УДК 539

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОТОНОВ ЧЕРЕЗ ПОЛЫЕ И СПЛОШНЫЕ ЧАСТИЦЫ СТРУКТУРЫ Al2O3/SiO2**

**М.В. Резник1, В.Ю. Юрина1**

*1ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет» (г. Благовещенск)*

*В данной работе представлены результаты моделирования воздействия протонов энергии 30 и 100 кэВ на полые и сплошные частицы структуры Al2O3/SiO2 в программных комплексах «SRIM». Диаметр внешних стенок 900 нм. Внешний слой сфер состоит из SiO2 толщиной 40 нм. Внутренний слой полой сферы состоит из Al2O3 толщиной 160 нм. Внутреннее строение полой частицы представляет собой сферу радиуса 250 нм, заполненную О2. В результате моделирования было установлено, что длина свободного пробега протонов в полых частицах по сравнению со сплошными в 2 раза больше.*

**SIMULATION OF PROTON PASSAGE THROUGH HOLLOW AND SOLID PARTICLES OF Al2O3/SiO2**

**M.V. Reznik1, V.Yu. Iurina1**

*1FGBOU VO «Amur State University» ( Blagoveshchensk)*

*This work presents the results of modeling the effects of protons of energy 30 and 100 keV on hollow and solid particles of the Al2O3/SiO2 structure in SRIM software complexes. The diameter of the outer walls is 900 nm. The outer layer of the spheres consists of SiO2 with a thickness of 40 nm. The inner layer of the hollow sphere consists of Al2O3 with a thickness of 160 nm. The internal structure of a hollow particle is a sphere with a radius of 250 nm filled with O2. As a result of the simulation, it was found that the free path of protons in hollow particles compared to solid particles is 2 times longer.*

