

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций

Фролов Дмитрий Александрович

**Воздействие астрофизических
факторов на возможную обитаемость
объектов Солнечной системы и
экзопланет**

Направление подготовки: 03.06.01 – Физика и астрономия

Направленность: 03.06.01_01 – Астрофизика и звёздная астрономия

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Санкт-Петербург

2021

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей Инженерно Физической Школе Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВИФШ: **Журихина Валентина Владимировна**
д.ф.-м.н., проф.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Научный руководитель: **Остряков Валерий Митрофанович**
д.ф.-м.н., проф.
профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Рецензент: **Бобашев Сергей Валентинович**
д.ф.-м.н., проф.
главный научный сотрудник
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

Содержание

Содержание	3
1 Общая характеристика научно-квалификационной работы	4
1.1 Актуальность	4
1.2 Цель и задачи	7
1.3 Научная новизна	7
1.4 Апробация	8
1.5 Публикации	9
2 Основное содержание работы	10
2.1 Космические лучи и космогенные изотопы	10
2.2 Образование космогенных изотопов на Луне и калибровка расчетных программ	13
2.3 Аномальные сигналы в архивах космогенных изотопов как результат взаимодействия гелиосферы с неоднородностями межзвездной среды.	18
2.4 Влияние космического излучения на Европе на гипотетиче- ские живые организмы.	21
3 Заключение	25
Список литературы	27

1 Общая характеристика научно-квалификационной работы

1.1 Актуальность

Открытие в начале XX в. космических лучей (КЛ) - частиц высоких и сверхвысоких энергий, падающих на атмосферу Земли из космоса - явилось не только важнейшим этапом в развитии ядерной физики, но также и расширило контекст исследований возникновения и развития жизни на Земле. В поле зрения появился новый фактор, оказывающий влияние на живые организмы - космическая радиация. КЛ могут иметь галактическую (ГКЛ) и солнечную (СКЛ) природу. Физически ГКЛ представлены ядрами элементов от водорода до железа, из них протоны и альфа-частицы составляют примерно 90% и 9% соответственно. СКЛ представлены в основном протонами. В атмосфере частицы КЛ инициируют каскады ядерных превращений. Обнаружение радиоактивных изотопов, образующихся вследствие реакций с космическими лучами (космогенных изотопов), дало толчок к возникновению палеоастрофизических исследований. Оказалось, что космогенные изотопы, взаимодействуя с биосферой и атмосферными и геологическими факторами, могут захораниваться в так называемые архивы. Изучение этих природных архивов позволяет восстановить астрофизические условия на Земле и в Солнечной системе в прошлом: активность Солнца, поток КЛ, состояние гелиосферы.

Помимо земных архивов потенциальный интерес представляют также и образцы с других небесных тел. В 1971 году астронавты миссии Аполлон-15 доставили на Землю образцы лунного грунта. Вскоре вышли одни из первых работ, измеривших содержание различных изотопов в этих образцах, а также результаты моделирования ядерных реакций атомов лунного грунта с космическими лучами [1; 2]. Луна, не подверженная влияниям геофизических факторов изменчивости (геомагнитного поля, состоянию атмосферы), выступает в этом случае интегральным детектором, накапливая

космогенные изотопы на протяжении миллионов лет. Развитие численных методов, и появление более сложных и точных систем для численного моделирования ядерных реакций способствует тому, что работы выполненные с использованием этих образцов, появляются и сейчас [3; 4]. В нашей работе предлагается применение измерений радиоуглерода в земной атмосфере для калибровки программ расчёта ядерных реакций в лунном грунте, на примере GEANT4 [5] - разработанного в CERN программного пакета для расчета взаимодействия излучения с веществом.

Достаточно новое направление в исследовании архивов космогенных изотопов - исследование импульсных событий. Впервые обнаруженный в 2012 году группой из университета Нагои [6] импульсный сигнал в древесных архивах радиоуглерода представляет собой кратковременное (1-2 года) импульсное нарастание концентрации радиоуглерода, датированное 775 годом н.э. Затем этим же коллективом, и другими исследователями были обнаружены аналогичные импульсные события, с использованием в т.ч. других типов архивов и других космогенных радионуклидов [7–10]. Физическая причина этих событий является объектом широкого научного обсуждения, т.к. все указывает на катастрофический характер этих явлений. В вышеуказанных работах, и другими авторами рассматриваются различные версии: сверхмощная солнечная вспышка, множество вспышек меньшей мощности [11], гамма-всплеск [12]. Обнаруженные события также можно дифференцировать по скорости нарастания и длительности, что, по-видимому, говорит об их разной физической природе. Измерения одного события в различных изотопах, вследствие того, что эти изотопы образуются в различных энергетических каналах, позволяет сформировать т.н. изотопный след. В данной работе предлагается посредством изотопного следа получить некие оценки формы энергетического спектра, а также предложены некоторые аргументы против версии о солнечном происхождении конкретных событий. Также предлагается объяснение повышений

концентрации космогенных радионуклидов вследствие взаимодействия ге-лиосферы с веществом межзвездной среды. В работе [13] данный вопрос поднимается также на примере экзопланет Kepler-20f Kepler-88c. Показано, что влияние локального окружения на звездную систему может быть достаточно существенным, модулируя поток космических лучей в довольно широких пределах.

Космическое излучение является также важным фактором в задаче поиска жизни и ее следов в рамках исследования Солнечной системы. Космические аппараты, исследующие планеты и их спутники, оснащены необходимым оборудованием для поиска биомаркеров - следов жизнедеятельности организмов. Так, в числе основных задач, планирующихся к запуску в середине 2020-х гг. миссий «Europa Clipper» НАСА и «Jupiter Icy Moon Explorer» Европейского Космического Агенства заявлены поиск жидкой воды и биосигнатур (остатков биологических молекул) на поверхности Европы. На оценку времени жизни таких молекул на поверхности, и глубины, на которой их можно будет обнаружить, направлены современные междисциплинарные исследования. Знание физики взаимодействия КЛ с веществом, образования КИ в толще воды или льда и оценка влияния этих процессов на состав образцов позволят корректно спланировать эксперименты и необходимую для их проведения аппаратуру космических аппаратов. Возможное обнаружение телескопом Хаббл выбросов жидкой воды в атмосферу Европы [14; 15] утверждает необходимость рассмотрения такой задачи. В рамках научных изысканий нашего коллектива было проведено моделирование ситуации с выбросом чистой воды на поверхность, в т.ч. экспериментально. Посредством экспериментов определена смертельная доза излучения на примере модельного организма *Deinococcus Radiodurans*, в то же время расчётной группой проведено численное моделирование, установившие ограничения на глубину отбора образца, на которой существует вероятность обнаружить жизнеспособный организм.

1.2 Цель и задачи

Цель работы - изучить параметры космического излучения на Земле и других объектах Солнечной системы, а также оценить его влияние на биологические образцы.

Задачи работы:

1. Провести процедуру калибровки вычислений взаимодействия ГКЛ с лунным грунтом, используя восстановленную по земным архивам ^{14}C активность Солнца за последние 20000 лет.
2. Провести восстановление средних параметров космического излучения на протяжении последних 3 млн. лет на основе экспериментальных измерений содержания ^{26}Al в керне лунного грунта.
3. Основываясь на недавних сообщениях об обнаружении криовулканизма, провести моделирование набора дозы во льду на спутнике Юпитера - Европе. Показать влияние параметров облучения на выживаемость образцов и сохранность биомаркеров.

1.3 Научная новизна

- Предложена процедура калибровки программ для расчета ядерных взаимодействий, с использованием данных о космогенных изотопах в земных и лунных образцах и проведена такая калибровка по радионуклиду ^{14}C .
- С использованием данной калибровки впервые проведена оценка средних параметров потока ГКЛ и солнечной модуляции на протяжении последних 3 млн. лет.
- Предложено объяснение некоторых импульсных событий посредством взаимодействия гелиосферы с веществом межзвездной среды.

- Проведено численное моделирование устойчивости биологических образцов в радиационных условиях Европы.

