

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ И ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

**«МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ЛЕТУЧИХ СОЕДИНЕНИЙ
НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ И МЕРКУРИЯ»**

Выполнил студент
632 группы:
Попов Павел Владимирович

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Феоктистова Екатерина Анатольевна

Москва
2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1 МОДЕЛЬ	6
1.1 Начальное распределение частиц	6
1.2 Расчет температуры поверхности	7
1.3 Миграция частиц	9
1.4 Время жизни частиц	10
1.5 Потери частиц	11
1.6 Карта кратеров	12
2 РЕЗУЛЬТАТЫ	13
2.1 Суточная динамика	13
2.2 Итоговое распределение частиц	15
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	18
ЛИТЕРАТУРА	18

ВВЕДЕНИЕ

Атмосфера Луны и Меркурия разрежена и вся является экзосферой. Давление на поверхности составляет порядка 10 нПа для Луны и 200 нПа для Меркурия [1, 2]. Имеющихся магнитного поля и гравитации недостаточно для сохранения атмосферных газов от диссипации и поддержания высокой плотности атмосферы. В таких условиях атомы и молекулы чаще сталкиваются с поверхностью планеты, чем друг с другом.

В ряде научных работ середины XX века [3, 4] было выдвинуто предположение о существовании отложений водяного льда и других летучих соединений в полярных областях Луны и Меркурия. Частицы соединений могут захватываться “холодными ловушками” – постоянно затененными областями с очень низкой температурой поверхности. Существование таких областей связано с малым углом наклона плоскости экватора исследуемых небесных тел к плоскости эклиптики ($\sim 1.54^\circ$ для Луны и $\sim 0.01^\circ$ для Меркурия) и с формой рельефа в полярных областях, покрытых ударными кратерами. Эндогенными источниками летучих соединений могут являться дегазация недр и активный вулканизм [5–7], а экзогенными – падения метеоритов и астероидов на поверхность, столкновение с поверхностью комет [8–11], а также солнечный ветер [12, 13]. Образовавшиеся в результате упомянутых выше процессов летучие соединения могут накапливаться в “холодных ловушках” и оставаться там в течение миллиардов лет.

Для Луны эти предположения были подтверждены результатами радарного эксперимента космического аппарата Clementine, проведенного в 1994 году. Было обнаружено, что некоторые области в полярных районах имеют отражательные свойства, близкие к свойствам водяного льда [14].

В 1998 году нейтронный спектрометр, установленный на борту зонда Lunar Prospector, зафиксировал в обоих полярных районах Луны понижение потока надтепловых нейтронов. Данное явление исследователи связали с повышенным содержанием водорода в грунте полярных областей [15, 16], что могло служить косвенным подтверждением присутствия в этих областях отложений водяного льда. Расположение областей с повышенным содержа-

нием водорода совпадало с расположением ударных кратеров на Луне, что также подтверждало предположение о том, что наблюдаемые свойства данных областей обусловлены присутствием в них отложений летучих соединений.

Прямые доказательства существования отложений летучих соединений в полярных областях Луны были получены в 2009 году в результате падения зонда LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) в постоянно затененную часть кратера Кабео (85.5°S , 45°W , диаметр - 100.5 км) в районе южного полюса Луны. В облаке ударного выброса были найдены следы большого ряда веществ (не только водяного льда): H_2O , CO , H_2 [17], H_2O , H_2S , NH_3 , SO_2 , CO_2 , CH_4 , OH [18] и других соединений [19].

Данные нейтронного спектрометра LEND (Lunar Exploration Neutron Detector), работающего на борту зонда LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter), также подтвердили существование в полярных районах Луны областей, характеризующихся пониженным потоком надтепловых нейтронов. При анализе полученных данных было обнаружено, что такие области соответствуют не только постоянно затененным, но и освещаемым Солнцем участкам поверхности, где температуры были слишком высоки для того, чтобы отложения летучих соединений могли существовать на поверхности в течение длительного (млрд. лет и более) периода времени [20, 21]. Как было показано в работах [22, 23], такое несоответствие может быть объяснено присутствием на поверхности отложений слоя реголита, изолирующего их от колебаний температуры на поверхности.

У Меркурия области с аномальными радиоотражательными свойствами изначально были обнаружены в полярных районах в ходе наземных исследований этих районов радиотелескопами обсерваторий Аресибо и Голдстоун в 1991-1992 гг. [24, 25]. Позднее наблюдения были продолжены [26, 27] и число открытых областей с аномальными отражательными свойствами в районе южного полюса Меркурия значительно увеличилось [28]. Как и предполагалось, такие области были обнаружены в естественных понижениях рельефа.

Данные космического зонда MESSENGER (MErcury Surface, Space Environment, GEochemistry and Ranging), работавшего на орбите Меркурия 8 лет (2008-2015 гг.), подтвердили присутствие областей с повышенными от-

ражательными свойствами в кратерах, расположенных в полярных районах планеты [29]. Нейтронный спектрометр зонда также зафиксировал повышенное содержание водорода в этих областях [30].

Частицы могут попадать в полярные области различными способами. Одним из механизмов доставки являются сильные удары сторонних небесных тел о поверхность, создающие выбросы частиц, которые образуют временную атмосферу и впоследствии могут конденсироваться вблизи полюсов. Этот механизм был описан исследован в ряде работ [11, 31], и не рассматривается в настоящей работе.

Другим механизмом является баллистическая миграция молекул на поверхности планеты [3, 4, 12, 32]. Настоящая работа посвящена созданию программного комплекса для моделирования данного процесса. Исследователи ставят перед собой задачи получения численных результатов по оценке доли отложений летучих соединений в постоянно затененных областях Луны и Меркурия, а также изучения динамики концентрации частиц в процессе миграции на поверхности для различных химических веществ в рамках выбранной модели.