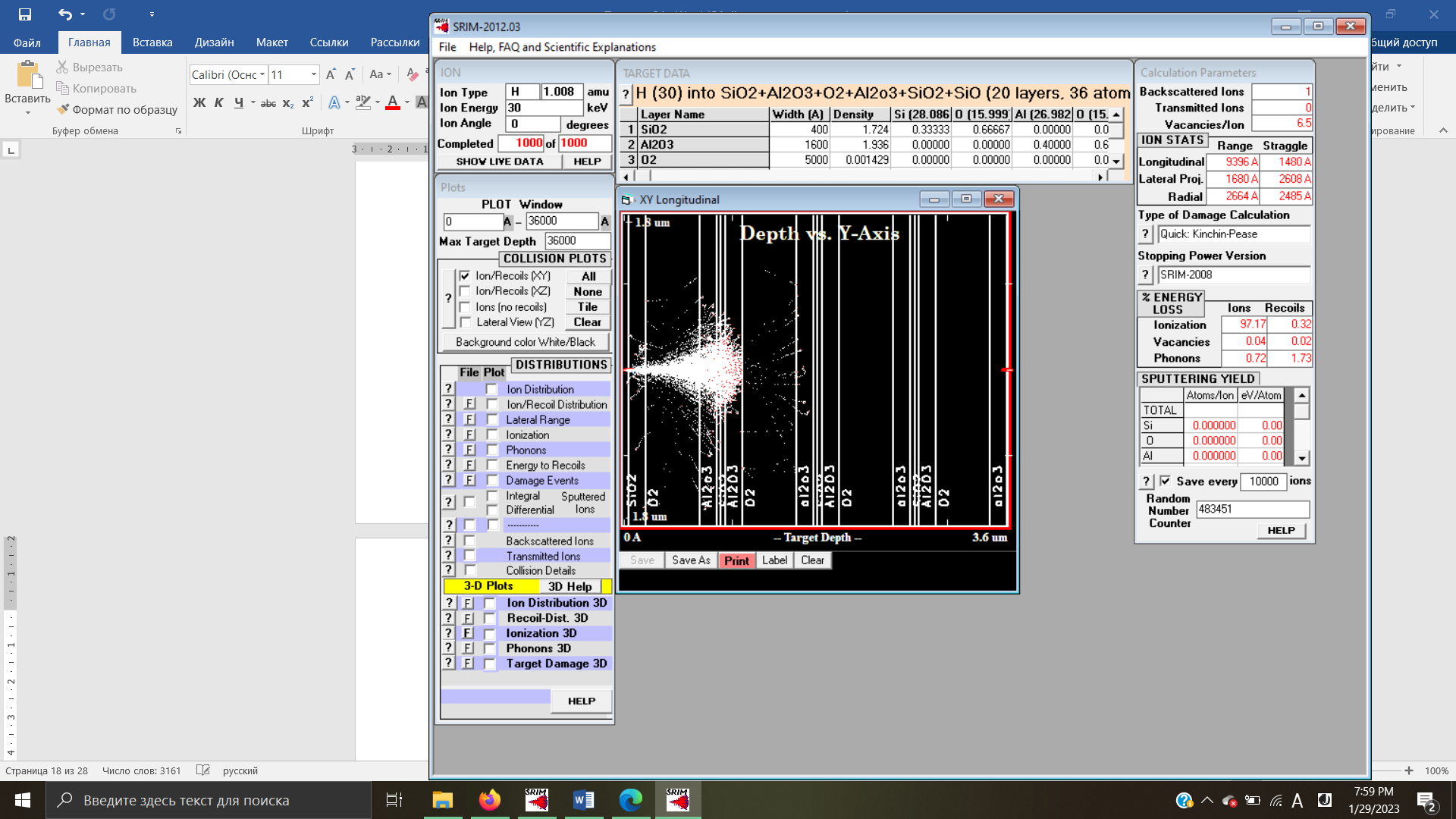
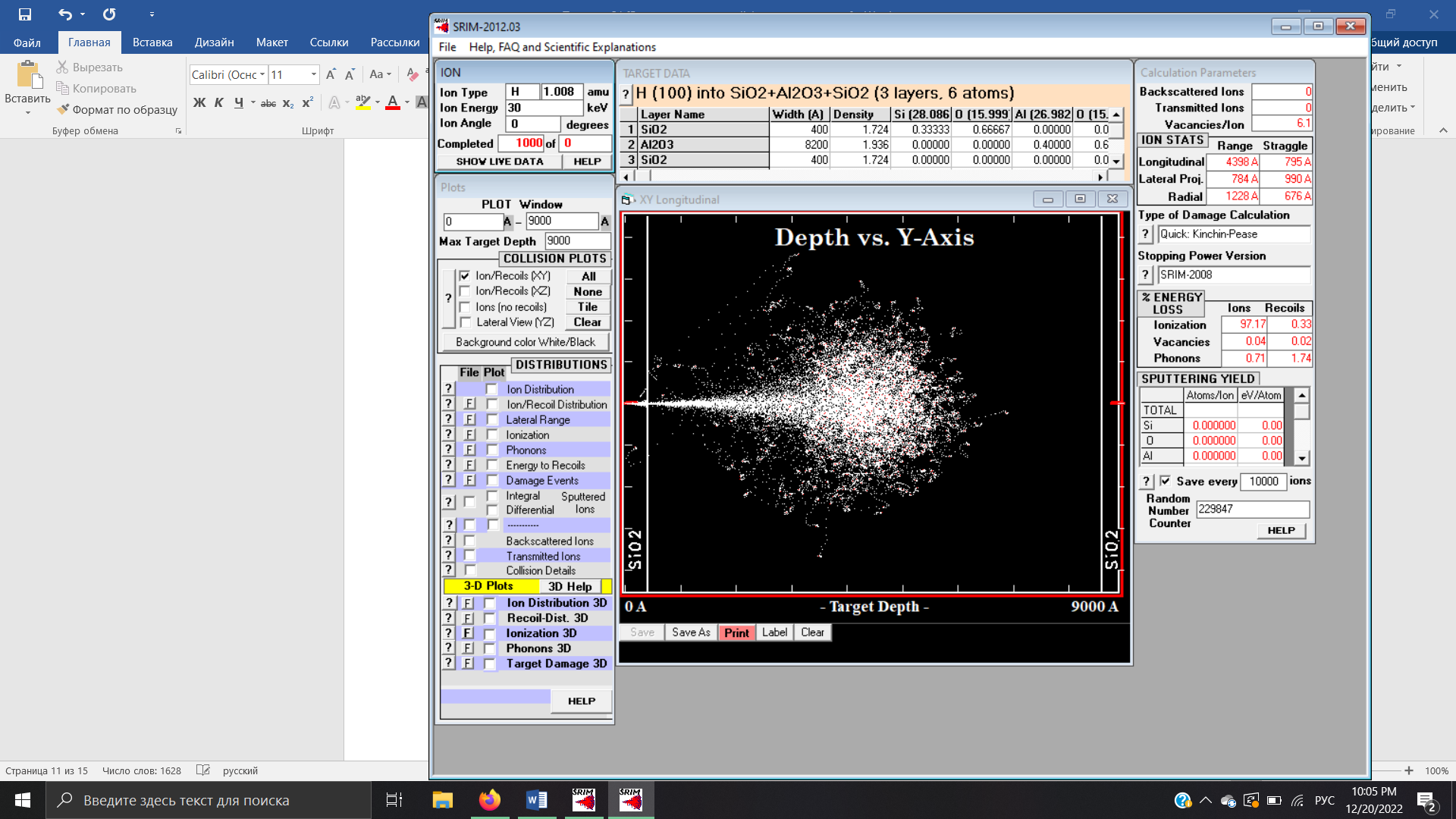
В настоящее время продолжается активное исследование космоса при помощи различных космических аппаратов. В следствии этого вопрос улучшения их защиты от ионизирующего излучения является достаточно важным. Одним из основных способов решения данной задачи является разработка и применение новых защитных материалов и покрытий. Перспективных направлений космического материаловедения является разработка защитных материалов (терморегулирующих покрытий), состоящих из полых микрочастиц. Выбор полых микрочастиц объясняется их радиационной стойкостью в сравнении с объёмными частицами [1; 2].