1.4 Апробация

Результаты, приведенные в настоящей работе были представлены в устных и стендовых докладах на следующих конференциях:

1. *Frolov D., Ostryakov V., Pavlov A., Struminsky A., Vasilyev G.* Isotopic terrestrial imprints of solar superflares // Journal of Physics: Conference Series. т. 1038. — IOP Publishing. 2018. — с. 012008.
2. *Pavlov A., Blinov A., Frolov D., Konstantinov A., Koudriavtsev I., Ogurtsov M., Ostryakov V., Vasilyev G.* Isotopic imprint of the Solar system encounter with interstellar gas cloud around 660 BC (2610 BP) // Journal of Physics: Conference Series. т. 1400. — IOP Publishing. 2019. — с. 022034.
3. *Cheptsov V., Pavlov A., Tsurkov D., Belov A., Vorobyova E., Frolov D., Vasiliev G., Lomasov V.* Bacteria Survival in Europa's Surface Ice after Pulse Ejection of Subsurface Ocean Water // The Tenth Moscow Solar System Symposium. — 2019. — с. 507—509.
4. *Cheptsov V., Belov A., Pavlov A., Tsurkov D., Vorobyova E., Frolov D., Lomasov V.* The Stability of Enzymes to the Effect of Ionizing Radiation Under Simulated Extraterrestrial Conditions // The Eleventh Moscow Solar System Symposium 11M-S3. — 2020. — с. 107—108.
5. *Васильев Г., Константинов А., Кудрявцев И., Огурцов М., Остряков В., Павлов А., Фролов Д.* Изотопные следы сжатий гелиосферы, вызванных столкновениями солнечной системы с плотными межзвездными облаками // Солнечная И Солнечно-Земная Физика-2019. — 2019. — с. 79—82.

1.5 Публикации

Результаты данной работы опубликованы в следующих изданиях:

1. *Ostryakov V., Blinov A., Vasilyev G., Konstantinov A., Pavlov A., Frolov D.* Modulation of galactic cosmic rays and its traces in isotopic tracks on the Earth and the moon // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* — 2017. — т. 81, № 2. — с. 170—172.
2. *Pavlov A., Blinov A., Frolov D., Konstantinov A., Ostryakov V., Vasilyev G.* Spatial distribution of the atmospheric radionuclide production by galactic cosmic rays and its imprint in natural archives // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* — 2017. — т. 164. — с. 308—313.
3. *Pavlov A., Cheptsov V., Tsurkov D., Lomasov V., Frolov D., Vasiliev G.* Survival of Radioresistant Bacteria on Europa’s Surface after Pulse Ejection of Subsurface Ocean Water // *Geosciences.* — 2019. — т. 9, № 1. — с. 9.
4. *Pavlov A. K., Frolov D., Konstantinov A., Koudriavtsev I., Ogurtsov M., Ostryakov V., Vasilyev G.* On the radiocarbon increase around 5480 BC as a result of the Solar system encounter with interstellar cloud // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2019. — т. 485, № 3. — с. 4441—4445.
5. *Vasil’ev G., Konstantinov A., Kudryavtsev I., Ogurtsov M., Ostryakov V., Pavlov A., Frolov D.* Solar System Collisions with Dense Interstellar Gas Clouds and Radiocarbon Traces of Periods with “Abnormally Low” Solar Modulation of Cosmic Rays // *Geomagnetism and Aeronomy.* — 2019. — т. 59, № 8. — с. 1075—1080.

2 Основное содержание работы

2.1 Космические лучи и космогенные изотопы

Галактические космические лучи являются самыми высокоэнергичными частицами во Вселенной. Представлены ядрами различных элементов, преимущественно Н и He, с энергиями от 10^2 до 10^{20} эВ, а их средний поток на орбите Земли составляет 1 частицу $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Распространение частиц галактических космических лучей внутрь от границы гелиосферы описывается сложными электродинамическими процессами, что приводит к модуляции их спектра. В частности, перенос ГКЛ в гелиосфере связан с взаимодействием частиц с магнитным полем, поэтому поток частиц модулируется магнитной активностью Солнца.

Решение задачи о распространении космических лучей в гелиосфере и их модуляции требует, в общем случае, построения сложной трёхмерной модели, однако её можно упростить для применения на длительных временных интервалах. Если сделать предположение об азимутальной симметрии (на временах больших периода вращения Солнца), а затем и сферической симметрии гелиосферы, можно найти решение в рамках приближения силового поля. В таком виде проблема рассмотрена в работе [16]. Дифференциальный спектр космических лучей сорта i с энергией E на расстоянии 1АЕ описывается следующей формулой [17] :

$$\frac{dJ_i}{dE} = J_{\text{LIS}}(E + \Phi) \frac{E(E + 2E_0)}{(E + \Phi)(E + \Phi + 2E_0)} \frac{\text{частиц}}{\text{см}^2 \text{с ср ГэВ}}, \quad (1)$$

где $\Phi = \frac{Ze}{A}\phi$, а ϕ - модуляционный потенциал в гигавольтах (ГВ). Уравнение (1) включает в себя J_{LIS} - дифференциальный спектр ГКЛ на границе гелиосферы и межзвездной среды. Существуют различные модельные и экспериментальные описания данного спектра. Мы в данной работе остановимся на использовании широко распространенной модели [17], обозначенной здесь как J_{US05} , и недавней компиляции теоретических и экспери-

ментальных результатов от авторов [18], которую обозначим за J_{ORL} .

Основные потери высокоэнергичной частицы в атмосфере приходятся на тормозное излучение, нагрев и ионизацию окружающего воздуха. Однако она может столкнуться с ядром, породив вторичные частицы, которые в свою очередь могут участвовать в дальнейших столкновениях и формировать вторичный каскад. Интенсивность каскада нарастает по мере увеличения толщи атмосферы, и в определенной точке достигает своего максимума, после чего резко падает. Высота максимума вообще зависит от энергии: к примеру для частиц с энергиями 0.1-1 ГэВ она варьируется в пределах 100-20 км. Основные космогенные изотопы, используемые для исследования долговременных вариаций потока космических лучей на Земле - это ^{14}C , ^{10}Be и ^{36}Cl . Из них наиболее изучены ^{14}C и ^{10}Be . На рис. 1 схематично изображены процессы их образования, переноса и депозита в архивы. Большая часть производства ^{14}C и ^{10}Be приходится на нижнюю стратосферу и верхнюю тропосферу, что соответствует высоте максимальной интенсивности вторичных частиц КЛ.

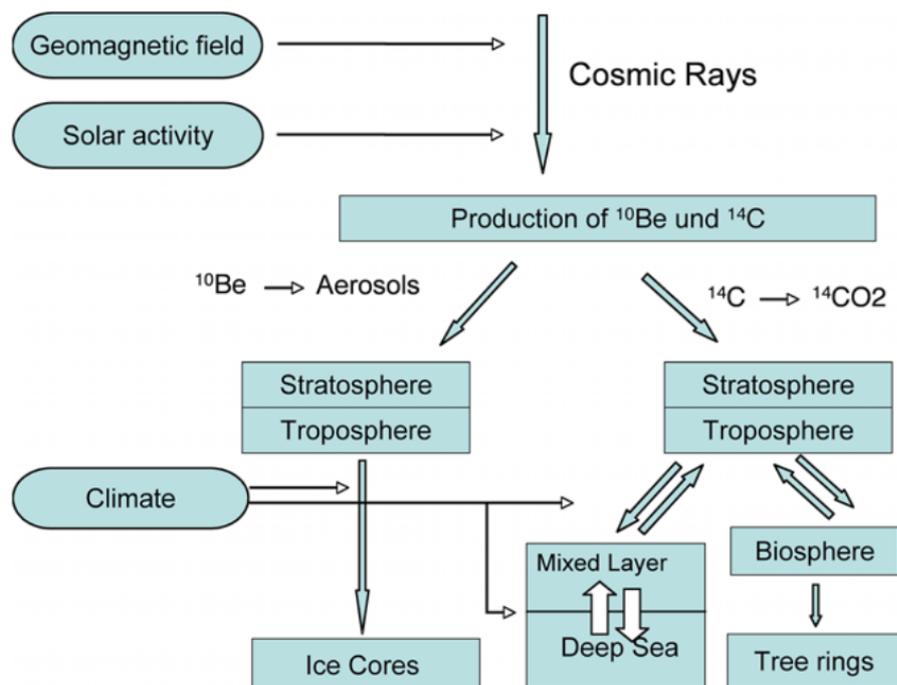


Рис. 1 — Производство, транспорт и захоронение ^{14}C и ^{10}Be [19]

