx 2 \times 10^{14}$ см⁻³, $NO \approx 4,7 \times 10^{10}$ см⁻³, $NO_2 \approx 1,7 \times 10^{12}$ см⁻³, $NO_3 \approx 6 \times 10^{14}$ см⁻³, $N_2O_5 \approx 1,3 \times 10^{17}$ см⁻³, HNO_3 падает до 4×10^{10} см⁻³ с учетом обратной реакции с HNO_2 , рост которого выходит на величину $3,2 \times 10^{17}$ см⁻³. Это видно из рис. 1. На этом рисунке представлена эволюция концентраций компонентов HNO_3 и HNO_2 . Видно, что в рамках представленной модели в результате прохождения последовательности химических реакций в системе остаются компоненты HNO_2 , которые участвуют в обогащении почвы компонентами азота.

С увеличением влажности воздуха концентрация электронов увеличивалась до двух порядков величины, что приводит в модели к ускорению получения компонент, так, например, для озона при влажности 1 % концентрация озона O_3 поднимается до величины в 3×10^{18} см⁻³ за 50 мкс, и при отсутствии влаги за это же время. Максимальные достигаемые

значения компонент отличались, особенно для азотных компонентов.

На рис. 2 представлены результаты расчета концентрации отрицательных ионов при $E/N = 150$ Тд в воздухе при 2 % H_2O . Видно, что на больших временах концентрации ионов выходят на стационарные значения, при этом максимальный рост наблюдается у иона NO^- .

На рис. 3 представлены концентрации компонентов с участием молекул азота и озона в зависимости от разных концентраций H_2O в воздухе $E/N = 150$ Тд. Видно, что концентрация N_2O_5 является основной среди азотсодержащих компонентов при всех рассмотренных значениях влажности.

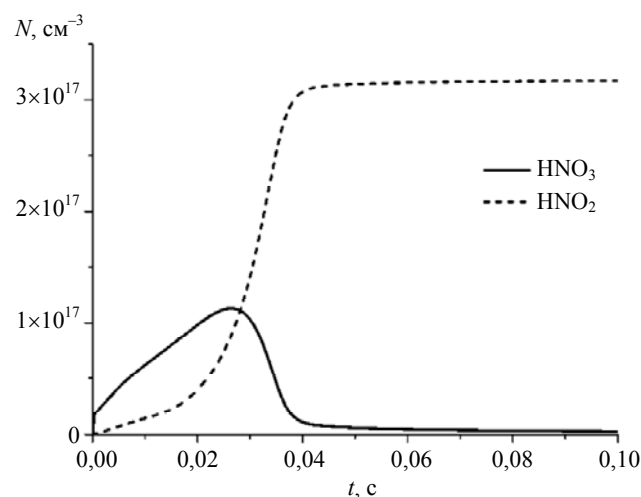


Рис. 1. Эволюция HNO_3 и HNO_2 (cm^{-3}) при воздействии разряда при $E/N = 150$ Тд в воздухе при 2 % H_2O

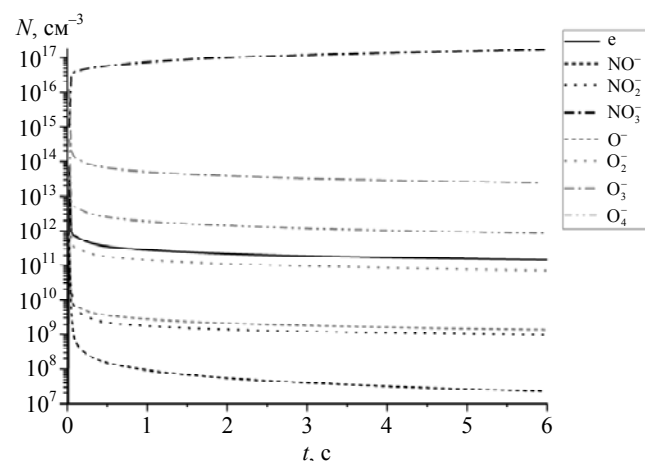


Рис. 2. Эволюция концентраций отрицательных ионов в воздухе при действии разряда при $E/N = 150$ Тд в воздухе при 2 % H_2O

Сравнение с моделями Kossyi et al. [9] и Sekimoto et al. [10] подтверждает корректность относительных концентраций компонентов и их зависимости от электрического поля, однако абсолютные значения концентраций HNO_3 и N_2O_5 требуют дальнейшего уточнения в рамках развития теоретической модели.

В модели не учитывались результаты работы [12] о роли положительных ионов азота близи электродов, а также тот факт, что частицы состава почвы могут поступать в плазму. Полученные результаты позволяют сделать сравнение экспериментальных и теоретических данных.

