



Федченков П.А., [Сазонов В.В.](#)

Исследование
продолжительности
существования объектов
космического мусора в
околосреднем пространстве

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Федченков П.А., Сазонов В.В. Исследование продолжительности существования объектов космического мусора в околосреднем пространстве // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010. № 75. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-75>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
им. М.В.Келдыша

П.А. Федченков, В.В. Сазонов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В ОКОЛОЗЕМНОМ
ПРОСТРАНСТВЕ**

Москва – 2010

Аннотация

При анализе накопления космического мусора в околоземном пространстве представляет интерес исследовать время существования частицы мусора на орбите в функции начальных элементов последней. В данной работе такое исследование выполнено с применением усредненных уравнений движения. В уравнениях учитываются основные возмущающие факторы: нецентральность гравитационного поля Земли, сопротивление атмосферы, гравитационное притяжение Луны и Солнца, а также световое давление прямых солнечных лучей. Основное внимание уделено исследованию зависимости времени существования частицы от начальных высоты орбиты, наклона и эксцентриситета, а также от значений баллистических коэффициентов.

P.A. Fedchenkov, V.V. Sazonov. Investigation of the lifetime of space debris particles in the near-earth region. If we are interested in the problem of space debris in the near-earth region, we have to investigate the lifetime of small particles (they have specifically large ballistic coefficients) in near-earth orbits as a function of their initial orbital elements. This paper contains such investigation carried out basing on an averaged system of differential equations for osculating orbital elements. The system takes into account the main disturbing factors: Earth oblateness, atmosphere drag, gravitation of Moon and Sun, solar radiation pressure. The special emphasis is placed in evaluation of the particle lifetime as a function of the initial orbit altitude, inclination, and eccentricity, as well as the particle ballistic coefficients.

1. Постановка задачи. В данной работе оценивается продолжительность пребывания частицы космического мусора на околоземной орбите с учетом влияния основных возмущающих факторов: нецентральности гравитационного поля Земли, сопротивления атмосферы, гравитационного притяжения Луны и Солнца, а также светового давления прямых солнечных лучей. Математической моделью движения частицы служит система усредненных уравнений, описывающая эволюцию элементов ее оскулирующей орбиты. Фазовыми переменными этой системы являются большая полуось a , эксцентриситет e , долгота восходящего узла Ω , наклонение i , аргумент широты перигея ω и средняя аномалия M . Последние три элемента относятся ко второй геоэкваatorialной системе координат [1]. Детальное описание системы приведено в [2]. Ее интегрирование выполнялось численно.

Усредненная система содержит два параметра, определяющих (наряду с начальными условиями) ее решения. Это – аэродинамический баллистический коэффициент c_a и баллистический коэффициент c_s , характеризующий влияние светового давления. Коэффициенты c_a и c_s определяются сходным образом, но их отношение может изменяться в широких пределах. Оно зависит от механизма воздействия на поверхность частицы набегающего аэродинамического потока и солнечных лучей, а также от ориентации поверхности относительно направлений этих воздействий. Если принять, что частица представляет собой сферу, то, исходя из формальных допущений, для отношения c_s/c_a можно установить неравенства $0.5 < c_s/c_a < 2$. На самом деле в случае частицы-сферы границы изменения этого отношения несколько уже.

В исследовании, результаты которого приводятся ниже, используются три варианта соотношения между баллистическими коэффициентами c_a и c_s : А) $0 \leq c_a \leq 5$, $c_s = c_a$; Б) $0 \leq c_a \leq 5$, $c_s = 2c_a$; В) $c_s = \alpha c_a$, $1 \leq \alpha \leq 2$. Здесь и ниже единица измерения баллистических коэффициентов – $\text{м}^2/\text{кг}$. Элементы начальных орбит частиц мусора задаются следующим образом: $e = 0.01$, $i = 51^\circ$, $\Omega = 150^\circ$, $\omega = 30^\circ$; большая полуось представляется в виде $a = r_E + h$, где $r_E = 6378.14$ км – радиус Земли, начальная высота орбиты h варьируется в пределах $500 \leq h \leq 3000$ км.

Ниже в п. 2 исследуется зависимость времени существования частицы от начальной высоты орбиты при различных значениях ее баллистических коэффициентов и наклонении начальной орбиты. В пп. 3, 4 изучается зависимость времени существования от начальной высоты орбиты при различных значениях наклонения и эксцентриситета. Максимальный промежуток времени интегрирования усредненной системы составляет 4500 суток.

2. Зависимость времени существования частицы от начальной высоты орбиты при различных значениях баллистических коэффициентов. На рис. 1 для варианта А представлена совокупность графиков, характеризующих указанную зависимость при $500 \leq h \leq 3000$ км и $i = 51^\circ$. Каждый график по-

строен при фиксированном $c_a \in [0, 5]$ и представляет собой ломаную линию, абсциссы соседних вершин которой отличаются на 25 км. От графика к графику значение c_a меняется с шагом 0.1. Опишем вид зависимости на примере частицы с баллистическими коэффициентами $c_a = c_s = 4.6$. При значениях начальных высот в интервале от 500 до 1400 км продолжительность жизни частицы на орбите возрастает с увеличением высоты. По достижении начальной высоты 1400 км время жизни частицы начинает убывать с дальнейшим увеличением высоты вплоть до начальной высоты 1600 км, где скорость убывания уменьшается. При этом время жизни частицы на высоте 1600 км совпадает со временем жизни на высотах $1025 \div 1050$ км. В интервале от 1600 до 2375 км время жизни частицы почти не зависит от высоты орбиты, а начиная с высоты 2400 км наблюдается его возрастание, и уже при $h = 2475$ км продолжительность нахождения частицы на орбите превышает 4500 суток. Сходная зависимость наблюдается и для других баллистических коэффициентов с той разницей, что немонотонный характер зависимости времени жизни от начальной высоты проявляется тем сильнее, чем меньше баллистический коэффициент. Напротив, интервал постоянной продолжительности жизни тем длиннее, чем больше баллистический коэффициент: так при $c_a = 5$ этот интервал составляет $1550 \leq h \leq 2425$ км, а уже при $c_a = 0.8$ интервал вырождается в точку.

Рис. 2 содержит графики, описывающие зависимость времени существования частицы от начальной высоты орбиты для значений баллистических коэффициентов варианта Б. Здесь по-прежнему $i = 51^\circ$. В данном случае немонотонный характер зависимости имеет место не для всех рассматриваемых значений c_a и c_s . При $c_a > 3.5$ эта зависимость монотонна, причем в диапазоне высот $1100 \leq h \leq 2700$ км начальная высота сравнительно слабо влияет на продолжительность жизни частицы, составляющей от 300 до 500 суток. При $3 \leq c_a \leq 3.4$ на графиках возникает локальный максимум в промежутке начальных высот от 1000 до 1500 км, а длина интервала почти постоянной продолжительности жизни сокращается. При $c_a \leq 2.8$ графики весьма похожи на графики варианта А. Наличие локальных максимумов времени существования сохраняется и при использовании сценария В (рис. 3). Здесь коэффициент $c_a = 3$ фиксирован, коэффициент c_s варьируется на отрезке $3 \leq c_s \leq 6$. Непосредственное сравнение значений кривых для $c_a = 1.5$, $c_s = 3$ и $c_a = 3$, $c_s = 3$ показывает, что небольшие различия между обоими случаями наблюдаются в области $500 \leq h \leq 1200$ км, где сопротивление атмосферы еще заметно.