В данной работе представлены результаты моделирования воздействия протонов энергии 30 и 100 кэВ на полые и сплошные частицы структуры Al2O3/SiO2 в программных комплексах «SRIM».

Для моделирования воздействия протонов с полыми и сплошными частицами использовался программный пакет SRIM [3]. SRIM представляет собой программный пакет транспорта ионов в некристаллическом веществе методом Монте-Карло без учёта неупругих ядерных реакций, моделирующая все процессы взаимодействия налетающих частиц с атомами вещества [4]. TRIM, входящий в программный пакет SRIM, является программой, способной рассчитывать как конечное трехмерное распределение ионов, так и все кинетические явления, связанные с потерей энергии ионов. К этим явлениям относятся: повреждение мишени, распыление, ионизация, генерация фотонов.

Условия моделирование воздействия протонов на полые и сплошные частицы в программном комплексе «SRIM»: энергия электронного пучка – 30 и 100 кэВ, диаметр электронного пучка – 1 нм, возникновение вторичных электронов – нет, размер сфер – 900 нм, толщина внешней оболочки сферы – 40 нм, материал внешней оболочки – SiO2, толщина внутренней сферы полой частицы – 160 нм, диаметр внутренней сферы сплошной частицы – 8200 нм, материал внутренней сферы – Al2O3, материал внутри полой сферы – газ O2, общее число сфер – 4, число бомбардирующих электронов –103, угол падения – 90°, число одновременно отображаемых траекторий – 1000.

На рис. 1 представлено воздействие пучка протонов с энергией 30 кэВ с полыми (рис 1., а) и объемными (рис 1., б) частицами Al2O3/SiO2.