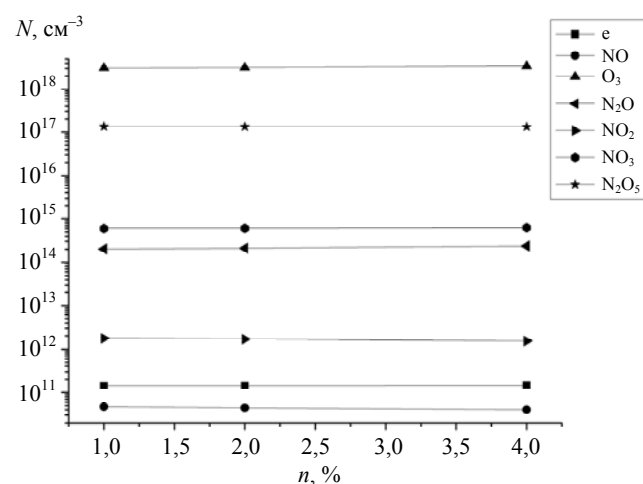


Рис. 3. Концентрации нейтралов для различных концентраций H_2O в воздухе ($n = 1\%$, 2% и 4%). Времена расчета для влажного воздуха составляли 600 мкс, а для сухого воздуха – до 100 с, $E/N = 150$ Тд

Измерения показали, что среднее содержание нитратов в водной вытяжке из почвы за 2 и 4 часа растет на 5 мг/л по отношению к контролю, или $5 \times 10^{-4} \text{ г/см}^3$. В качестве реперной компоненты будем рассматривать HNO_2 . Из Рис.1 можно оценить скорость наработки HNO_2 как $Q = 10^{19} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Это дает, что за 4 часа в объеме нарабатывается $2.4 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ HNO_2 , такого же порядка будет нарабатываться концентрация N_2O_5 , т.е. в сумме оба механизма наработки нитратов дадут их величину $\sim 5 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, что по порядку величины близко к экспериментальному значению нарабатываемых нитратов. Мы видим, что происходит эффективная наработка нитратов.

Закключение

Полученные экспериментальные результаты показывают, что электропроводность образца пахотного горизонта дерновоподзолистой почвы растет со временем воздействия плазмы, электропроводность почвенной пасты после обработки в течение 2 часов равняется 285 мкСм/см, после обработки в течение 4 часов – 317 мкСм/см, при контрольном значении электропроводности образца 115 мкСм/см. Окислительно-восстановительный потенциал водной вытяжки из почвы растет до +187 мВ при 2 часах обработки, а затем при обработке 4 часа падает до +180 мВ. Это показывает, что происходит улучшение качества почвы. Содержание нитратов в водной вытяжке из почвы показывает рост за 2 часа до 14,5 мг/л и дальнейшее падение при обработке за 4 часа до 12,8 мг/л по отношению к контролю 9 мг/л. Последний результат показывает, что действие маломощного коронного разряда приводит к положительному воздействию на свойства приповерхностных слоев почвы. При этом содержание нитратов растет в среднем на 50 %. Проведенные расчеты показывают рост концентрации в плазме азотных компонентов, которые поступают в почву. Их нарабатываемые концентрации достигают $5 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, что по порядку величины близко к экспериментальному значению нарабатываемых нитратов за время эксперимента. Полученные результаты подтверждает идею о воз-

можности использования коронного разряда для нитризации бедных почв. Поэтому использование коронного разряда можно рекомендовать в качестве средства для активации почв в местах рискованной жизнедеятельности человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы: Сер. Б. Тематический т. 9-5: Прикладная химия плазмы / под ред. Фортова В. Е. – М.: «Янус-К», 2008.
2. Минеев В. Г. Агрохимия. – М.: Наука, 2006.
3. Александров А. Ф., Бычков В. Л., Бычков Д. В. и др. / Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2011. № 4. С. 67.
4. Panov V. A., Pecherkin V. Y., Vasilyak L. M., et al. / Plasma Phys. Rep. 2021. Vol. 47. P. 623.
5. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., et al. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2021. Vol. 49. № 3. P. 1028.
6. Bychkov V. L., Bikmukhametova A. R., Chernikov V. A., Deshko K. I., et al. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2020. Vol. 48. № 2. P. 350.
7. Бычков В. Л., Шваров А. П., Горячкин П. А. и др. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 11.
8. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Bychkov D. V., Kosmachevskii K. V. In Plasma assisted combustion, gasification and pollution control. Vol. 1 / Ed. Matveev I. B. – Denver, Colorado: Outskirts press, 2013.
9. Kossyi I. A., Kostinskiy A., Matveev A. A. / Plasma Sources Sci. Tech. 1992. Vol. 1. P. 207.
10. Sekimoto K., Takayama M. / Eur. Phys. J. D. 2008. Vol. 50. P. 297.
11. Atkinson R., Baulch D. L., Cox R. A., Crowley J. N., et al. / Chem. Phys. 2004. Vol. 4. P. 1461.
12. Чистилинов А. В., Якушин Р. В., Лубин А. А., Угрюмов А. В. / Прикладная физика. 2024. № 6. С. 17.