На рис. 4 видно, что разница между временем жизни в сценариях А и Б наблюдается лишь в области $500 \leq h \leq 1600$ км, где сопротивление атмосферы значительно.

Орбиты с наклонами $i = 63.4^\circ$ ($\dot{\omega} \approx 0$) и $i = 64^\circ$ содержат большое число объектов космического мусора. Зависимость времени существования частиц на таких орбитах от начальной высоты последних представлена на рис.

5 – 8. Изображенные здесь графики похожи на графики для орбит с наклоном $i = 51^\circ$. В случае $i \approx 63.4^\circ$ наблюдается дополнительный скачок времени жизни в интервале высот $1800 \leq h \leq 2000$. Кроме того, заметна значительная разница, как между отдельными значениями продолжительности жизни, так и характером зависимости соответствующим обоим случаям. Этот вопрос подробно обсуждается в п. 4.

3. Объяснение характера зависимости от начальной высоты орбиты.

Поведение графиков на рис. 1 – 8 объясняется следующим образом. При увеличении начальной высоты вплоть до 1400 км время жизни частиц возрастает вследствие уменьшения сопротивления атмосферы. Однако при начальных высотах около 1400 км, возмущение со стороны светового давления начинает влиять на эксцентриситет e – он возрастает при почти постоянной величине большой полуоси a орбиты. Это приводит к уменьшению радиуса перигея r_p орбиты согласно формуле $r_p = a(1 - e)$ и увеличению влияния сопротивления атмосферы на движение частицы вблизи перигея. На начальных высотах от 1400 до 1700 км такой эффект приводит к заметному сокращению времени жизни частицы. Однако при начальной высоте выше 1700 км торможение в окрестности перигея ослабевает, и продолжительность жизни частицы перестает убывать с увеличением начальной высоты. При увеличении начальной высоты орбиты от 1700 до 2200 км соответствующее возрастание r_p (напомним, начальный эксцентриситет фиксирован) компенсирует убывание этой величины, вызываемое световым давлением. В этом интервале начальных высот радиус перигея, а значит и сопротивление со стороны атмосферы в окрестности перигея, практически постоянны. Как следствие, продолжительность жизни частицы значительно не меняется. После достижения верхней границы этого интервала примерно при $h = 2200$ км эффект малого сопротивления атмосферы вблизи перигея превалирует над эффектами, связанными с возмущением со стороны светового давления, и продолжительность жизни частицы начинает стремительно возрастать до достижения максимальных рассматриваемых значений.

Продemonстрируем данное объяснение на примере частицы с баллистическими коэффициентами $c_a = c_s = 4.6$. На рис. 9 и 10 изображена эволюция эксцентриситета и радиуса перигея ее орбиты на период 3600 суток для начальных высот от 500 до 2500 км с шагом в 50 км. Как следует из рис. 10, для высот в промежутке $1700 \leq h \leq 2200$ км, соответствующим интервалу почти постоянной продолжительности жизни (см. п. 2) значения радиуса перигея находятся очень близко друг к другу, что согласуется с приведенным выше объяснением.

Изучим более детально один из диапазонов изменения h , в котором резко уменьшается продолжительность жизни частицы. На рис. 11 приведены результаты расчетов эволюции большой полуоси a , радиуса перигея r_p , эксцентриситета e и наклона i орбит девяти частиц с начальными значениями высоты орбиты $h = 1800, 1775, 1750, 1725, 1720, 1715, 1710, 1705, 1700$. В этих расчетах

$c_a = 1.6$, $c_s = 3.2$. Частицы разделились на две группы согласно характеру эволюции их орбит. Первая группа имеет $h = 1800, 1775, 1750$; у второй группы $h = 1725 \div 1700$. Максимальное значение e у орбит первой группы больше, чем у второй, и это приводит к меньшим значениям r_p . В силу указанной разницы частицы первой группы имеют более низкий перигей и падают на Землю через $1200 \div 1300$ суток после достижения минимума r_p . Напротив, частицы второй группы еще как минимум 800 суток находятся на орбите Земли.

4. Зависимость времени существования от баллистических коэффициентов. Для варианта А на рис. 12 представлена совокупность графиков, иллюстрирующих зависимость времени жизни частицы, от ее баллистического коэффициента c_a на отрезке $0 \leq c_a \leq 5$ с шагом 0.1. Каждый график соответствует фиксированному значению h из отрезка $500 \leq h \leq 3000$ км. Зависимость времени жизни от баллистического коэффициента является монотонно убывающей для всех рассматриваемых значений высот. Зависимость становится более выраженной с уменьшением баллистического коэффициента. На рисунке наблюдается область сгущения кривых, разделяющая его на две характерные части. Данный эффект является проявлением немонотонной зависимости времени жизни от начальной высоты: в области сгущения кривые отвечают высотам 975, 1000, 1925 \div 2075 км – эти высоты разделены немонотонным участком на рис. 1 (см. п. 2). При этом графики, соответствующие начальным высотам $h = 975$ и $h = 2000$ км, почти сливаются друг с другом для всех рассматриваемых значений баллистического коэффициента, т.е. для любого $0 \leq c_a \leq 5$ продолжительности жизни частицы при начальных высотах 975 и 2000 км практически совпадают.

Аналогичная картина монотонной зависимости наблюдается для варианта Б, представленного на рис. 13. Единственным качественным отличием является наличие интервала постоянной продолжительности жизни $0.5 \leq c_a \leq 3.5$, который соответствует интервалу постоянства на рис. 2 (см. п. 2). Область сгущения отвечает значениям высот 900, 925, 1900 \div 2100 км. Линии, соответствующие $h = 900$ и $h = 2025$ км почти совпадают друг с другом для всех рассматриваемых значений c_a .

Возвращаясь к рис. 2, заметим, что в данном случае графики, соответствующие различным значениям баллистических коэффициентов, расположены менее плотно по отношению друг к другу, что особенно выражено в промежутке высот начиная от 1500 км. Это свидетельствует о большей зависимости времени жизни частицы от баллистического коэффициента в случае зеркального отражения. Объяснить это можно увеличенным «весом» c_s , а значит, большим возмущением со стороны светового давления в рамках данного варианта.

В случае Б изучим один из отрезков резкого уменьшения продолжительности жизни частицы более детально. На рис. 14 приведены результаты расчетов эволюции большой полуоси a , радиуса перигея r_p , эксцентриситета e и наклона

ния i орбит девяти частиц с начальной высотой орбиты $h=1700$ км и значениями баллистического коэффициента $c_a = 1.7, 1.675, 1.65, 1.625, 1.62, 1.615, 1.61, 1.605, 1.6$. Как и на рис. 11 (см. п. 3), частицы можно разделить на две группы по характеру эволюции элементов их орбит. Первая группа имеет $c_a = 1.7, 1.675, 1.65$, у второй группы $c_a = 1.625 \div 1.6$. Максимальное значение эксцентриситета первой группы больше чем у второй, а значит, в окрестности перигея орбиты частицы первой группы испытывают большее сопротивление со стороны атмосферы и, как следствие, продолжительность их жизни сокращается.