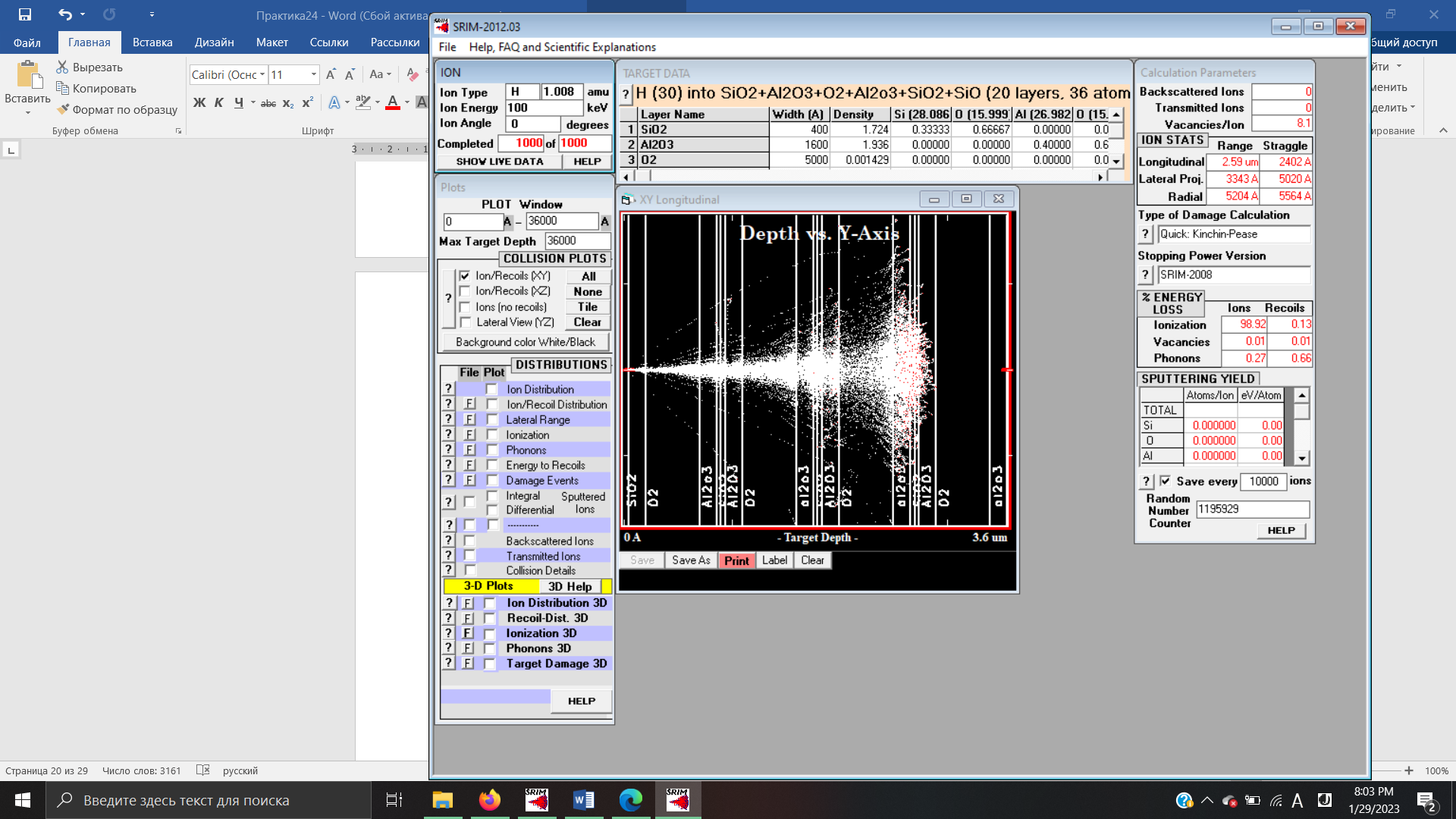
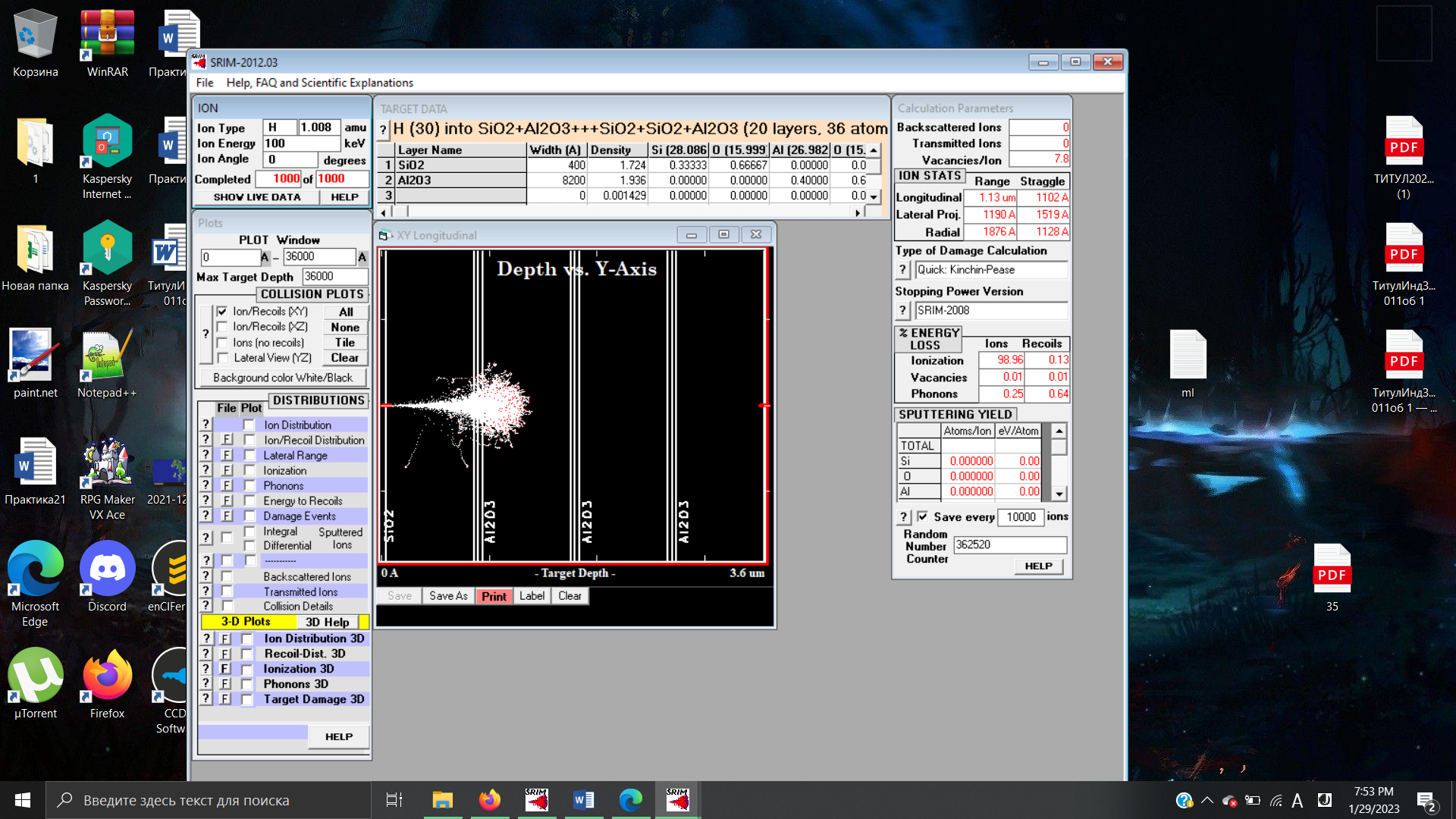
б)