PACS: 52.80.Hc

Nitrization of soil by corona discharge

V. L. Bychkov*, I. G. Stepanov, P. A. Goryachkin, A. P. Shvarov, D. V. Bychkov,
and A. A. Logunov

M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

* E-mail: bychvl@gmail.com

Received 9.09.2025; revised 19.11.2025; accepted 20.02.2026

Experimental and theoretical studies of the nitrization possibility of turf-podzolic soil have been carried out. The experimental results obtained show that the electrical conductivity of the sample of the arable horizon of turf-podzolic soil increases with the time of exposure to plasma, the electrical conductivity of the soil paste after treatment for 2 hours is 285 $\mu\text{Sm/cm}$, after treatment for 4 hours is 317 $\mu\text{Sm/cm}$, with a reference value of the electrical conductivity of

the sample of 115 $\mu\text{Sm/cm}$. The nitrate content in the aqueous extract from the soil shows an increase in 2 hours to 14.5 mg/l, and a further decrease in 4 hours to 12.8 mg/l, relative to the control of 9 mg/l. Calculations show an increase in plasma concentrations of nitrogen components that enter the soil. Their accumulated concentrations reach $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, which is an order of magnitude close to the experimental value of the accumulated nitrates during the experiment. The results confirm the idea of the possibility of using corona discharge for nitrization of poor soils.

Keywords: nitrization, turf-podzolic soil, electrical conductivity, nitrates, air, experiment, calculations.

REFERENCES

1. Encyclopedia of low-temperature plasma: Series B. Thematic Vol. **9-5**: Applied Plasma Chemistry / ed. Fortov V. E. Moscow, Janus-K, 2008 [in Russian].
2. Mineev V. G. Agrochemistry. Moscow, Nauka, 2006 [in Russian].
3. Alexandrov A. F., Bychkov V. L., Bychkov D. V., et al., Vestnik Moscow Univ. Ser. 3. Phys. Astron. № 4, 67 (2011) [in Russian].
4. Panov V. A., Pecherkin V. Y., Vasilyak L. M., et al., Plasma Phys. Rep. **47**, 623 (2021).
5. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **49** (3), 1028 (2021).
6. Bychkov V. L., Bikmukhametova A. R., Chernikov V. A., Deshko K. I., et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **48** (2), 350 (2020).
7. Bychkov V. L., Shvarov A. P., Goryachkin P. A., et al., Applied Physics, № 6, 11 (2023) [in Russian].
8. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Bychkov D. V., and Kosmachevskii K. V. In Plasma assisted combustion, gasification and pollution control. Vol. **1** / Ed. Matveev I. B. Denver, Colorado, Outskirts press, 183 (2013).
9. Kossyi I. A., Kostinskiy A., and Matveev A. A., Plasma Sources Sci. Tech. **1**, 207 (1992).
10. Sekimoto K. and Takayama M., Eur. Phys. J. D. **50**, 297 (2008).
11. Atkinson R., Baulch D. L., Cox R. A., Crowley J. N., et al., Chem. Phys. **4**, 1461 (2004).
12. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Lubin A. A., and Ugryumov A. V., Applied Physics, № 6, 17 (2024) [in Russian].

Об авторах

Бычков Владимир Львович, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: bychvl@gmail.com SPIN-код: 2936-116; AuthorID: 18266, ORCID 0000-0002-5470-1297, Scopus Author ID 7102540048, WoS Researcher ID V-7141-2018

Логунов Александр Александрович, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: logunov_aa@physics.msu.ru SPIN-код: 8069-9474, AuthorID: 244088, Scopus ID: 57214977963

Шваров Александр Петрович, к.б.н., доцент, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: ashvarov@mail.ru SPIN-код: 5431-8919, AuthorID: 91766; Scopus ID 6505890527

Степанов Илья Георгиевич, младший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: ilyastep91@mail.ru AuthorID: 1164557, Scopus ID 56900826700

Бычков Дмитрий Владимирович, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: bychkovdv@gmail.com AuthorID: 611220 Scopus ID 24502747200

Горячкин Павел Алексеевич, аспирант, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: mystereo@mail.ru Scopus ID 57202727406