5. Зависимость времени жизни частицы от начальной высоты орбиты при различных значениях наклона орбиты. Будем рассматривать частицу, начальная орбита которой задана элементами $e = 0.01, \Omega = 150^\circ, \omega = 30^\circ$. Начальные значения наклона i и большой полуоси a варьируются. Для удобного сравнения с результатами предыдущих пунктов работы исследование проводилось для частицы с $c_a = c_s = 4.6$. Максимальное время интегрирования составляет 4500 суток. В связи с меняющимся видом зависимости времени жизни от наклона результаты будем представлять отдельно в промежутках наклонов $25^\circ \leq i \leq 50^\circ$ и $50^\circ \leq i \leq 80^\circ$. Значения наклона $i \leq 50^\circ$ менее интересны с точки зрения приложения результатов к объектам мусора. Кроме того, характер поведения зависимости на данном промежутке довольно прост: интервал постоянной продолжительности жизни частицы постепенно вырождается в промежуток резкого скачка продолжительности жизни (рис. 15).

Более интересным является поведение указанной зависимости в промежутке $50^\circ \leq i \leq 80^\circ$. На рис. 16 представлены графики зависимости времени жизни частицы от начальной высоты ее орбиты в промежутке от 500 до 3500 км с шагом 50 км. Каждая кривая соответствует значению наклона орбиты из рассматриваемого промежутка с шагом 0.5° . При увеличении наклона от $i = 50^\circ$ до $i = 51^\circ$ интервал постоянной продолжительности жизни увеличивается и смещается в область более низких начальных высот – тот же эффект, который наблюдается в промежутке $25^\circ \leq i \leq 50^\circ$. Однако, по достижении значения $i = 52^\circ$ немонотонный характер зависимости от начальной высоты прекращается. Далее, в промежутке от 52° до 62° зависимость времени жизни от начальной высоты орбиты имеет строго монотонный характер. Для значений наклона в промежутке значений $56^\circ \leq i \leq 61^\circ$ время жизни отличается незначительно для каждого значения начальной высоты орбиты. В промежутке $62.5^\circ \leq i \leq 63.5^\circ$ зависимость вновь приобретает немонотонный характер, но при $64^\circ \leq i \leq 72.5^\circ$ продолжается монотонная зависимость, которая опять сменяется немонотонной начиная $i = 73^\circ$. При дальнейшем увеличении наклона орбиты интервал немонотонности сокращается и при $i = 80^\circ$ зависимость вновь при-

обретает монотонный характер на интервале интегрирования от 0 до 4500 суток.

На рис. 17 характер зависимости продолжительности жизни от наклона орбиты проявляется более четко: при $h < 1000$ км время жизни почти не зависит от i ; при $h > 1000$ км выделяются промежутки а) $50^\circ \leq i \leq 55^\circ$ б) $63^\circ \leq i \leq 65^\circ$ в) $72^\circ \leq i \leq 74^\circ$ г) $79^\circ \leq i \leq 80^\circ$, внутри которых продолжительность жизни испытывает сильные скачки. Вне этих промежутков время жизни мало зависит от наклона.

6. Зависимость от начальной высоты орбиты при различных начальных значениях эксцентриситета. Будем рассматривать частицу на орбите $i = 51^\circ$, $\Omega = 150^\circ$, $\omega = 30^\circ$. Эксцентриситет e и большая полуось a орбиты варьируются. На рис. 18 представлены графики зависимости времени жизни частицы от начальной высоты ее орбиты в промежутке от 500 до 3500 км и шагом 50 км. Каждый график соответствует значению эксцентриситета орбиты $0.01 \leq e \leq 0.35$. Видно, что с увеличением e немонотонный характер зависимости сохраняется, однако претерпевает значительные изменения. Немонотонная зависимость в интервале $1400 \leq h \leq 1600$ км сменяется на монотонную уже при $e = 0.07$; интервал постоянной продолжительности жизни $1600 \leq h \leq 2400$ км сменяется промежутком немонотонной зависимости, на котором достигается локальный максимум продолжительности жизни частицы; начиная с $h = 2400$ км продолжительность жизни убывает, а затем сменяется резким возрастанием при дальнейшем увеличении начальной высоты, причем промежуток убывания времени жизни увеличивается с увеличением эксцентриситета. При $e > 0.35$ частица падает на Землю уже в первые сутки полета.

Обнаруженная зависимость объясняется следующим образом. При увеличении начальной высоты орбиты на Δh , радиус перигея увеличивается на $\Delta r_p = \Delta h(1 - e)$. При увеличении эксцентриситета и фиксированном Δh шаг увеличения начального радиуса перигея становится все меньше, и в разных вариантах расчета частица остается в более плотных слоях атмосферы примерно одинаковое время. Следовательно, продолжительность жизни увеличивается незначительно. При значениях эксцентриситета близких к 0.07 частица уже не достигает высот орбиты, на которых возмущения со стороны светового давления преобладают: наблюдается промежуток монотонной зависимости от начальной высоты орбиты. Лишь при достаточно высоких начальных орбитах проявляется эффект возрастания эксцентриситета под воздействием светового давления, описанный в п. 2: этот эффект вызывает характерный скачок времени жизни, сопровождающийся интервалом почти постоянной ее продолжительности и возрастанием этого времени при дальнейшем увеличении начальной высоты орбиты. Таким образом, хотя конкретные значения времени жизни довольно заметно зависят от эксцентриситета, общий вид зависимости сохраняется в интервале $0.01 \leq e \leq 0.35$, хотя и становится менее выраженным. Интересно

отметить, что при значениях высот $h = 1600$ км и $h = 2400$ км продолжительность жизни частицы слабо меняется при изменении эксцентриситета.

Рассмотрим, насколько эксцентриситет влияет на характер зависимости от баллистических коэффициентов частицы. На рис. 19 представлена зависимость времени жизни частицы от начальной высоты ее орбиты в промежутке от 1000 до 3000 км и шагом 50 км. Элементы орбиты: $e = 0.1$, $i = 51^\circ$, $\Omega = 150^\circ$, $\omega = 30^\circ$. Каждая кривая соответствует значению баллистических коэффициентов $c_s = c_a$, $0 \leq c_a \leq 5$. При сравнении данного рисунка с рис. 1 видно, что общий вид зависимости сохраняется: интервал резкого возрастания времени жизни сменяется резким убыванием, за которым следует промежуток почти постоянной продолжительности жизни, сменяющийся резким возрастанием времени жизни при дальнейшем увеличении начальной высоты. Также как и на рис. 1 с убыванием баллистического коэффициента возрастает время ее жизни на орбите, а интервал постоянной продолжительности жизни вырождается в точку.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 09-01-00566).

Литература

1. Дубошин Г.Н. (ред.). Справочное руководство по небесной механике и астродинамике. М., Наука, 1976.
2. Сазонов В.В. Применение усредненных уравнений движения для исследования эволюции орбит объектов космического мусора. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, № 73, 2009.