ГЛАВА 1.

МОДЕЛЬ

К настоящему времени существует множество работ, посвященных моделированию миграции летучих соединений на поверхности безатмосферных небесных тел [12, 31–33]. Особенностью данной работы является выбор алгоритма последовательного расчета протекающих на поверхности и в экзосфере процессов с учетом их длительности с фиксированным шагом по времени. Такой подход позволяет построить реальную временную шкалу и отслеживать эволюцию системы.

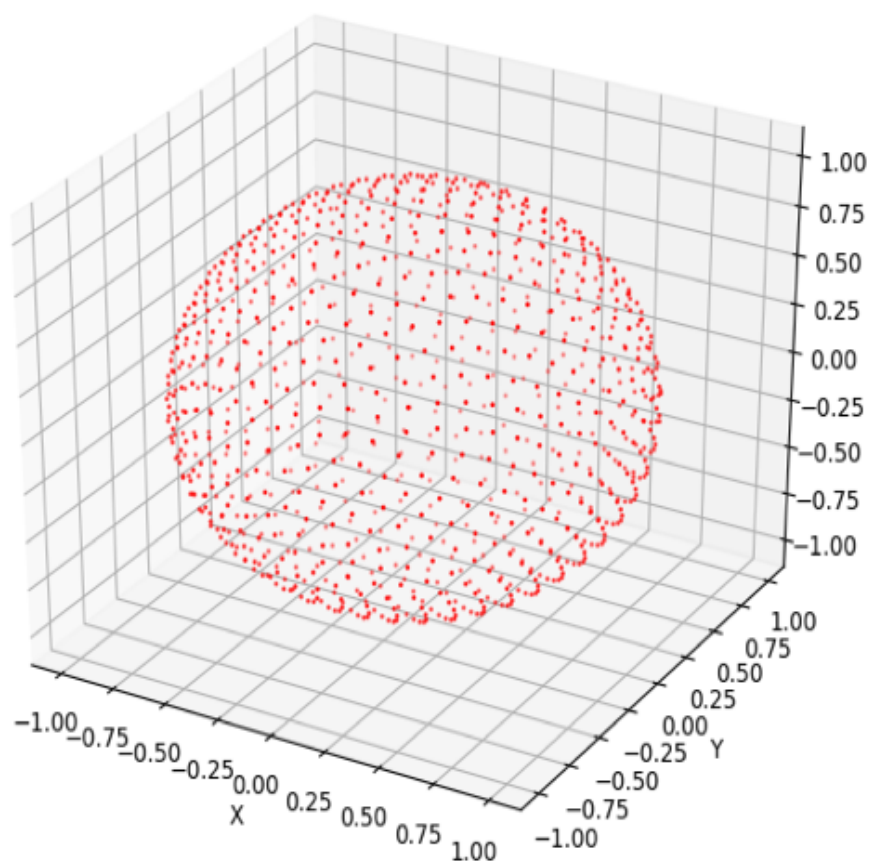


Рис. 1.1: Пример начального равномерного позиционирования 1000 частиц на поверхности единичной сферы в декартовых координатах, реализованного при помощи алгоритма Фибоначчи.

1.1. Начальное распределение частиц

Принимается, что в начальный момент времени (при старте моделирования) все частицы располагаются на поверхности сферы эквидистантно в первом

приближении. Для расчета начальных координат частиц на сфере используется численный алгоритм Фибоначчи [34]. После старта моделирования частицы могут перемещаться скачками по баллистическим траекториям.

1.2. Расчет температуры поверхности

В ряде работ [31, 32], для расчета температуры на поверхности небесного тела используется стационарная температурная функция. Такой подход упрощает численные расчеты и оправдан, если нет цели отследить особенности поведения частиц на дневной или ночной стороне и вблизи терминатора. В настоящей работе для исследования таких особенностей учитываются непрерывные суточные и годовые изменения температуры поверхности.

Температура в каждой точке с широтой ϕ и долготой λ в сферической системе координат на дневной стороне небесного тела в любой момент времени определяется исходя из закона Стефана-Больцмана

$$T(\phi, \lambda) = \left(\frac{F_1}{\sigma} \right)^{1/4}, \quad (1.2.1)$$

где σ - постоянная Стефана-Больцмана, F_1 - поглощаемый в данной точке поток излучения от Солнца.

$$F_1 = (1 - a)F_0 \sin(h_0), \quad (1.2.2)$$

где a - бондовское альбедо (для Луны используется значение 0.11, для Меркурия 0.088 [35, 36]),

$$F_0 = \sigma T_0^4 \left(\frac{R_0}{D} \right)^2 \quad (1.2.3)$$

- исходящий от Солнца поток излучения, T_0 - температура Солнца (принимается равной 5778 K), R_0 - радиус Солнца (696 000 км), D - расстояние от небесного тела до Солнца, h_0 - высота Солнца над горизонтом.

Для упрощения расчетов мы пренебрегаем движением Луны вокруг Земли, а ее орбиту считаем круговой с радиусом 1 а.е. Используя формулы сферической астрономии и тригонометрии, можно показать, что $h_0 = 90^\circ - z$

при $z \geq 0$, $h_0 = -(90^\circ - |z|)$ при $z < 0$, где зенитное расстояние Солнца

$$z = \arccos(\sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(t)), \quad (1.2.4)$$

δ - склонение Солнца, t - часовой угол Солнца.

Орбита Меркурия сравнительно сильно вытянута (эксцентриситет $e \approx 0.2$), поэтому в расчетах учитывается эллиптичность орбиты. Высота Солнца над горизонтом при этом для любой точки на поверхности вычисляется по формуле

$$h_0 = \arcsin(\cos(\phi) \cos(2\pi\tau/T_d) - v - \lambda), \quad (1.2.5)$$

где τ - время, прошедшее с начала моделирования (в начальный момент времени Меркурий находится вблизи перигелия), $T_d = 58,644$ земных суток - период вращения Меркурия, v - истинная аномалия.

