

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ ЛЕДЯНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРОТОНОВ: ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ H, D И $^{16}\text{O}$ , $^{18}\text{O}$

*Бронский Василий Сергеевич  
совместно с Шилобреевой С.Н., Шематовичем В.И., Хохловым А.В.*

Лаб. методов исследования и анализа веществ и материалов,  
аналитический отдел  
[vbronsky@gmail.com](mailto:vbronsky@gmail.com)

С помощью компьютерного моделирования проведен статистический анализ существующих моделей [1-3] для расчета коэффициентов распыления ледяных поверхностей под воздействием протонов в приложении к спутникам Юпитера, а также получены численные значения коэффициентов распыления молекул  $\text{H}_2\text{O}$ , атомов H и O в широком диапазоне энергии (20 эВ – 100 КэВ) воздействующего иона. Установлено, что наименее чувствительной к вариации параметров является аппроксимационная модель Fama [3] с рассчитанным доверительным интервалом  $\pm 18\%$ , которая в дальнейшем была использована для моделирования. Рассчитаны коэффициенты распыления водяного льда ( $\rho = 0.94$ ) под воздействием протонов в диапазоне энергии от нескольких эВ до 10 КэВ и проведена верификация полученных результатов с экспериментальными данными [2]. Показано, что максимальный коэффициент распыления равен 0.9  $\text{H}_2\text{O}/\text{ион}$  при энергии налетающих ионов  $\text{H}^+$  200 эВ. Моделирование зависимости коэффициентов распыления молекул  $\text{H}_2\text{O}$  от температуры ледовой поверхности показало, что в интервале температур 40-100К вариации величины коэффициента распыления отсутствуют в пределах погрешности расчетов. С ростом температуры поверхности увеличивается и коэффициент распыления. В максимуме распределения при  $T = 40\text{-}100\text{K}$  коэффициент распыления  $Y_{\text{H}_2\text{O}}(E = 200 \text{ эВ}) = 0.9 \text{ H}_2\text{O}/\text{ион}$ , при  $T = 200\text{K}$  –  $1.1 \text{ H}_2\text{O}/\text{ион}$ . Рассчитанные соотношения коэффициентов распыления изотопов H, D и  $^{18}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$  с поверхности для спутников Юпитера (Европа, Ганимед, Каллисто) под воздействием ионов  $\text{H}^+$  в диапазоне энергии от нескольких эВ до 10 КэВ равны  $(1.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-5}$  и  $0.18 \pm 0.03$  соответственно. Полученные соотношения отличаются от исходных изотопных на поверхности спутников Юпитера [3]. Установлено, что это отличие значимое и может приводить к перераспределению изотопов на поверхности спутников Юпитера. Разработана модель перераспределения изотопов водорода (H, D) и кислорода ( $^{18}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ ) во времени в процессе распыления поверхностей спутников Юпитера под воздействием протонов в зависимости от их плотности потока. Это позволило проследить динамику формирования и изменения изотопного состава ледяных поверхностей. Показано, что изменение изотопного соотношения D/H на поверхности спутников Юпитера зависит от величины плотности потока облучаемых ионов. Также проведено моделирование распределения по кинетической энергии распыленных молекул  $\text{H}_2\text{O}$  и атомов H и O в диапазоне энергий 0.1-100 КэВ налетающих ионов  $\text{H}^+$ . Полученные результаты могут быть использованы для моделирования изменения изотопного состава экзосферы спутников Юпитера в процессе распыления.

Список литературы:

1. Sigmund P. Theory of sputtering. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets // Phys. Rev. 1969. V. 84. P. 383.

2. Yamamura Y., Matsunami J., Itoh N. Radiation effects and defects in solids // Rad. Eff. 1983. V. 71. P. 65.
3. Fama M., Shi J., Baragiola R.A. Sputtering of ice by low-energy ions // Surf. Sci. 2008. V. 602. P. 156.
4. Baragiola R.A., Vidal R.A., Svendsen W., Schou J., Shi M., Bahr D.A., Atteberry C.L. Sputtering of water ice // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2003. V. 209. P. 294.
5. Кусков О. Л., Дорофеева В. А., Кронрод В. А., Макалкин А. Б. Системы Юпитера и Сатурна: Формирование, состав и внутреннее строение // 2009. М. ЛКИ. С. 478. ISBN. 9785382009865.

### Список основных публикаций за последние 3 года:

1. С.Н.Шилобреева, В.И.Зиненко, В.В.Сарайкин, Л.Л.Кашикаров, Ю.А. Агафонов, В.С.Бронский. Экспериментальное моделирование модификации силикатов под воздействием ионизирующего излучения. / Тезисы докладов XLII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва 29-31 мая 2012. С.82.
2. Бронский В.С., Шилобреева С.Н. Моделирование процессов фракционирования ряда изотопов в силикатах, с помощью программы SRIM-2013. / Тезисы докладов. X конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». 3-5 апреля 2013. Москва. С. 126.
3. Шилобреева С.Н., Бронский В.С., Сарайкин В.В., Зиненко В.И., Агафонов Ю.А. Изучение распределения изотопов железа ( $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ) в наноразмерных силикатных пленках с помощью ВИМС / Тезисы докладов Второго съезда аналитиков России (<http://www.wssanalytchem.org/car2013/doc/Abstracts-CRusAn2013.pdf>), Москва. 2013. С. 163.
4. Бронский В.С., Шилобреева С.Н., Хохлов А.В. Численное моделирование имплантации изотопов железа ( $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ) в силикаты: верификация расчетных (программы SRIM, SUSPRE) и экспериментальных данных. / Тезисы докладов XXI международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью». 22-26 августа 2013. Ярославль. С. 392.
5. Шилобреева С.Н., Зиненко В.И., Агафонов Ю.А., Сарайкин В.В., Бронский В.С. Миграция атомов железа в кристаллических (Si) и аморфных ( $\text{SiO}_2$ ) телах при радиационном и термическом воздействии. // Геохимия. 2014. № 7. С.663.
6. Бронский В.С., Шилобреева С.Н., Шематович В.И., Хохлов А.В. Моделирование распыления ледяных поверхностей под воздействием ионов  $\text{H}^+$ : перераспределение изотопов Н и О в приложении к спутникам Юпитера. // Астр. Вестник. 2014. в печати.

**ФИО:** Бронский Василий Сергеевич.

**Дата рождения:** 31.07.1990.

**Стаж работы в ГЕОХИ РАН:** 3 года.

**Должность:** аспирант, младший научный сотрудник.

**Область научных интересов:** компьютерное моделирование, взаимодействие излучения с поверхностью, распыление, ВИМС.