Использование функции выхода на протон (Yield function) - стандартный подход для моделирования эффектов распространения высокоэнергичных частиц КЛ в веществе. Она определяется, как некая функция $Y_i(E, h)$ показывающая количество изотопа, произведенного на конкретной глубине h первичной частицей сорта i с кинетической энергией на нуклон E . Размерность $Y_i(E, h)$ - атомов на частицу с энергией E в единице толщи. Размерность $Y_i(E)$ - функции выхода в столбе - атомов на частицу с энергией E , она получается из функции $Y_i(E, h)$ интегрированием по h . Тогда скорость образования или количество произведенного изотопа (зависит от J - спектр или флюэнс), определяется следующим образом:

$$Q(h) = \pi \int_{E_{min}}^{E_{max}} J_i(E, \Phi) \times Y_i(E, h) dE \quad (2)$$

Для расчета Y используются различные модели взаимодействия заряженных частиц с веществом. Это стало возможным только с появлением достаточных вычислительных мощностей, поэтому активно развиваться данное направление начало лишь в конце 90-х - начале 2000-х [20]. Существуют различные реализации таких моделей. В работах [21; 22] для исследования влияния солнечной модуляции на атмосферное образование ^{10}Be и ^{36}Cl использовался пакет FLUKA, а в работах [3; 4] вычисления проводились с помощью разработанного в CERN пакета GEANT4 [5].

Используя восстановленную из земных архивов скорость образования $Q(h, t)$, согласно (2) можно решить обратную задачу, и определить значения модуляционного потенциала, считая поток J_{LIS} постоянным во времени. Такая работа была проделана авторами статьи [23] с использованием архивов ^{14}C , и восстановлена история модуляционного потенциала $\Phi(t)$ для последних 20000 лет.

2.2 Образование космогенных изотопов на Луне и калибровка расчетных программ

Рассмотрим теперь более подробно задачу расчёта образования КИ на Луне, и сравнения их с экспериментальными данными. Для начала, нам потребуется функция выхода на одну частицу. В пакете GEANT4 мы рассчитали функции выхода для ^{14}C и ^{26}Al от протонов и α -частиц. Расчёт образования проводился внутри слоя 1 г см^{-2} .

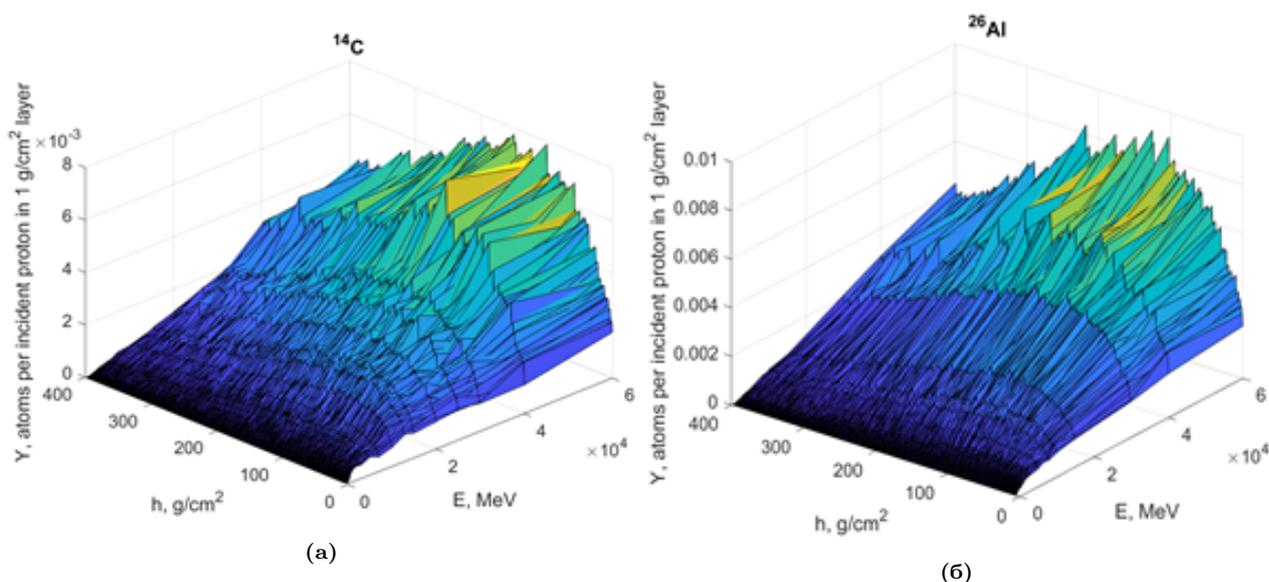


Рис. 2 — Функция выхода на одну частицу для протонов а) и α -частиц б)

Экспериментальные данные часто представлены в виде активности определенного изотопа в массе исследуемого вещества. Согласно (2) определяется скорость образования изотопа в веществе. Для определения активности понадобятся некоторые модельные соображения.

Можно предположить наличие равновесия, считая средние параметры потока ГКЛ усредненными на протяжении порядка пяти периодов полураспада исследуемого изотопа. В такой ситуации число образующихся атомов должно быть равно числу распадов, и активность $A(h)$ определяется сле-

дующим образом:

$$\begin{aligned}
 Q(h) &= \pi \int_{E_{minp}}^{E_{maxp}} J_p(E, \Phi) \times Y_p(E, h) dE + \dots \\
 &\quad + \pi \int_{E_{min\alpha}}^{E_{max\alpha}} J_\alpha(E, \Phi) \times Y_\alpha(E, h) dE \quad \frac{\text{атомов}}{\Gamma \text{ с}} \\
 A(h) &= 6 \cdot 10^4 \cdot Q(h) \frac{dpm}{\text{кг}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Используя (3) и экспериментальные данные об активности можно также решить обратную задачу: варьируя значение Φ аппроксимировать экспериментальные точки, и таким образом определить среднее значение модуляционного потенциала на временной шкале около 4-5 периодов полураспада радионуклида. В случае же наличия величины, меняющейся со временем, например, учёта изменения модуляционного потенциала $\Phi(t)$, вычисление активности необходимо скорректировать соответствующим образом. Тогда вычисление активности будет представлять собой свертку скорости образования с экспонентой радиоактивного распада:

$$\begin{aligned}
 Q(h, t) &= \pi \int_{E_{minp}}^{E_{maxp}} J_p(E, \Phi(t)) \times Y_p(E, h) dE + \dots \\
 &\quad + \pi \int_{E_{min\alpha}}^{E_{max\alpha}} J_\alpha(E, \Phi(t)) \times Y_\alpha(E, h) dE \quad \frac{\text{атомов}}{\Gamma \text{ с}} \\
 N(h) &= \int_{t=0}^{t=t_{fin}} Q(h, t) \times \exp\{-\lambda t\} dt \quad \text{атомов } \Gamma^{-1} \\
 A(h) &= 10^3 \cdot N(h) \cdot 60 \cdot \lambda(\text{с}^{-1}) \quad \frac{dpm}{\text{кг}}
 \end{aligned} \tag{4}$$

где λ - постоянная распада соответствующего изотопа, а $\Phi(t)$ обозначает модуляционный потенциал в момент времени t лет ДНВ.

Для вычисления профиля активности на Луне использовались следующие параметры в (4): пределы интегрирования 0.08-60 ГэВ для протонов, 0.05-40 ГэВ/нуклон для α -частиц; дифференциальный поток J_{LIS} для α -частиц составляет 10% от протонов при одинаковом значении энергии на

нуклон и $t_{fin}=20000$ лет. Результат расчёта активности по этому методу представлен на рис. 3. Легко видеть, что результат моделирования отличается от экспериментальных данных практически в два раза, несмотря на похожую форму профиля активности. Если предположить, что ошибка возникает в процессе расчета yield-function, можно оценить, что добавление к модели обычного линейного множителя $Y_0 \approx 0.6$, одинакового для всего диапазона энергий, позволяет хорошо описать данные активности ^{14}C в образце Аполлон-15.