Для определения температуры на ночной стороне небесных тел, куда поток излучения от Солнца не попадает, используются данные, полученные в Отделе исследований Луны и планет ГАИШ МГУ методом решения одномерного уравнения теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями.

Согласно этим данным, значения температуры на ночной стороне Луны лежат в диапазоне $80 \div 100$ К, в котором время жизни частиц на поверхности Луны оказывается больше, чем лунные сутки [23]. Это означает, что частицы на ночной стороне Луны не мигрируют, пока не будут освещены Солнцем. С учетом этого факта для упрощения расчетов, температура на ночной стороне Луны принимается постоянной и равной 100 К.

На Меркурии ситуация обстоит иначе, так как температура поверхности в среднем значительно выше. Были выбраны известные параметры для “горячих” (180° , 360°) и “холодных” (90° , 270°) долгот, протабулированные по широтам, и проведена интерполяция для промежуточных значений на ночной стороне.

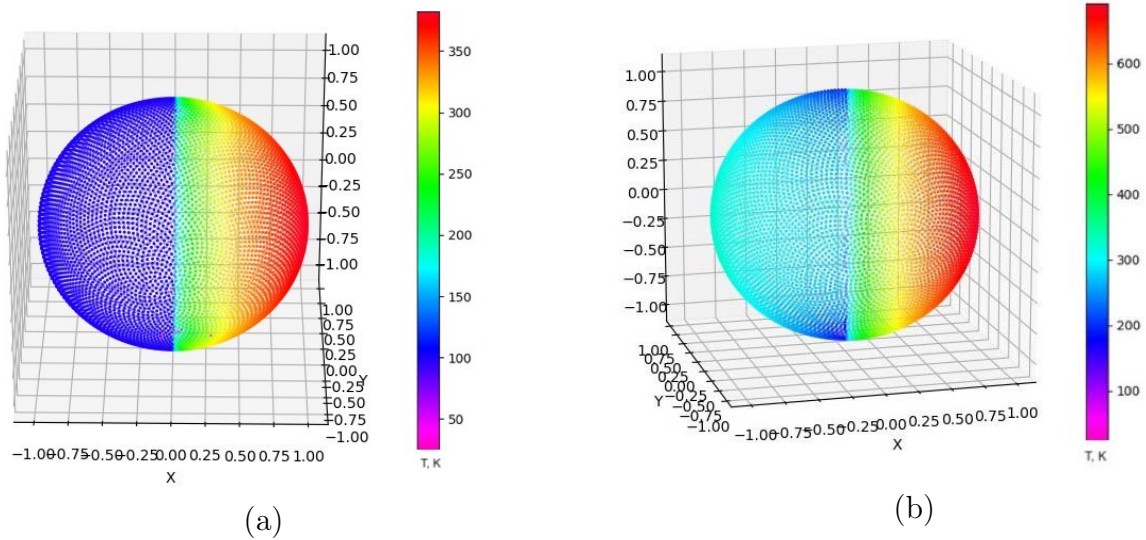


Рис. 1.2: Расчетная модель температуры поверхности; (а) – для Луны. Температура на ночной стороне принимается равной 100 К; (б) – для Меркурия. Температура на ночной стороне рассчитывается при помощи интерполяции известных данных для долгот (90° , 180° , 270° , 360°).

Модель учитывает расположение затененных кратеров. Размер сфер нормирован на радиус исследуемых небесных тел.

1.3. Миграция частиц

Миграция частиц в экзосфере Луны моделируется с помощью метода Монте-Карло, аналогично тому, как это сделано в работе [32]. Принимается, что при перелетах частицы приземляются на поверхность небесного тела. Таким образом, траектория определяется исходя из того, что молекулы стартуют из области, где температура окружающего газа равна температуре поверхности.

Для определения начальной скорости v_0 частицы при каждом перелете используется модифицированное распределение Максвелла [37] с плотностью вероятности

$$f(v_0) = \frac{1}{2} \left(\frac{m}{kT} \right)^2 V_0^3 e^{-\frac{mV_0^2}{2kT}}, \quad (1.3.1)$$

где m - масса частицы, k - постоянная Больцмана, T - температура поверхности.

Направление старта по высоте θ_0 рассчитывается, исходя из теоремы

косинусов [38], при этом плотность вероятности имеет вид

$$f(\theta_0) = \sin(\theta_0). \quad (1.3.2)$$

Данное распределение модифицируется для учета возможных неровностей поверхности небесного тела. Принимается, что частица, стартующая под малым углом ($< 5^\circ$), не может совершить перелет. Направление по азимуту принимается изотропным и является случайным.

Максимальная высота траектории частицы на Луне и Меркурии может достигать $\sim 1/3$ радиуса небесного тела, где сила тяжести составляет порядка $\sim 1/2$ от силы тяжести у поверхности [32], поэтому для точности расчетов важно учитывать изменение ускорения свободного падения с высотой над поверхностью

$$g(h) = g_0 \left(\frac{R}{R+h} \right)^2, \quad (1.3.3)$$

где g_0 - ускорение свободного падения у поверхности, R - радиус небесного тела, h - высота над поверхностью.

1.4. Время жизни частиц

Оказавшись на поверхности, частица может оставаться на ней некоторое конечное время, которое зависит от температуры в данной точке.

Используется физическая модель, предложенная в работе [23]. Темп отложения молекул конкретного вещества составляет

$$E_{max} = P_v / \sqrt{2\pi k T m}, \quad (1.4.1)$$

где P_v - давление насыщенного пара данного вещества, k - постоянная Больцмана, T - температура поверхности, m - масса молекулы. В действительности темп отложения будет несколько меньше, так как не все молекулы остаются на поверхности. Согласно [39] при температурах $40 \div 120$ К доля молекул, которые остаются на поверхности составляет $\alpha = 1 \div 0.7$. Для более высоких температур производится экстраполяция данного параметра.