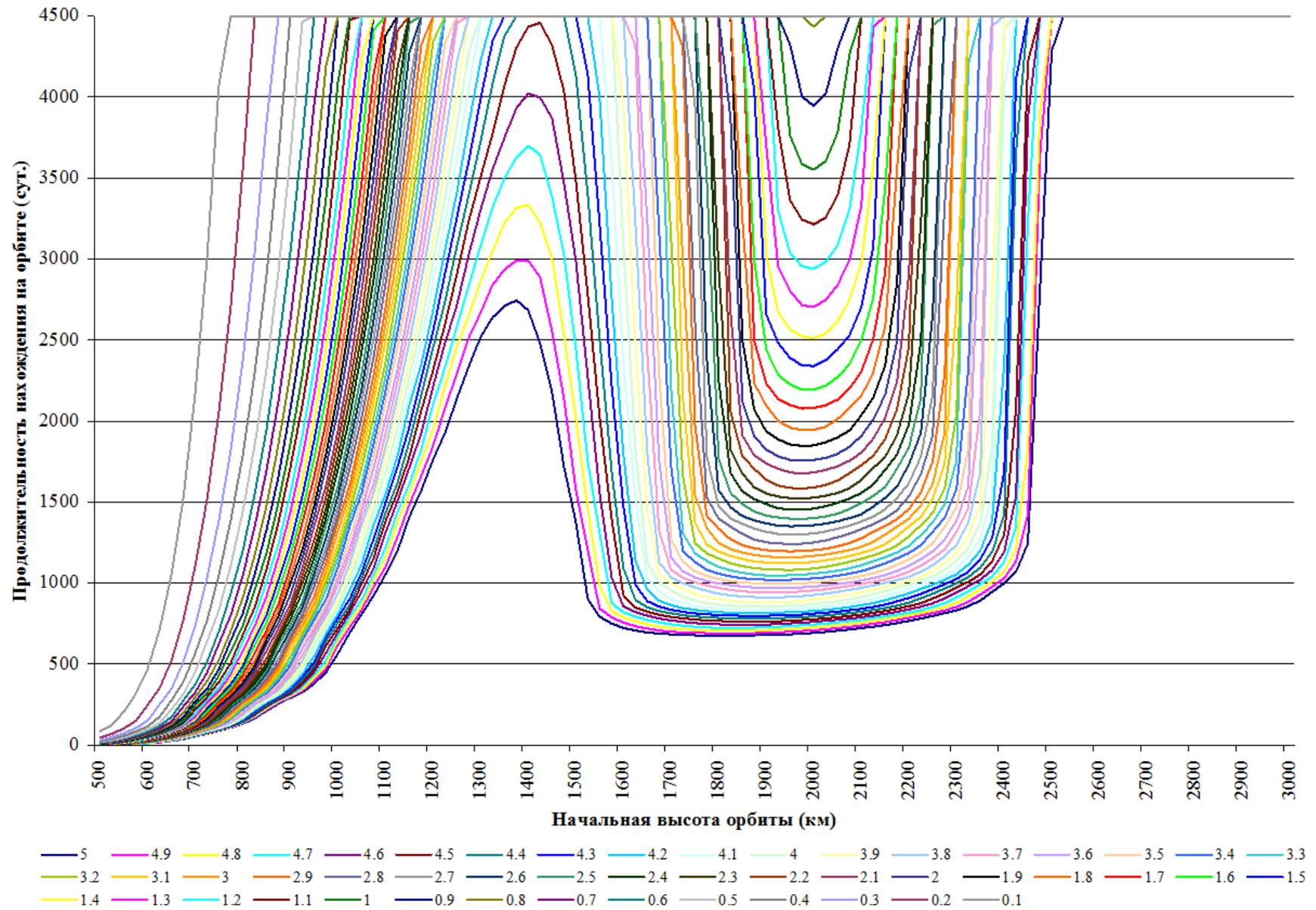


Рис 1. Зависимость времени нахождения частицы на орбите от начальной высоты ее орбиты ($i = 51^\circ$, $c_s = c_a$).

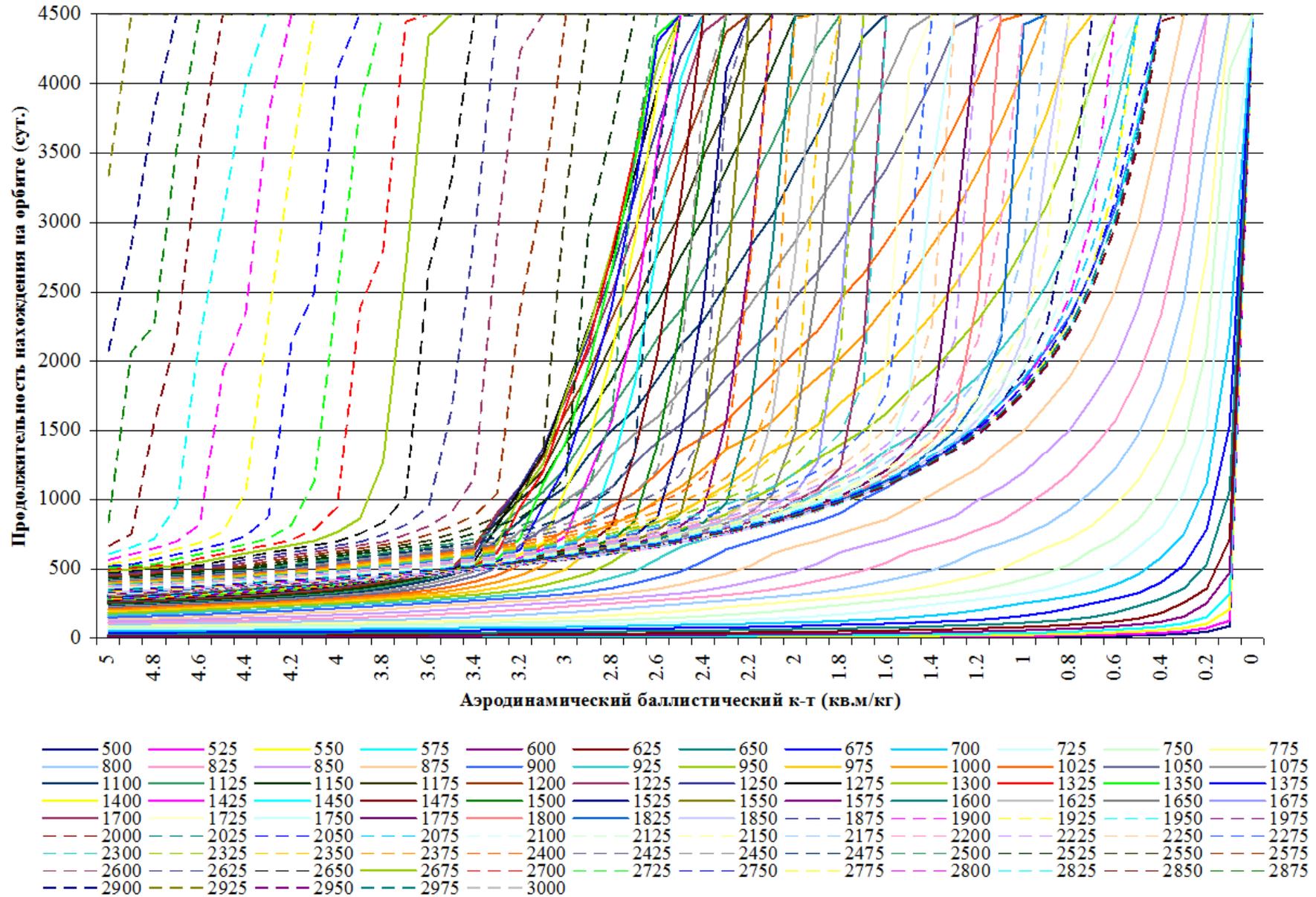


Рис 2. Зависимость времени нахождения частицы на орбите от ее начальной высоты ($i = 51^\circ$, $c_s = 2c_a$)