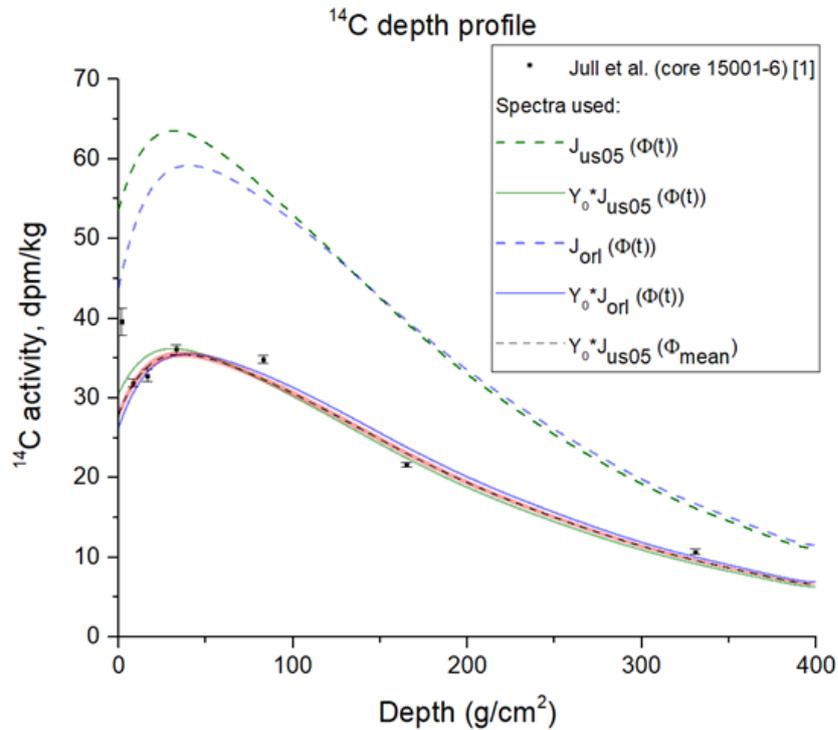


Рис. 3 — Профили активности ^{14}C в лунном грунте. Здесь $J(\Phi(t))$ обозначают профили, вычисленные с использованием реконструкции модуляционного потенциала, с различными моделями J_{LIS} и масштабными факторами Y_0 . $J(\Phi_{mean})$ обозначен профиль, рассчитанный путем аппроксимации методом минимизации χ^2 ; красным цветом отмечен доверительный интервал 68%.

Используя $\Phi(t)$, восстановленную по наземным данным ^{14}C , и метод расчёта активности, описанный в (4), были определены масштабные коэффициенты $Y_0(J_{ORL}) = 0.60 \pm 0.01$ и $Y_0(J_{US05}) = 0.57 \pm 0.01$, необходимые для согласования этого профиля с экспериментом.

Использовался также стандартный подход [3] аппроксимации экспе-

риментальных данных путём варьирования Φ (а $Y_0 = 1$). Аппроксимация проводилась методом минимизации χ^2 , а ошибки метода оценивались методом вариации χ^2 , как это описано в [3; 24]. Полученное для этого случая значение модуляционного потенциала $\Phi_{mean}(J_{US05}) = 930$ МВ предполагает очень высокий уровень солнечной активности в течение последних 20000 лет. При этом, если использовать полученные ранее значения $Y_0(J_{US05}) = 0.57$, то $\Phi_{mean}(J_{US05}) = 360 \pm 20$ МВ, что более соответствует современным оценкам солнечной активности. Отметим, что современная солнечная активность со средним значением $\Phi = 500 - 700$ МВ считается значительно повышенной. Глубинный профиль этой аппроксимации также представлен на Рисунке 2.

Другие авторы для лучшей аппроксимации экспериментальных данных изменяли процесс расчета, исправляя значения сечений некоторых реакций [2; 4], либо путем изменения времени облучения мишени. Так, авторы работы [3] постулируют время облучения ядра 1 млн лет, тогда как для ^{26}Al период полураспада составляет 700 тыс. лет. У данных вмешательства в процесс расчета не существует достойной теоретической основы. ^{14}C образуется в реакциях нейтронов и других вторичных частиц с различными элементами лунных горных пород. Уменьшение сечений на одну и ту же величину для разных реакций в широком диапазоне энергий маловероятно. Наиболее вероятное объяснение такого результата - неточный расчет каскада вторичных частиц. Несколько экспериментов показали, что разница модельных потоков вторичных частиц GEANT4 и реальных измеренных может достигать двух раз для разных мишеней. В статье [25] эта проблема была рассмотрена как раз для случая лунного реголита. Авторы этой работы также вводят масштабный коэффициент (обозначим тоже за Y_0) между потоками нейтронов предсказанными GEANT4, и измеренными в эксперименте с лунным нейтронным зондом Apollo 17. Отличия рассчитанного и измеренного потоков вторичных нейтронов варьируются

в пределах $Y_0 = 0.6 - 0.84$, и зависят от модели внутриядерного каскада. Таким образом, наши результаты для лунного реголита не противоречат успешным расчетам образования ^{14}C в атмосфере Земли с использованием того же инструментария GEANT4, а также согласуются со значениями Y_0 , полученными в вышеупомянутой работе.

Используя полученную калибровку для расчёта глубинных профилей радионуклида ^{26}Al , мы можем оценить среднее значение модуляционного потенциала на промежутке последних 3 млн лет. Результат представлен на рис. 4. В работе [3] была проведена аналогичная оценка, однако авторы говорят о времени облучения образца всего 1 млн лет, что фактически эквивалентно уменьшению полученной активности на фактор 0.63 (т.е. т), по сравнению с корректно проинтегрированной за 3 млн. лет активностью ^{26}Al . Для иллюстрации, результат работы этих авторов также приведен на рис. 4. Полученная оценка на среднюю величину модуляционного потенциала составила $\Phi_{mean}(J_{US05}) = (480 \pm 50) \text{ MB}$.

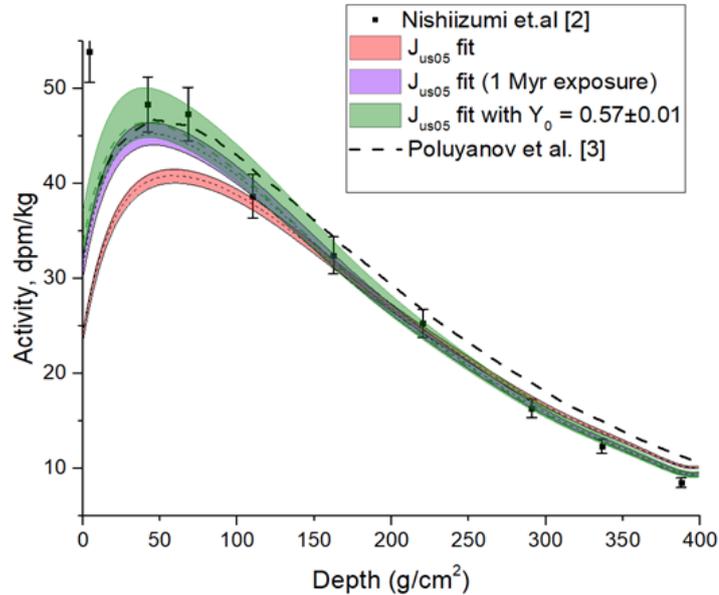


Рис. 4 — Рассчитанные профили активности ^{26}Al в лунном грунте. Цветными полосами отмечен доверительный интервал 68%.

Итого, предложена простая калибровочная процедура, которая в том числе имеет в основе соображения о некорректном расчете потока вторич-

ных частиц, подкрепленное другими исследованиями [25]. Показано, что использование данной калибровочной процедуры позволяет корректно описать экспериментальные профили активности ^{14}C и ^{26}Al .