Давление насыщенного водяного пара в условиях лунной экзосферы

можно рассчитать по формуле

$$P_v = P_{tr} \exp \left[-\frac{Q}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{tr}} \right) \right], \quad (1.4.2)$$

где P_{tr} и T_{tr} - давление и температура тройной точки воды, k - постоянная Больцмана, Q - удельная теплота сублимации льда.

Для расчета давления насыщенного пара других соединений в условиях экзосферы Луны и Меркурия используется уравнение Антуана

$$\lg(P_i) = A_i - \frac{B_i}{C_i + T}. \quad (1.4.3)$$

где A_i , B_i , C_i - коэффициенты Антуана для конкретного вещества [40].

При любой ненулевой температуре у частиц есть вероятность покинуть поверхность. Среднее время жизни на поверхности составляет

$$\tau_s = 400 \frac{\Theta}{E_{max} \alpha}, \quad (1.4.4)$$

где $\Theta = (\rho/m)^{2/3} \approx 10^{19}$ частиц/м² - поверхностная плотность водяного льда, ρ - плотность водяного льда. Множитель 400 предложен в работе [31] для учета адсорбции вещества.

Также в расчетах учитывается возможная аккомодация молекул при их взаимодействии с поверхностью небесного тела [41, 42]. Значение коэффициента аккомодации S , отвечающего за долю молекул, захватываемых поверхностью после столкновения, достоверно неизвестно. В расчетах использовалось среднее значение $S = 0.5$ между двумя граничными ($S = 0$ соответствует отсутствию аккомодации, $S = 1$ - полной аккомодации) [43]. Проверка вероятности аккомодации выполняется на каждом шаге по времени при вычислении времени жизни на поверхности.

1.5. Потери частиц

Частицы могут навсегда покидать систему тем или иным способом. Как было показано в работе [32], основным механизмом потери частиц является фотодиссоциация. Вероятность разрушения молекулы под действием солнечного

света во время перелета

$$P_{photo} = 1 - e^{-tr_{photo}}, \quad (1.5.1)$$

где t - длительность перелета, r_{photo} - коэффициент фотодиссоциации. Строго говоря, значение этого коэффициента зависит от типа вещества и от расстояния до источника излучения. В настоящей работе используются данные, полученные в работе [44] для молекул H_2O на дистанции 1 а.е. от Солнца. Имея ввиду это приближение, учет фотодиссоциации на Меркурии и для других веществ носит оценочный характер. При разрушении молекулы исключаются из дальнейших численных расчетов.

Также был проведен учет возможных гравитационных потерь. Считается, что частица покидает экзосферу, если ее начальная скорость перелета превышает вторую космическую для Луны (~ 2.4 км/с) или Меркурия (~ 4.3 км/с) соответственно. Однако, в процессе моделирования такие случаи выявлены не были.

1.6. Карта кратеров

Как было сказано выше, одним из основополагающих факторов существования “холодных ловушек” на Луне и Меркурии является наличие ударных кратеров в полярных областях.

В настоящей работе учитывается карта ударных кратеров постоянно затененные области в которых превышают 50% от общей площади внутренней поверхности – это 98 кратеров на поверхности Луны и 55 кратеров на Меркурии. Данные координат и размеров кратеров взяты из материалов Отдела исследований Луны и планет ГАИШ МГУ. Температура в данных областях считается достаточно низкой, для того чтобы время жизни частиц в них было порядка миллиарда лет. Данное условие выполняется уже при ненулевых температурах $25 \div 60$ К [23], которые обеспечиваются нагревом из недр исследуемых небесных тел [45, 46].

ГЛАВА 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С учетом ограничения на доступную вычислительную мощность, в рамках данного исследования моделирование проводилось для 10 000 частиц.

2.1. Суточная динамика

Моделирование позволило наблюдать на Луне эффект скопления частиц на утреннем терминаторе.