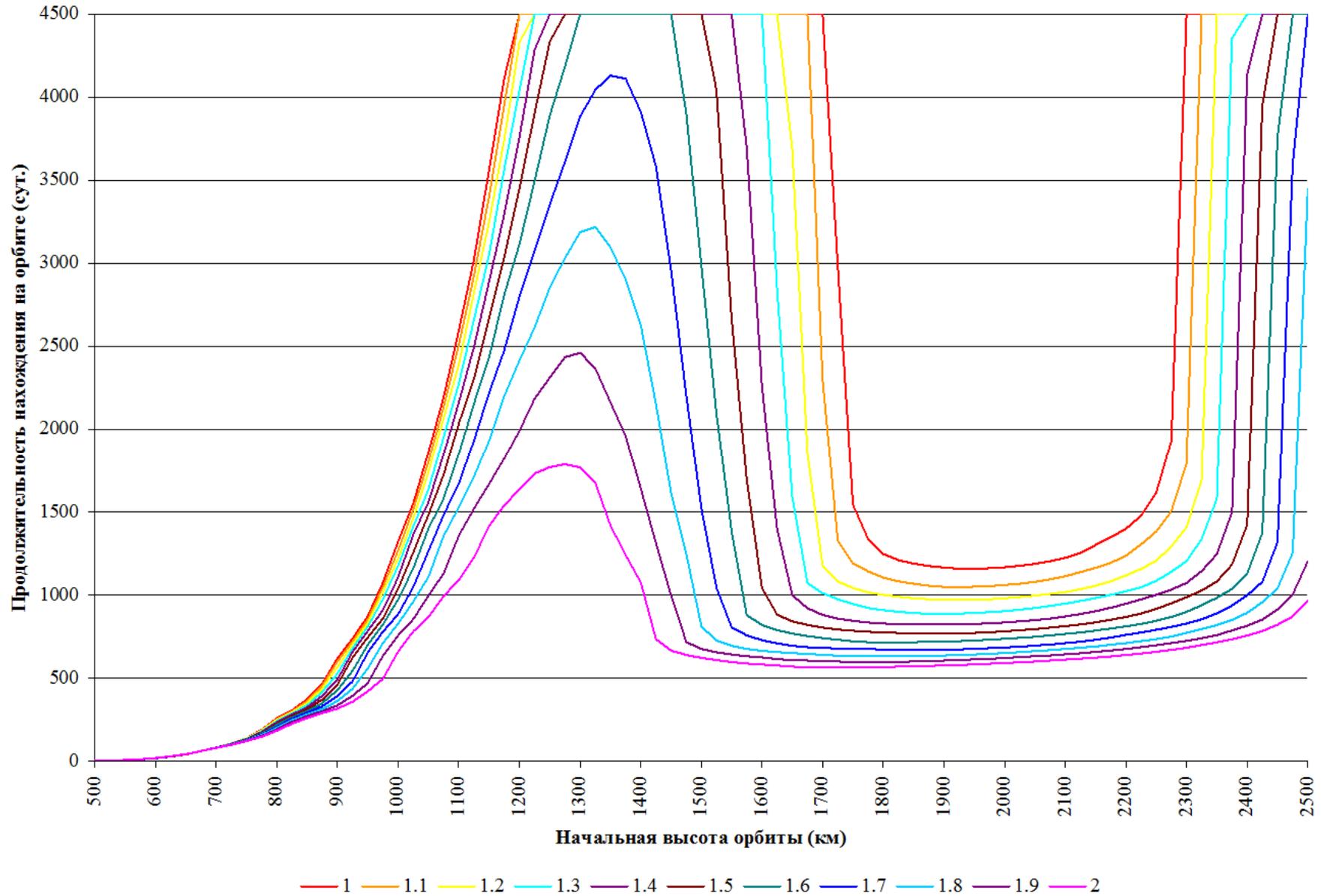
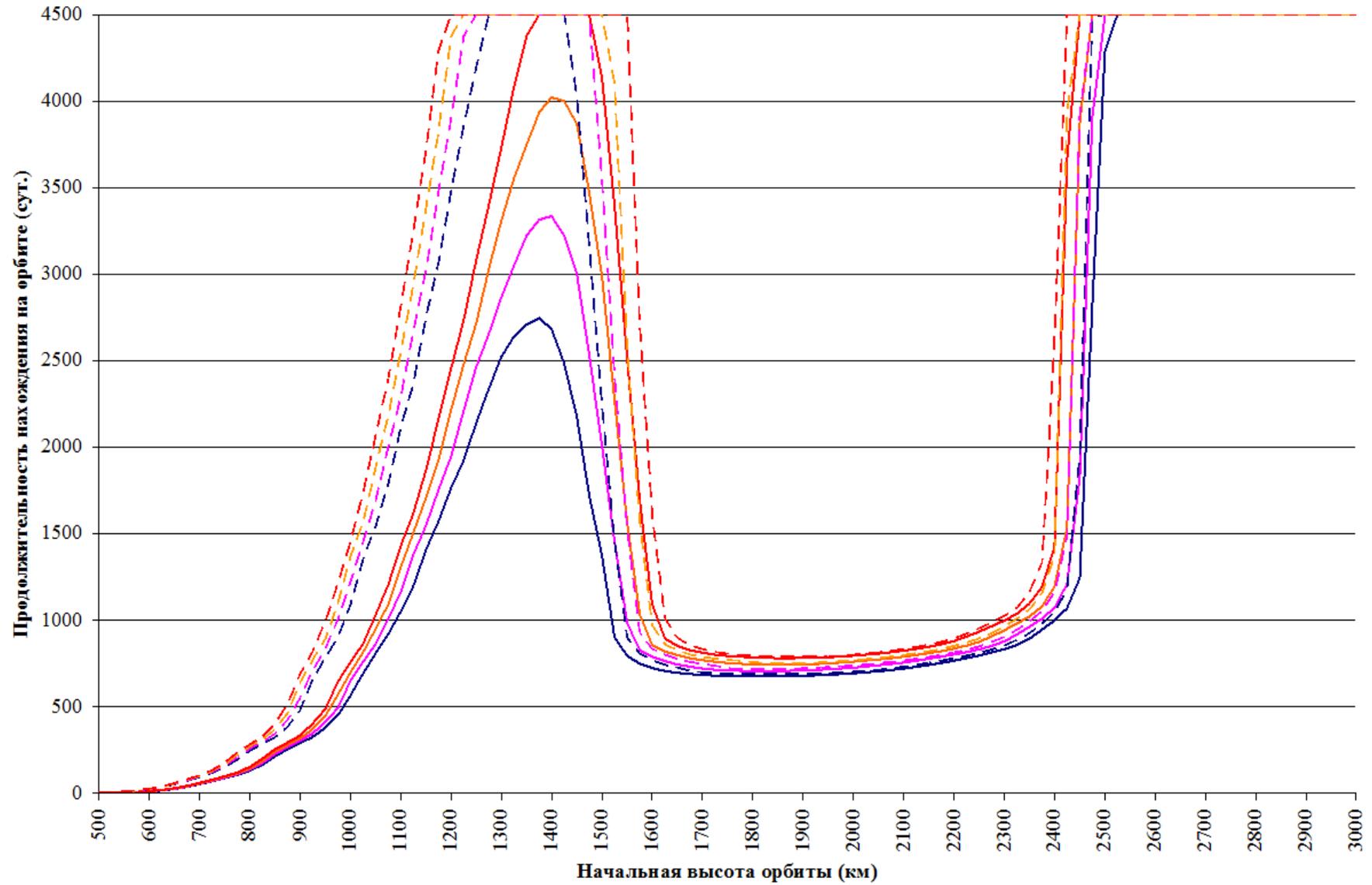