2.3 Аномальные сигналы в архивах космогенных изотопов как результат взаимодействия гелиосферы с неоднородностями межзвездной среды.

В отличие от Луны, которая по сути является интегральным детектором КЛ, земные архивы радионуклидов позволяют оценивать влияние астрофизических факторов на Землю в прошлом. Существуют различные измерения радионуклидов на достаточно больших временных шкалах. Так, были обнаружено несколько коротких (длительностью десятки лет) периодов вариации $\Delta^{14}\text{C}$ (датируемых 5480, 813 и 660 гг д.н.э.), характеризующихся быстрым фронтом нарастания (5-6 лет) и амплитудой 1-2% [8; 10; 26]. Временные характеристики этих событий отличаются от известных периодов сниженной активности Солнца (минимум Маундера), время нарастания для которых составляет порядка 50 лет. В то же время, они отличаются от импульсных событий 775 и 993 г.н.э. (фронт нарастания 1-2 года), которые связывают с сверхмощными солнечными вспышками [7]. Несмотря на это различие, данные события пытаются также объяснить солнечными вспышками, причем не одиночными, а сериями слабо разнесенных во времени достаточно мощных вспышек [7; 9; 11].

Альтернативная гипотеза, выдвигаемая в рамках данной работы, заключается в связи увеличения скорости образования радионуклидов с взаимодействием гелиосферы с плотным межзвездным облаком [27]. Такие облака, имеющие размеры порядка 10-1000 а. е. и плотности в диапазоне $10-1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ могут встречаться на пути Солнечной системы [28–31]. Движение сквозь такое облако со скоростью 30 km s^{-1} соответствует времени взаимодействия от нескольких лет, до нескольких сотен лет. Во время тако-

го взаимодействия солнечная модуляция ГКЛ будет подавлена, поскольку гелиосфера при таких условиях должна испытывать значительное сжатие, причем вплоть до полного исчезновения [32; 33]. Вследствие этого земная атмосфера будет подвержена влиянию ГКЛ без модуляции, т.е. по сути J_{LIS} спектра. Возрастание концентрации ^{14}C также сопровождается аналогичным эффектом для ^{10}Be и ^{36}Cl . Тот факт, что эти изотопы образуются преимущественно в разных энергетических каналах (см. напр. [22]) позволяет составить изотопный след - совокупность отношений сигналов от одного события в различных изотопах. С помощью изотопного следа можно оценить жесткость спектра, а также провести проверку различных модельных вычислений. Действительно, если по результатам расчетов удастся повторить сигнал в одном из изотопов, но не удастся повторить изотопный след, то такое объяснение исследуемого события маловероятно. Влияние межзвездной среды на поток ГКЛ также рассматривается в статье [13] в контексте экзопланет. Общая идея, тем не менее, полностью соответствует нашим соображениям о значительных вариациях потока ГКЛ в зависимости от плотности межзвездного газа.

На рис. 5 можно увидеть, что все три рассматриваемых события демонстрируют похожее поведение во времени. Попытки объяснить событие 660 г.н.э. с помощью серий сверхмощных солнечных вспышек в таком контексте выглядят маловероятными, т.к. такая серия должна была повториться как минимум несколько раз, в разные периоды времени, и обладать при этом одинаковыми характеристиками. В рамках же нашей гипотезы, такое поведение $\delta^{14}\text{C}$ достаточно естественно, и не требует статистически маловероятных предположений. Основные положения гипотезы таковы:

1. Время нарастания $\delta^{14}\text{C}$ во всех трех событиях определяется движением Солнечной системы сквозь межзвездный газ, а также временем обмена стратосферы и тропосферы (2-3 года).

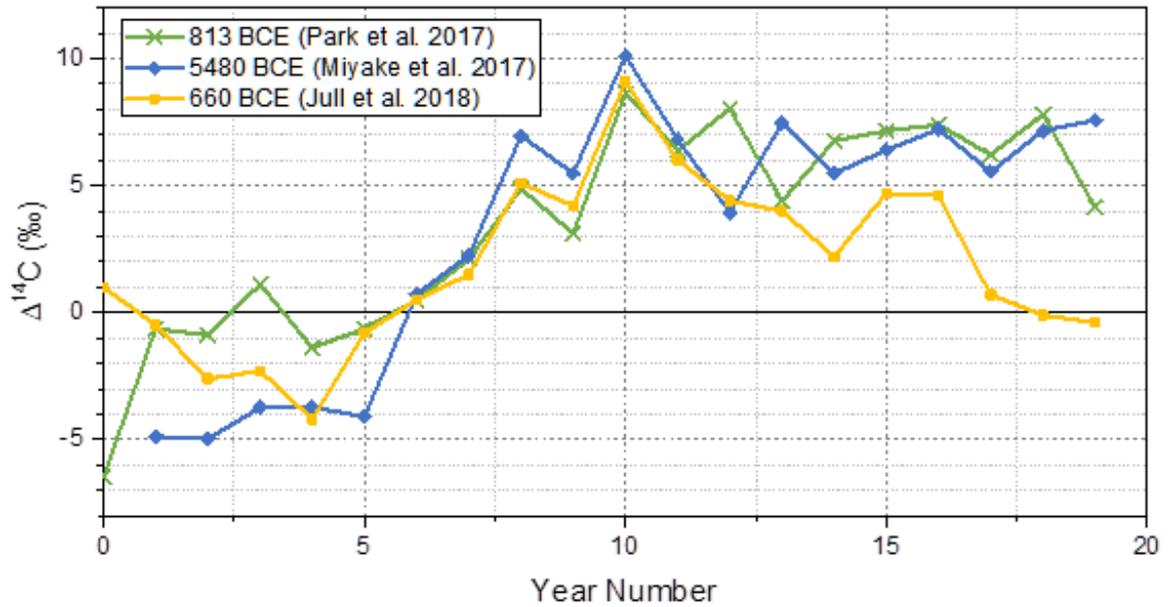


Рис. 5 — Временной ход $\delta^{14}\text{C}$ для событий 5480, 813 и 660 гг. д.н.э. События 660 и 5480 приведены к уровню 813 года путем сдвига на постоянную величину -7‰ и -97.5‰ соответственно.

2. Амплитуда события зависит от уровня сжатия гелиосферы. На момент полного исчезновения амплитуда ограничивается только свойствами ГКЛ в межзвездной среде (J_{LIS}). По результатам проведенных вычислений [27; 34] скорость образования ^{14}C во время таких событий может достигать $2\text{--}3.3$ атомов/ $\text{cm}^2\text{с}$ для события 5480, и $2\text{--}2.8$ атомов/ $\text{cm}^2\text{с}$ для события 660, в зависимости от использованной модели J_{LIS} (при экспериментальных значениях скорости образования 3.2 ± 1 и 2.7 ± 1 атомов/ $\text{cm}^2\text{с}$ соответственно).
3. Длительность события определяется размером облака и характерными временами резервуаров углерода.

Данная гипотеза также находит подтверждение в результатах исследования [11], в котором событие 660 года рассматривается с точки зрения двух моделей - однократного длительного повышения скорости образования ^{14}C , или серии из нескольких импульсов. Для модели однократного воздействия приводятся следующие параметры явления: скорость образо-

вания повышается до 2.2 атомов/см²с на период 24 месяца. Такая скорость образования ¹⁴С попадает в диапазон наших оценок образования от немодулированного спектра ГКЛ. Тем не менее, авторы эту версию отвергают, хотя такое поведение как раз соответствует предложенной нами модели.