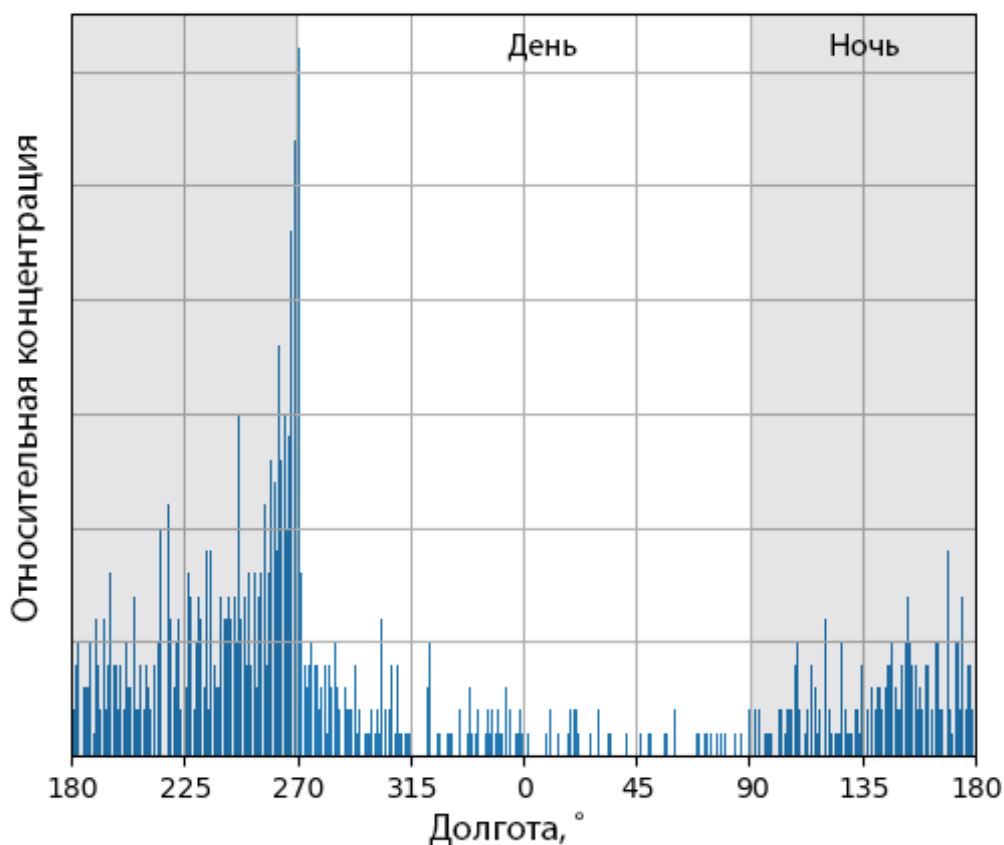


Рис. 2.1: Зависимость от долготы относительной концентрации молекул H_2O на поверхности Луны через одни лунные сутки с момента начала моделирования. Рассчитывается суммарная концентрация по широтным поясам. На утреннем терминаторе (270° долготы) наблюдается пик концентрации молекул, на ночном терминаторе (90° долготы) - минимум концентрации.

Результаты согласуются с экспериментальными данными спектрометра зонда Chandrayaan-1, зарегистрировавшего повышенное содержание ОН

вблизи терминатора [47]. Также изменение концентрации гидроксидных групп в течение суток на Луне наблюдал космический аппарат Deep Impact [48]. Наличие описанного эффекта также отмечается в работе [33].

Эффект можно объяснить тем, что будучи освещенными на восходе, частицы разлетаются равномерно во все стороны и, соответственно, часть перелетает в неосвещенную область, где уже остается лежать из-за конечного времени жизни на поверхности и, таким образом, молекулы вблизи терминатора скапливаются. По аналогичному механизму на ночном терминаторе концентрация молекул может понижаться.

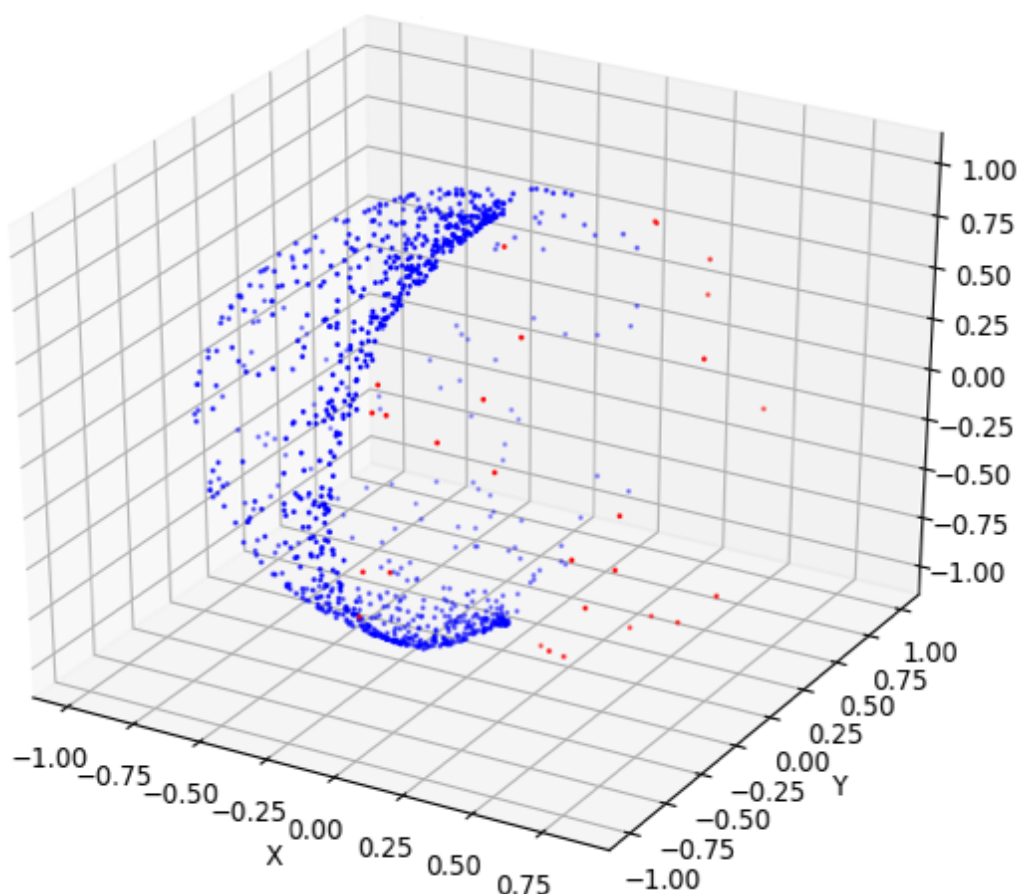


Рис. 2.2: Картина распределения 1000 молекул H_2O на поверхности Луны через одни лунные сутки после начала моделирования в декартовой системе координат. Наблюдается скопление молекул на утреннем терминаторе. Синий цвет соответствует ночной стороне, красный - дневной. Размер сферы нормирован на радиус Луны.

На Меркурии такого эффекта в процессе моделирования не наблюдалось. Это можно объяснить высокой температурой поверхности Меркурия вблизи терминатора – время жизни частиц в этих областях мало и скапливаться они не успевают.

2.2. Итоговое распределение частиц

Моделирование проводилось для следующего ряда химических соединений: H_2O , CO_2 , NH_3 , SO_2 . Такой выбор объясняется тем, что эти вещества были найдены в составе лунного грунта [17, 18], а также входят в состав таких ударников как астероиды и кометы [49].