Рис 3. Зависимость времени нахождения частицы на орбите от ее начальной высоты ($i = 51^\circ$, $c_a = 3.0$, $c_s = \alpha c_a$)



$(c_a; c_s)$ — (5.0; 5.0) — (4.8; 4.8) — (4.6; 4.6) — (4.4; 4.4) — (2.5; 5.0) — (2.4; 4.8) — (2.3; 4.6) — (2.2; 4.4)

Рис 4. Сравнение времени нахождения частицы на орбите в рамках сценариев А и Б ($i = 51^\circ$).

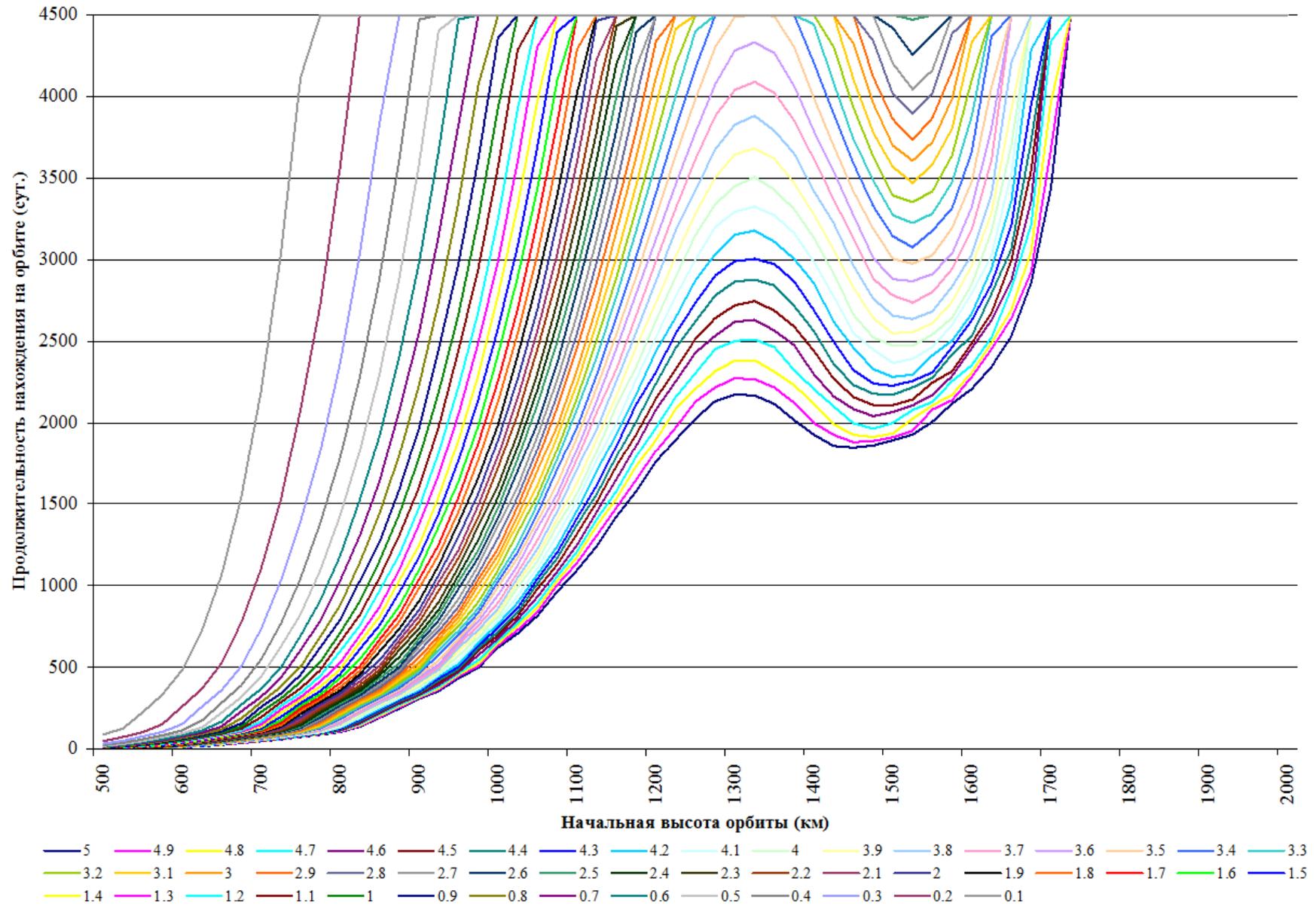


Рис 5. Зависимость времени нахождения частицы на орбите от ее начальной высоты ($i = 63.4^\circ$, $c_s = c_a$).