а)

*Рис.1.* Результат воздействия протонов с энергией 30 кэВ с полой (а) и сплошной (б) частицей Al2O3/SiO2

Анализ воздействия протонов показал, что глубина проникновения протонов с энергией 30 кэВ достигает примерно от 0,6 до 0,7 мкм в сплошных частицах (рис 1., б) и примерно от 1,6 до 1,75 мкм в полых частицах (рис 1., а). Поскольку протоны энергии 30 кэВ неспособны преодолеть одну сплошную частицу, то дефекты будут образовываться в поверхностном слое частиц. В случае полых частиц протоны способны преодолеть первый слой частиц, благодаря чему часть дефектов будет образовываться в частицах второго слоя.

На рис. 2 представлено воздействие пучка протонов с энергией 100 кэВ с полыми (рис 2., а) и объемными (рис 2., б) частицами Al2O3/SiO2.

а)

б)

*Рис. 2* Воздействие потока протонов энергии 100 кэВ на кластер из 4 полых (а) и сплошных (б) частиц Al2O3/SiO2

Анализ воздействия протонов показал, что глубина проникновения протонов с энергией 100 кэВ достигает примерно 1,35 мкм в сплошных частицах (рис 2., а) и примерно от 2,8 до 2,9 мкм в полых частицах (рис 2., б).

Моделирование подтверждает большую эффективность и стойкость полых частиц в сравнении со сплошными. Это является следствием наличия у полых частиц пустой области, внутри которой воздействия протонов на вещество не происходит. В то же время у сплошных частиц такая полость отсутствует, в следствии чего воздействия протонов на вещество происходит во всём объёме сплошной частицы.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание №122082600014-6 (FZMU-2022-0007).*

**Л И Т Е Р А Т У Р А**

1. Юрина, В. Ю. Оптические свойства и радиационная стойкость микро-, наночастиц и микросфер Al2O3 / В. Ю. Юрина, В. В. Нещименко, Л. Чундун // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 3. – С. 46-52. – DOI 10.31857/S1028096020030218. – EDN RNUYPG.
2. Гамза, Д. К. Радиационная стойкость полых частиц диоксида титана, обработанных УФ-облучением / Д. К. Гамза, В. В. Нещименко // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2022. – № 97. – С. 35-40. – DOI 10.22250/20730268\_2022\_97\_35. – EDN OWZMBL.
3. *Biersack J. P.* A Monte Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets/ J. P. Biersack, L. G. Haggmark // Nuclear Instruments and Methods. – 1980. – V. 174 (1–2). P. 257–269.
4. Kinchin, G.H., Pease, R.S. Displacement of Atoms in Solid by Radiation // Reports on Progress in Physics – 1955 – V. 18. No. 4 – P. 590-615