Для Луны моделирование проводилось в масштабе одного лунного года (365 земных суток), для Меркурия - одних меркурианских суток (176 земных суток). За выбранные промежутки времени по результатам расчетов все частицы в системе успевают либо осесть в “холодных ловушках”, либо покинуть систему. Таким образом, это характерное время получения устойчивого решения, которое учитывает сезонные изменения на поверхности исследуемых небесных тел.

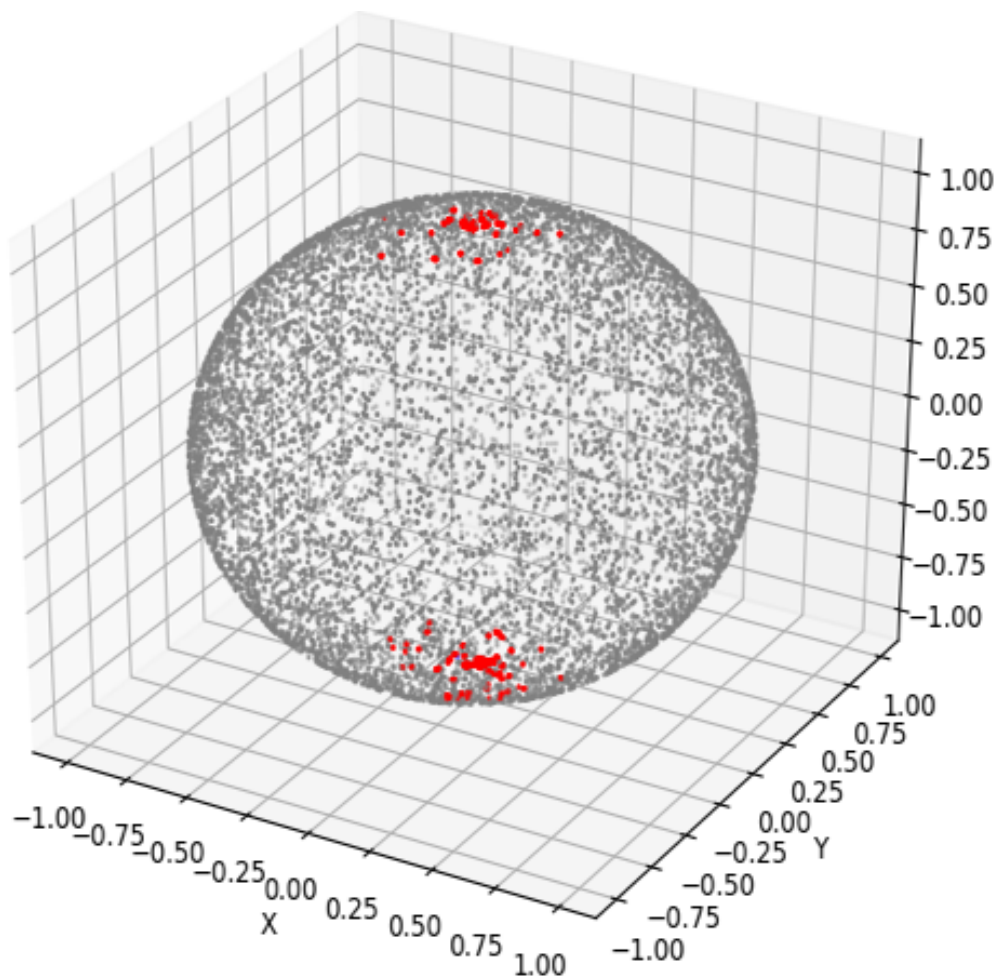


Рис. 2.3: Конечное распределение 10 000 молекул H_2O на поверхности Луны в декартовых координатах. Красным отмечены отложения молекул в затененных кратерах, координаты и размеры которых учтены в модели. Серым для наглядности отмечены диссоциировавшие частицы (в точках, где они покинули систему). Размер сферы нормирован на радиус Луны.