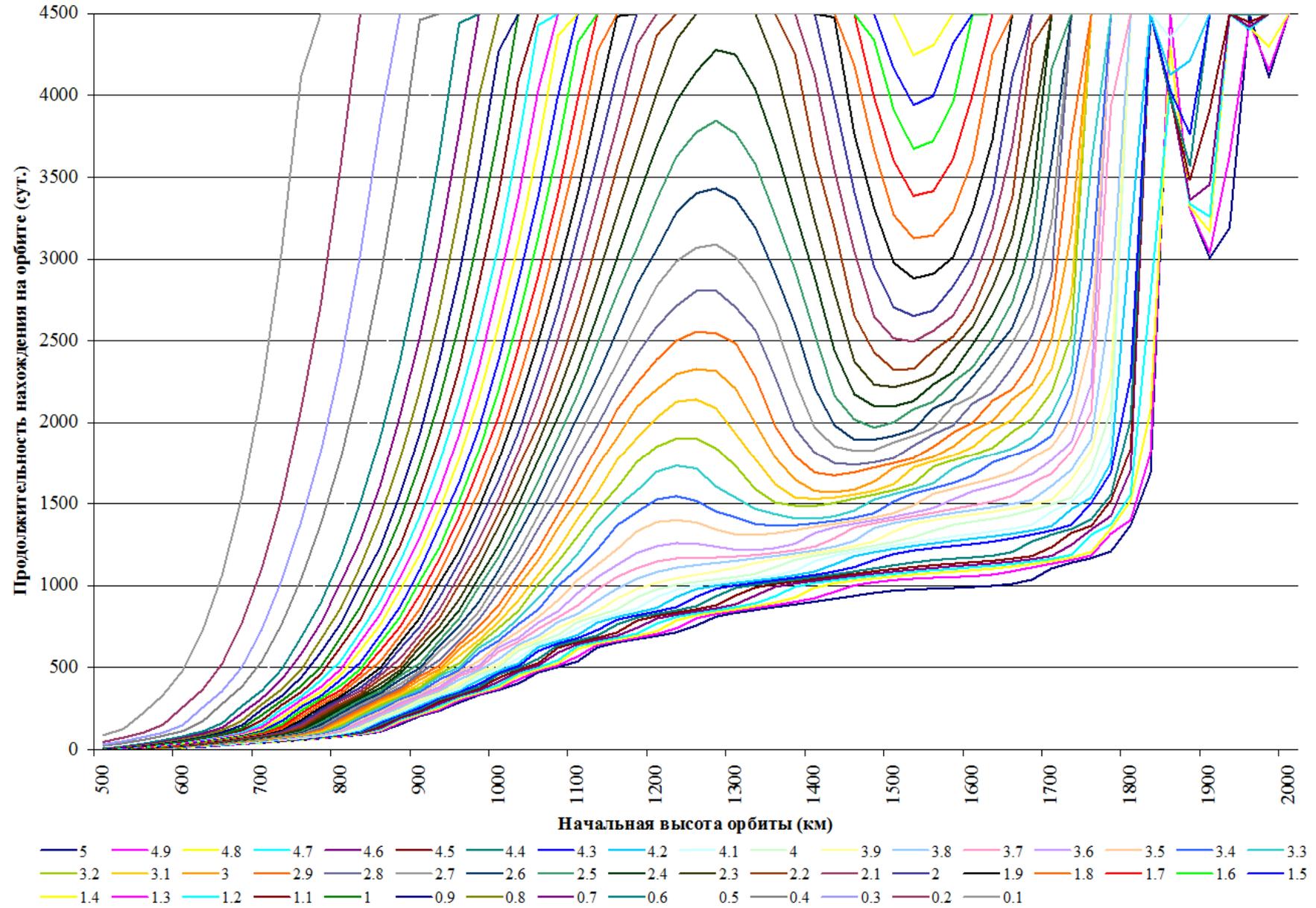


Рис 6. Зависимость времени нахождения частицы на орбите от ее начальной высоты ($i = 63.4^\circ$, $c_s = 2c_a$).

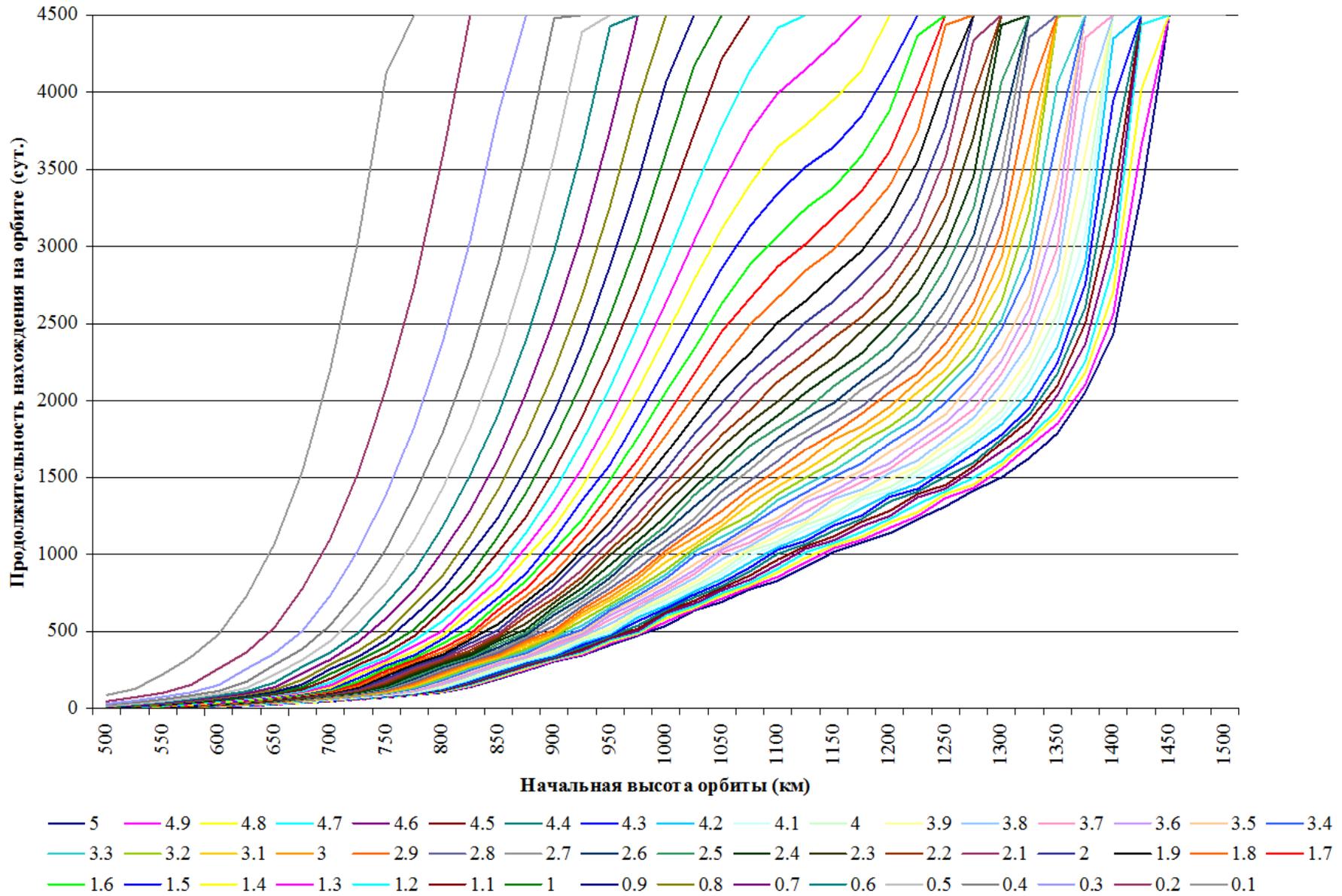


Рис 7. Зависимость времени нахождения частицы на орбите от ее начальной высоты ($i = 64^\circ$, $c_s = c_a$).