Касательно изотопного следа подобных событий, подходящие измерения в настоящее время имеются только для события 660. На основе экспериментальных результатов [9] можно сравнить гипотезы о солнечной и галактической природе данного события. Согласно измеренным значениям концентрации изотопов, изотопное отношение $\frac{^{10}\text{Be}}{^{36}\text{Cl}} \approx 5 - 6$. С использованием двух различные моделей выпадения ¹⁰Be из атмосферы: модель атмосферной циркуляции [35] и локального выпадения [36], нами получены значения этого изотопного отношения для облучения земной атмосферы спектром J_{LIS} также в диапазоне 5-6. Между тем, расчёт изотопного отношения для трех известных мощнейших солнечных вспышек - 1956, 1972 и 2005 года, отличающихся в т.ч. формой спектра, показывает изотопное отношение $\frac{^{10}\text{Be}}{^{36}\text{Cl}} \leq 1.24$. Таким образом, гипотеза о солнечной природе данного сигнала, по нашему мнению, должна быть подвергнута сомнению.

2.4 Влияние космического излучения на Европе на гипотетические живые организмы.

Считается, что на спутнике Юпитера, Европе, существует подледный океан, который мог бы быть потенциальной средой обитания живых организмов [37]. Недавно были опубликованы астробиологические исследования, касающиеся факторов окружающей среды и потенциальных мест обитания [38], в которых предлагаются экспериментальные стратегии отбора проб и результатов [39; 40]. Космическая радиация на Европе оказывает более заметное влияние на поверхность, нежели на Земле. Европа лишена атмосферы и собственной магнитосферы, поэтому подвержена влиянию ГКЛ и других источников заряженных частиц. Тем не менее, в случае Ев-

ропы основной эффект оказывают не ГКЛ, а частицы, захваченные магнитосферой Юпитера [41; 42]. Поскольку в этом случае высокая радиация и низкая температура считаются лимитирующими факторами биологической активности, ограничивая, таким образом, возможные среды обитания нижней частью ледникового щита, морским дном и океаном [38], представляется важным изучить влияние этих факторов на живые организмы. Наблюдения телескопа Хаббл (HST) предоставляют возможные доказательства того, что на Европе водяные гейзеры извергаются из океана в космос, и постоянно обновляют ледяную поверхность Европы [14; 15]. Если исходить из того, что океан пригоден для жизни, в этом случае гипотетические микроорганизмы могут быть выброшены из океана и заморожены в поверхностном слое льда во время такого извержения. Эти потенциальные формы жизни могут оставаться в спящем состоянии в течение неопределенного продолжительного периода времени при очень низкой температуре в поверхностном слое льда. Жизнеспособность микроорганизмов после миллионов лет криоконсервации сама по себе не представляет проблемы, поскольку живые клетки можно обнаружить в древних слоях вечной мерзлоты, которые не тают в течение нескольких миллионов лет (например, [43; 44]). Однако, из-за того, что орбита Европы находится в радиационном поясе Юпитера, поверхность спутника подвержена высоким дозам радиации [41]. Этого излучения достаточно для стерилизации поверхностного слоя льда, однако результаты нашего моделирования показывают, что этот эффект резко уменьшается с глубиной, в основном в результате высокоэффективных потерь энергии электронов и ионов в диапазоне энергий МэВ в первых сантиметрах льда. Для определения предельного времени облучения в экспериментальной части работы было проведено облучение (ускоренными электронами) бактерий *Deinococcus radiodurans*. Бактерии находились в специально подготовленных образцах, моделирующих химический состав льда Европы, в условиях низкой температуры и давления. Подробнее экс-

перимент описан в [45]. Ограничимся приведением на рис. 6 результатов исследования выживаемости бактерий: после облучения дозами в 5, 15 и 50 кГр число культивируемых клеток из образцов снизилось на 2,3 и 6 порядков соответственно а после облучения дозой 100 кГр жизнеспособных клеток обнаружено не было. Таким образом была определена критическая доза 50 кГр.

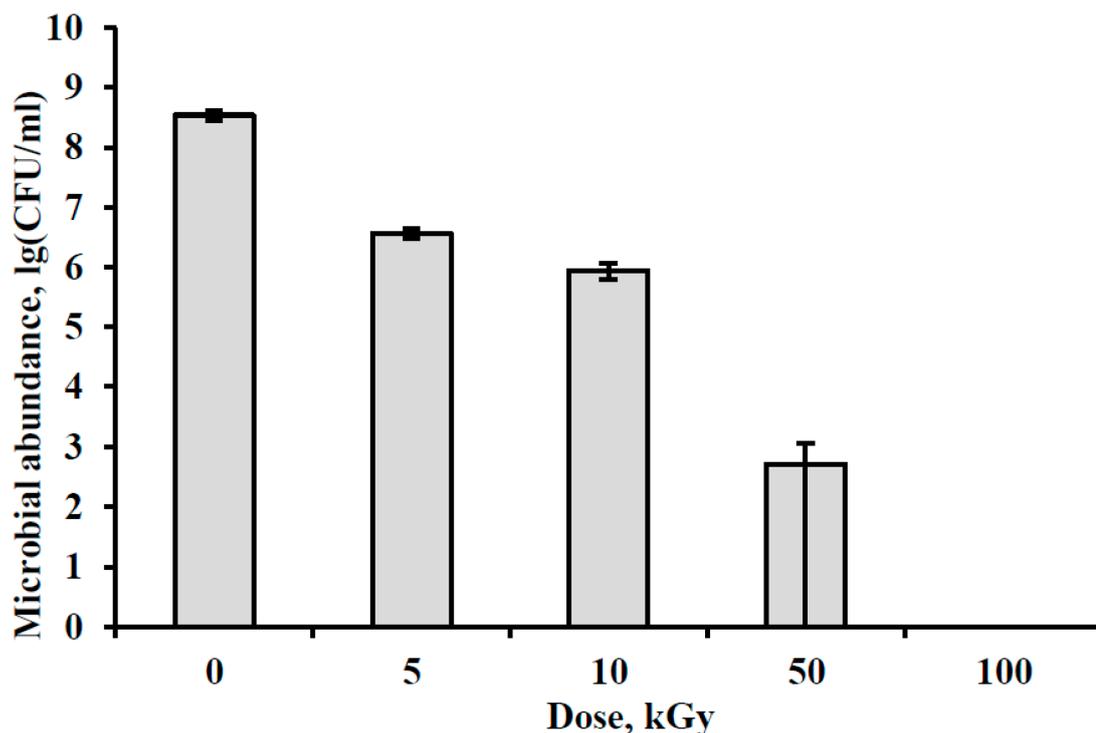
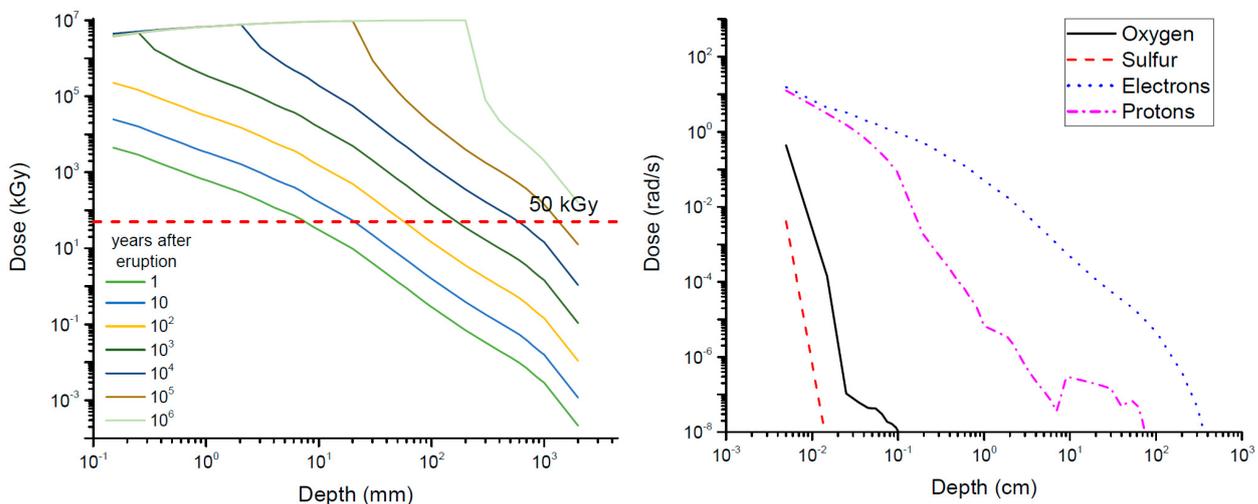


Рис. 6 — Временной ход $\delta^{14}\text{C}$ для событий 5480,813 и 660 гг д.н.э. События 660 и 5480 приведены к уровню 813 года путем сдвига на постоянную величину -7‰ и -97.5‰ соответственно.