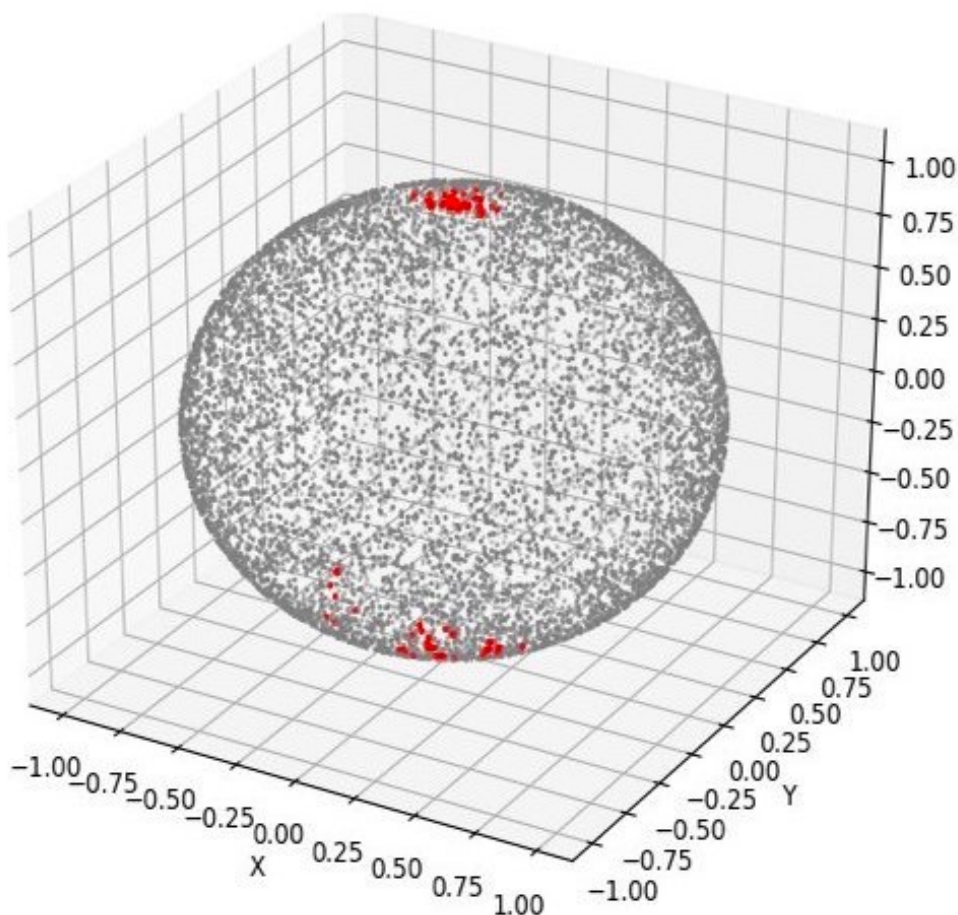


Рис. 2.4: Конечное распределение 10 000 молекул H_2O на поверхности Меркурия в декартовых координатах. Красным отмечены отложения молекул в затененных кратерах, координаты и размеры которых учтены в модели. Серым для наглядности отмечены диссоциировавшие частицы (в точках, где они покинули систему). Размер сферы нормирован на радиус Меркурия.

Итоговая оценка доли отложений в “холодных ловушках” приведена в Таблице 2.1. Можно утверждать, что, в рамках выбранной модели, полученные результаты для молекул H_2O на Луне, в целом хорошо согласуются с результатами аналогичных расчетов [33] (11% отложений H_2O и 89% потерь соответственно), [31] (6.86% отложений H_2O). Для Меркурия можно провести аналогичные сравнения с [32] (5÷15% отложений H_2O). В этой же работе оценки отложений CO_2 составляют ~13% для Луны и ~2% для Меркурия. Сравнение результатов для других веществ осуществить проблематично в связи с отсутствием подобных данных.

Молекула	Отложения	Фотодиссоциация
Луна		
H ₂ O	11.7%	88.3%
CO ₂	7.7%	92.3%
SO ₂	8.1%	91.9%
NH ₃	13.4%	86.6%
Меркурий		
H ₂ O	10.8%	89.2%
CO ₂	5.4%	94.1%
SO ₂	5.9%	94.6%
NH ₃	11.5%	88.5%

Таблица 2.1: Результаты моделирования миграции различных летучих соединений в экзосфере Луны и Меркурия. Для каждого соединения рассчитана доля отложений в постоянно затененных кратерах, а также доля фотодиссоциировавших молекул. В моделировании участвовали 10 000 частиц. Погрешность вычислений лежит в пределах $\sim 1\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы был создан гибкий масштабируемый инструмент для трехмерного моделирования миграции летучих соединений в экзосфере Луны и Меркурия. С его помощью получены количественные результаты по оценке доли отложений в “холодных ловушках” на поверхности исследуемых небесных тел, а также качественные результаты по наблюдению суточной динамики миграции частиц. Полученные результаты хорошо согласуются с аналогичными теоритическими работами и экспериментальными данными.

Программный комплекс позволит в дальнейшем моделировать миграцию других химических соединений или уточнять данные для рассмотренных веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. David R. Williams. Moon Fact Sheet. NASA, 2016.
2. Domingue et al. Mercury's Atmosphere: A Surface-Bounded Exosphere. *Space Science Reviews*. 131, 2007.
3. K. Watson et al. The Behavior of Volatiles on the Lunar Surface. *JGR*. V. 66. N 9. P. 3033-3045, 1961.
4. J. R. Arnold. Ice in the lunar polar regions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. V. 84 (B10), 1979.
5. Rossman G. R. Guan Y. Eiler J.M. Stolper E.M. Boyce J. W., Liu Y. and Taylor L.A. Lunar apatite with terrestrial volatile abundances. *Nature* 466(7305): 466-469, 2010.
6. Bruce Fegley Jr. Thermodynamic models of the chemistry of lunar volcanic gases. *Geophysical Research Letters*, 1991.
7. Rutherford M.J. Hauri E. H., Saal A. E. and Van Orman J. A. Water in the Moon's interior: Truth and consequences. *Earth and Planetary Science Letters* 409(0): 252-264, 2015.
8. Shemansky D.E. Morgan T.H. Limits to the lunar atmosphere. *J. Geophys. Res.* 96, 1351-1367, 1991.
9. Berezhnoi A. A. Klumov B. A. Possible origin of lunar ice. *Adv. Space Res.* V. 30. P. 1875 - 1881, 2002.
10. Korycansky D. Coker R.F. Ong L., Asphaug E. Volatile retention from cometary impacts on the Moon. *Icarus*. V. 207. P. 578-589, 2010.
11. D.B. Goldstein P.L. Varghese L.M. Trafton P. Prem, N.A. Artemieva. Transport of water in a transient impact-generated lunar atmosphere. *Icarus* 255 148-158, 2015.
12. Vondrak R.R. Crider D.H. The solar wind as a possible source of lunar polar hydrogen deposits. *Journal of Geophysical Research - Planets*. V. 105, 2000.
13. V. Dorofeeva A. Basilevsky, A. Abdrakhimov. Water and other volatiles on the Moon: A review. *Space Sci. Rev.*, 46(2), 89-107, 2012.
14. Nozette S. et al. The Clementine bistatic radar experiment. *Science*.274(5292):1495-8, 1996.
15. Binder A.B. Barraclough B.L. Elphic R.C. D. J. Lawrence. Feldman W.C., Maurice S. Fluxes of Fast and Epithermal Neutrons from Lunar Prospector: Evidence for Water Ice at the Lunar Poles. *Science Journal*. 281, 1496-1500, 1998.
16. Binder A.B. Barraclough B.L. Elphic R.C. Feldman W.C., Maurice S. and D. J. Lawrence. Evidence for water ice near the lunar poles. *J. Geophys. Res.* . V. 106, P. 23231-23252., 2001.
17. Gladstone G.R et al. Corrections and Clarifications: LRO-LAMP Observations of the LCROSS Impact Plume. *Science*. V. 333, P. 1703, 2010.
18. Colaprete A. et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume. *Science* 330, 463-468, 2010.
19. D. M. Hurley C. Plymate S. Naidu R. M. Killen, A. E. Potter. Observations of the lunar impact plume from the LCROSS event. *Geophysical Research Letters*, 2010.
20. Mitrofanov I.G et al. Hydrogen mapping of the lunar South Pole using the LRO neutron detector experiment LEND. *Science*, vol. 330, pp. 483-486, 2010.
21. Mitrofanov I.G et al. Testing polar spots of water-rich permafrost on the Moon: LEND observations onboard LRO. *Geophys. Res.*, vol. 117, no. 27, p. E00H27. doi:, 2012.
22. Ashwin R. Vasavada et al. Near-Surface Temperatures on Mercury and the Moon and the Stability of Polar Ice Deposits. *Icarus* 141, 179-193, 1999.
23. Norbert Schorghofer and G. Jeffrey Taylor. Subsurface migration of H₂O at lunar cold traps. *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, E02010, 2007.
24. M.A Slade J.K Harmon. Radar mapping of Mercury: Full-disk images and polar anomalies. *Science*, 258, 1992.