Для численного моделирования накопления ионизационной дозы во льду, аналогично функции выхода изотопа на один протон, с помощью GEANT4 была получена функция энерговыделения в слое льда на одну упавшую на поверхность частицу. Толщина каждого слоя принималась равной 0.1 мм, его поперечное сечение 1 см^2 . Расчет по глубине проводился в диапазоне 0.05-5000 мм. Такие профили поглощенной энергии были рассчитаны для падающих на поверхность электронов, протонов, ионов кислорода и серы. Дифференциальные энергетические спектры этих частиц на Европе приведены в работе [41]. Тогда для вычисления полной погло-

щенной дозы по глубине, необходимо численно проинтегрировать спектр и функцию выхода, аналогично (2) для всех сортов частиц, получив таким образом профиль скорости набора дозы. Также применялась простая модель обновления поверхности льда. Оценки скорости прироста поверхности приведена в [46] и составляет порядка 12 м за 100 млн лет. По истечении определенного количества шагов интегрирования на поверхность добавлялся новый слой, моделирующий таким образом прирост поверхности. Для моделирования же первоначального выброса поверх облученных слоев льда создавался новый, чистый слой льда, в котором затем, также с учетом обновления поверхности, вычислялась накопленная доза.



(а) Зависимость поглощенной дозы от глубины и времени (б) Скорость набора дозы для различных компонент радиационного излучения на Европе, с учетом обновления поверхности.

Рис. 7

Полученные профили скорости набора дозы для различных компонент космического излучения на Европе приведены на рис. 7б. Результаты данных вычислений на глубинах меньше 10 см совпадают с результатами работы [41], однако на больших глубинах наши расчёты предсказывают большие значения. Это может быть следствием использования более современных моделей внутриядерного каскада в нашей работе. На рис. 7а представлены результаты вычисления поглощенной дозы в зависимости от глубины и с учетом обновления поверхности. Постоянная скорость обнов-

ления поверхности создаёт некий равновесный уровень накопленной дозы, величиной 1×10^{10} Гр. На самом деле такого эффекта может и не наблюдаться, однако это не имеет существенного значения в контексте данной работы, так как это равновесное значение значительно выше летальной дозы. Также можно видеть, что в первом сантиметре льда летальная доза накапливается уже в течение одного года. Однако, на глубинах 0.1-1 м набор летальной дозы может занимать от 1 до 10 тыс. лет после осадения. На глубине 0.01-0.1 м накопление летальной дозы занимает до 100 лет. Таким образом, можно предположить что существует вероятность обнаружить жизнеспособные клетки на глубине 0.1-1 м в течение 1000-10000 лет после извержения. Как уже было сказано выше, такие извержения наблюдались, и на основе этих наблюдений возможно выбрать место посадки для спускаемых аппаратов. Выбросы, обнаруженные авторами [14; 15], находились практически в одном и том же месте планеты, и разделены всего лишь 2 годами. Таким образом, места этих извержений вполне могут представлять интерес для поиска жизни и биомаркеров на Европе.

3 Заключение

В ходе данной работы были изучены различные аспекты эффектов взаимодействия космического излучения с земной атмосферой, поверхностью Луны, а также поверхностью Европы. В то время, как измерение земных и лунных архивов позволяет оценить величину потока космического излучения на Земле на различных этапах существования жизни, предсказание эффектов взаимодействия КЛ с поверхностью Европы является одной из ключевых задач в контексте поиска живых организмов и биомаркеров в Солнечной системе.

Предложена калибровочная процедура, с помощью которой можно учесть ошибки расчета каскада вторичных частиц. С помощью предложен-

ной процедуры калибровки расчётных программ удалось оценить средние параметры потока космических лучей за последние 3 млн. лет. Полученное значение модуляционного параметра (480 ± 50) МВ ниже современных (660 ± 50) МВ, что укрепляет современные представления о повышенной активности Солнца в Голоцене.

Также рассмотрена гипотеза о влиянии взаимодействия гелиосферы с межзвездной средой на поток ГКЛ на Земле. Предсказан изотопный след такого события, оценен диапазон скорости образования ^{14}C , который бы соответствовал подобному событию. На примере события 660 года д.н.э. показано, что солнечное происхождение такого события должно быть поставлено под сомнение, и приведены аргументы в пользу объяснения подобных событий посредством взаимодействиями с малыми облаками межзвездного газа.

Наконец, в контексте изучения объектов Солнечной системы, изучено влияние заряженных частиц магнитосферы Юпитера на возможность обнаружения живых бактерий, которые могли бы попасть на поверхность спутника вследствие недавно обнаруженного криовулканизма. Определенная в ходе экспериментальных исследований летальная доза излучения позволила вписать численной моделирование накопленной дозы в контекст данной задачи, и оценить потенциальные ограничения на место и глубину отбора проб с поверхности Европы.

Список литературы

1. *Nishiizumi K., Klein J., Middleton R., Arnold J. R.* 26Al depth profile in Apollo 15 drill core // *Earth and Planetary Science Letters*. — 1984. — т. 70, № 2. — с. 164—168.
2. *Reedy R. C., Arnold J. R.* Interaction of solar and galactic cosmic-ray particles with the Moon // *Journal of Geophysical Research*. — 1972. — т. 77, № 4. — с. 537—555.
3. *Poluianov S., Kovaltsov G. A., Usoskin I. G.* Solar energetic particles and galactic cosmic rays over millions of years as inferred from data on cosmogenic 26Al in lunar samples // *Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — т. 618. — с. 1—9.
4. *Li Y., Zhang X., Dong W., Ren Z., Dong T., Xu A.* Simulation of the production rates of cosmogenic nuclides on the Moon based on Geant4 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2017. — т. 122, № 2. — с. 1473—1486.
5. *Allison J.* [и др.]. Geant4 developments and applications // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. — 2006. — т. 53, № 1. — с. 270—278.
6. *Miyake F., Nagaya K., Masuda K., Nakamura T.* A signature of cosmic-ray increase in AD 774–775 from tree rings in Japan // *Nature*. — 2012. — т. 486, № 7402. — с. 240—242.
7. *Mekhaldi F.* [и др.]. Multiradionuclide evidence for the solar origin of the cosmic-ray events of 774/5 and 993/4 // *Nature Communications*. — 2015. — т. 6. — с. 8611.
8. *Park J., Southon J., Fahrni S., Creasman P. P., Mewaldt R.* Relationship between solar activity and $\Delta^{14}\text{C}$ peaks in AD 775, AD 994, and 660 BC // *Radiocarbon*. — 2017. — т. 59, № 4. — с. 1147—1156.

9. *O'Hare P.* [и др.]. Multiradionuclide evidence for an extreme solar proton event around 2,610 B.P. (660 BC) // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. — 2019. — т. 116, № 13. — с. 5961—5966.
10. *Jull A. J.* [и др.]. More rapid ^{14}C excursions in the tree-ring record: A record of different kind of solar activity at about 800 BC? // Radiocarbon. — 2018. — т. 60, № 4. — с. 1237—1248.
11. *Sakurai H., Tokanai F., Miyake F., Horiuchi K., Masuda K., Miyahara H., Ohyama M., Sakamoto M., Mitsutani T., Moriya T.* Prolonged production of ^{14}C during the ~660 BCE solar proton event from Japanese tree rings // Scientific Reports. — 2020. — т. 10, № 1. — с. 660.
12. *Pavlov A. K., Blinov A. V., Konstantinov A. N., Ostryakov V. M., Vasilyev G. I., Vdovina M. A., Volkov P. A.* AD 775 pulse of cosmogenic radionuclides production as imprint of a Galactic gamma-ray burst // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2013. — т. 435, № 4. — с. 2878—2884.
13. *Jasinski J. M., Nordheim T. A., Hasegawa Y., Murphy N.* The Importance of Local Interstellar Conditions on the Galactic Cosmic-Ray Spectrum at Exoplanets // The Astrophysical Journal. — 2020. — т. 899, № 1. — с. L18.
14. *Sparks W. B., Hand K. P., McGrath M. A., Bergeron E., Cracraft M., Deustua S. E.* Probing for Evidence of Plumes on Europa With Hst /Stis // The Astrophysical Journal. — 2016. — т. 829, № 2. — с. 121.
15. *Sparks W. B., Schmidt B. E., McGrath M. A., Hand K. P., Spencer J. R., Cracraft M., Deustua S. E.* Active Cryovolcanism on Europa? // The Astrophysical Journal. — 2017. — т. 839, № 2. — с. L18.
16. *Gleeson L. J., Axford W. I.* Solar Modulation of Galactic Cosmic Rays // The Astrophysical Journal. — 1968. — т. 154, № 1. — с. 1011.