25. R. A. Velez A. Crespo M. J. Dryer J. M. Johnson J. K. Harmon, M. A. Slade. Radar mapping of Mercury's polar anomalies. *Nature*, 369, 213–215, 1994.
26. L. Harcke R. Jurgens M. Slade, J. Harmon. 3.5-cm radar observations of polar regions of Mercury using Goldstone to Arecibo configuration, in 35th COSPAR Scientific Assembly. *Comm. on Space Res.*, 2004.
27. M. A. Slade Harmon J. K. and M. S. Rice. Radar imagery of Mercury's putative polar ice: 1999–2005 Arecibo results. *Icarus*, 211, 37–50, 2011.
28. Chabot NL et al. Investigating Mercury's South Polar Deposits: Arecibo Radar Observations and High-resolution Determination of Illumination Conditions. *J Geophys Res Planets*, 2018.
29. Neumann et al. Bright and Dark Polar Deposits on Mercury: Evidence for Surface Volatiles. *Science*, 2013.
30. D. Lawrence et al. Evidence for Water Ice Near Mercury's North Pole from MESSENGER Neutron Spectrometer Measurements. *Science*, 2013.
31. John E. Moores. Lunar water migration in the interval between large impacts: Heterogeneous delivery to Permanently Shadowed Regions, fractionation, and diffusive barriers. *JGR: Planets*, 2016.
32. Bryan J. Butler. The migration of volatiles on the surfaces of Mercury and Moon. *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, no. E8, pages 19283–19281, 1977.
33. Schorghofer N. Migration calculations for water in the exosphere of the Moon: Dusk-dawn asymmetry, heterogeneous trapping, and D/H fractionation. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 4888–4893, 2014.
34. Benjamin Keinert et al. Spherical Fibonacci Mapping. *ACM*, 2015.
35. Braden et al. Reflectance of Mercury and the Moon. *EPSC-DPS Joint Meeting 1737*, 2011.
36. Anthony Mallama. The Spherical Bolometric Albedo of Planet Mercury. *arXiv:1703.02670*, 2017.
37. Smith et al. Monte Carlo modeling of exospheric bodies: Mercury. *JGR: Space Physics*, 1978.
38. S. Nocilla. The Surface Re-Emission Law in Free Molecule Flow. *Rarefied Gas Dynamics, Volume 1*, 1962.
39. Haynes et al. Condensation and evaporation of H₂O on ice surfaces. *Phys. Chem.*, 96, 8502–8509, 1992.
40. The National Institute of Standards and US Technology. NIST Chemistry WebBook.
41. A. Lyle Broadfoot D. E. Shemansky. Interaction of the Surfaces of the Moon and Mercury With Their Exospheric Atmospheres. *Reviews of Geophysics and Space Physics vol. 15, no. 4*, 1977.
42. S. Baouche F. Dulieu E. Matar E. Congiu L. Gavilan H. Chaabouni, H. Bergeron and J. L. Lemaire. Sticking coefficient of hydrogen and deuterium on silicates under interstellar conditions. *AA 538, A128*, 2012.
43. David B. Goldstein and J. Victor Austin. Short-time exosphere evolution following an impulsive vapor release on the Moon. *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, no. E12, pages 32841–32845, 2001.
44. J. Mukherjee W.F. Huebner n. Photoionization and photodissociation rates in solar and black body radiation fields. *Planetary and Space Science*, 2015.
45. Stephen E. Wood Ashwin R. Vasavadaa, David A. Paige. Near-Surface Temperatures on Mercury and the Moon and the Stability of Polar Ice Deposits. *Icarus, Volume 141, Issue 2*, 1999.
46. H. Ishimoto R. Nakamura T. Mukai, M. Tanaka. Temperature variations across craters in the polar regions of the Moon and Mercury. *Advances in Space Research Volume 19, Issue 10, Pages 1497–1506*, 1997.
47. Pieters C. M. et al. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1. *Science*, 326, 568–572, 20200914.
48. Sunshine J. M. et al. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the Deep Impact Spacecraft. *Science*, 326, 565–568, 2009.
49. Paige D.A. et al. Thermal Stability of Volatiles in the North Polar region of Mercury. *Science, Vol. 29*, 2012.