17. *Usoskin I. G., Alanko-Huotari K., Kovaltsov G. A., Mursula K.* Heliospheric modulation of cosmic rays: Monthly reconstruction for 1951–2004 // *Journal of Geophysical Research*. — 2005. — т. 110, A12. — A12108.
18. *Orlando E.* Imprints of cosmic rays in multifrequency observations of the interstellar emission // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — т. 475, № 2. — с. 2724–2742.
19. *Abreu J. A., Beer J., Steinhilber F., Christl M., Kubik P. W.* 10 Be in ice cores and 14 C in tree rings: separation of production and climate effects // *Space Science Reviews*. — 2013. — т. 176, № 1–4. — с. 343–349.
20. *Beer J., McCracken K., Steiger R. von.* *Cosmogenic Radionuclides*. т. 44. — Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012. — с. 085201. — (Physics of Earth and Space Environments ; 8).
21. *Webber W. R., Higbie P. R.* Production of cosmogenic Be nuclei in the Earth’s atmosphere by cosmic rays: Its dependence on solar modulation and the interstellar cosmic ray spectrum // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2003. — т. 108, A9. — с. 1–11.
22. *Webber W. R., Higbie P. R., McCracken K. G.* Production of the cosmogenic isotopes ^3H , ^7Be , ^{10}Be , and ^{36}Cl in the Earth’s atmosphere by solar and galactic cosmic rays // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2007. — т. 112, № 10. — с. 1–7.
23. *Kudryavtsev I. V., Dergachev V. A.* Reconstruction of Heliospheric Modulation Potential Based on Radiocarbon Data in the Time Interval 17 000–5000 Years BC // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2019. — т. 59, № 8. — с. 1099–1102.
24. *Andrae R.* Error estimation in astronomy: A guide // arXiv:1009.2755 [astro-ph.IM]. — 2010. — с. 1–23.

25. *Mesick K. E., Feldman W. C., Coupland D. D., Stonehill L. C.* Benchmarking Geant4 for Simulating Galactic Cosmic Ray Interactions Within Planetary Bodies // *Earth and Space Science*. — 2018. — т. 5, № 7. — с. 324—338.
26. *Miyake F., Jull A. J., Panyushkina I. P., Wacker L., Salzer M., Baisan C. H., Lange T., Cruz R., Masuda K., Nakamura T.* Large ^{14}C excursion in 5480 BC indicates an abnormal sun in the mid-Holocene // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. — 2017. — т. 114, № 5. — с. 881—884.
27. *Pavlov A. K., Frolov D., Konstantinov A., Koudriavtsev I., Ogurtsov M., Ostryakov V., Vasilyev G.* On the radiocarbon increase around 5480 BC as a result of the Solar system encounter with interstellar cloud // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — т. 485, № 3. — с. 4441—4445.
28. *Frail D. A., Weisberg J. M., Cordes J. M., Mathers C.* Probing the interstellar medium with pulsars on AU scales // *The Astrophysical Journal*. — 1994. — т. 436. — с. 144.
29. *Watson J. K., Meyer D. M.* Observations of Ubiquitous Small-Scale Structure in the Diffuse Interstellar Medium // *The Astrophysical Journal*. — 1996. — т. 473, № 2. — с. L127—L130.
30. *Lauroesch J. T., Meyer D. M., Watson J. K., Blades J. C.* The Physical Characteristics of the Small-Scale Interstellar Structure toward μ Crucis // *The Astrophysical Journal*. — 1998. — т. 507, № 1. — с. L89—L92.
31. *Meyer D. M., Blades J. C.* Small-Scale Interstellar Medium Structure: The Remarkable Sight Line toward μ Crucis // *The Astrophysical Journal*. — 1996. — т. 464, № 2. — с. L179—L182.

32. *Zank G. P., Frisch P. C.* Consequences of a Change in the Galactic Environment of the Sun // *The Astrophysical Journal*. — 1999. — т. 518, № 2. — с. 965—973.
33. *Talbot R. J. J., Newman M. J.* Encounters between stars and dense interstellar clouds // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 1977. — т. 34. — с. 295.
34. *Pavlov A., Blinov A., Frolov D., Konstantinov A., Koudriavtsev I., Ogurtsov M., Ostryakov V., Vasilyev G.* Isotopic imprint of the Solar system encounter with interstellar gas cloud around 660 BC (2610 BP) // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2019. — т. 1400, № 2. — с. 022034.
35. *Heikkilä U., Beer J., Feichter J.* Meridional transport and deposition of atmospheric ^{10}Be // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2009. — т. 9, № 2. — с. 515—527.
36. *Pavlov A. K., Blinov A. V., Frolov D. A., Konstantinov A. N., Ostryakov V. M., Vasilyev G. I.* Spatial distribution of the atmospheric radionuclide production by galactic cosmic rays and its imprint in natural archives // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2017. — т. 164, March. — с. 308—313.
37. *Chyba C. F.* Energy for microbial life on Europa // *Nature*. — 2000. — т. 403, № 6768. — с. 381—382.
38. *Marion G. M., Fritsen C. H., Eicken H., Payne M. C.* The search for life on Europa: Limiting environmental factors, potential habitats, and earth analogues // *Astrobiology*. — 2003. — т. 3, № 4. — с. 785—811.
39. *Judge P.* A Novel Strategy to Seek Biosignatures at Enceladus and Europa // *Astrobiology*. — 2017. — т. 17, № 9. — с. 852—861.

40. *Nadeau J., Lindensmith C., Deming J. W., Fernandez V. I., Stocker R.* Microbial Morphology and Motility as Biosignatures for Outer Planet Missions // *Astrobiology*. — 2016. — т. 16, № 10. — с. 755—774.
41. *Paranicas C., Cooper J. F., Garrett H. B., Johnson R. E., Sturmer S. J.* Europa's Radiation Environment and Its Effects on the Surface // *Europa*. — 2017. — с. 529—544.
42. *Nordheim T. A., Jasinski J. M., Hand K. P.* Galactic Cosmic-Ray Bombardment of Europa's Surface // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — т. 881, № 2. — с. L29.
43. *Gilichinsky D. A., Vorobyova E. A., Erokhina L. G., Fyodorov-Dayvdov D. G., Chaikovskaya N. R.* Long-term preservation of microbial ecosystems in permafrost // *Advances in Space Research*. — 1992. — т. 12, № 4. — с. 255—263.
44. *Gilichinsky D. A.* Permafrost as a microbial habitat: extreme for the Earth, favorable in Space // *Instruments, Methods, and Missions for the Investigation of Extraterrestrial Microorganisms*. т. 3111. — International Society for Optics, Photonics. 1997. — с. 472—480.
45. *Pavlov A., Cheptsov V., Tsurkov D., Lomasov V., Frolov D., Vasiliev G.* Survival of radioresistant bacteria on Europa's surface after pulse ejection of subsurface ocean water // *Geosciences (Switzerland)*. — 2019. — т. 9, № 1.
46. *Ip W.-H., Williams D. J., McEntire R. W., Mauk B. H.* Ion sputtering and surface erosion at Europa ion production rate is on the order // *Geophysical Research Letters*. — 1998. — т. 25, № 6. — с. 829—832.