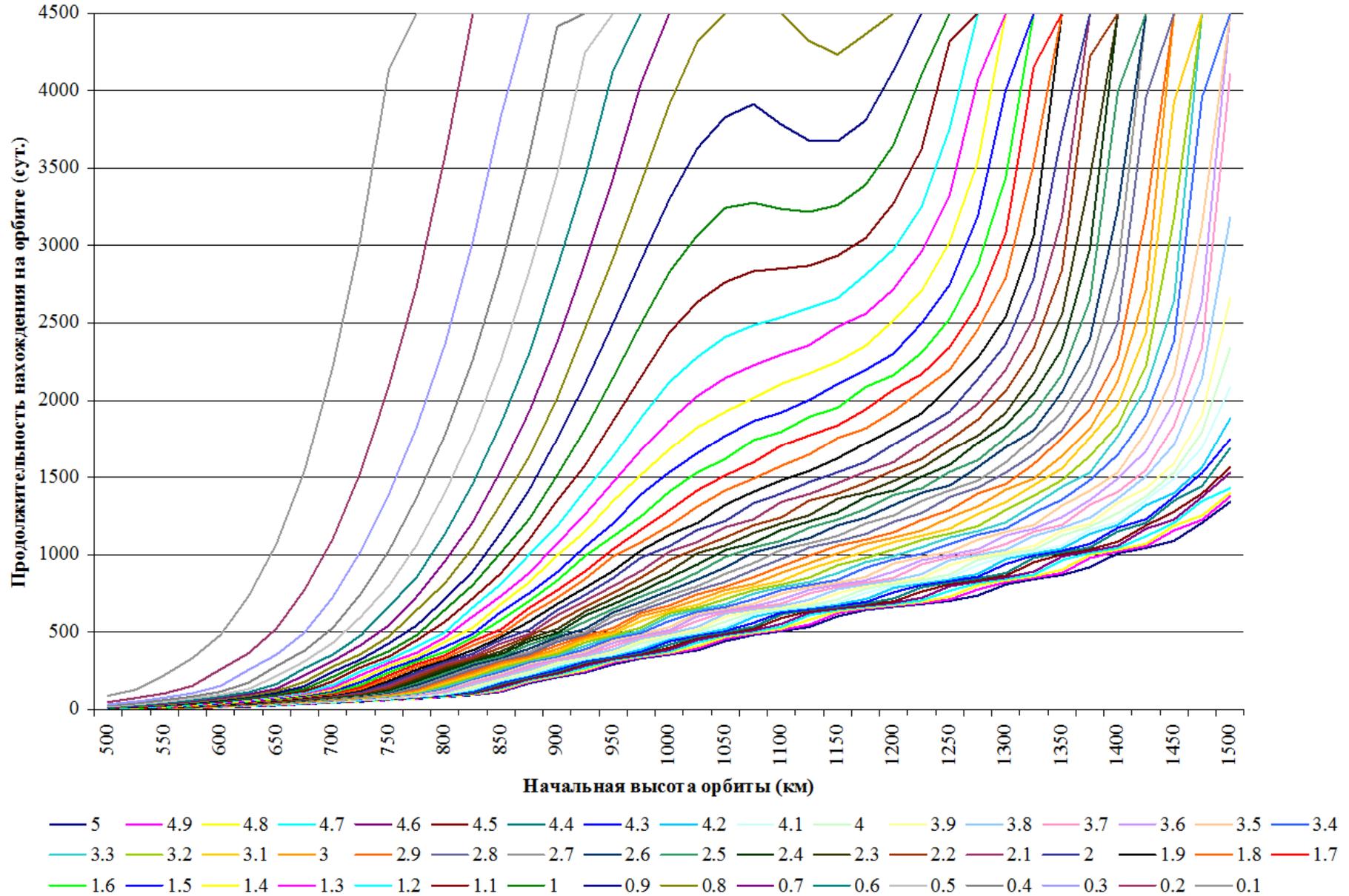


Рис 8. Зависимость времени нахождения частицы на орбите от ее начальной высоты ($i = 64^\circ$, $c_s = 2c_a$).

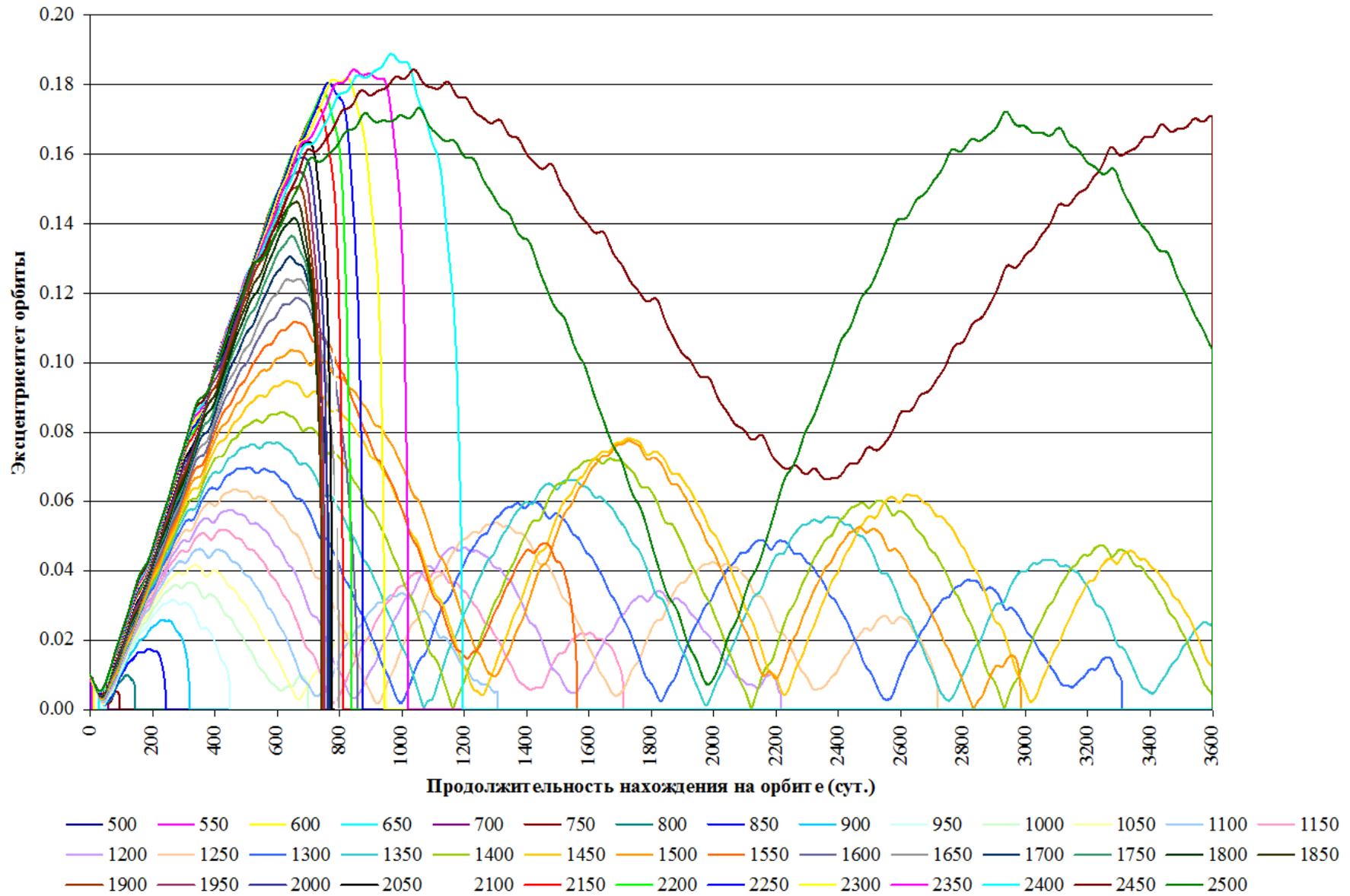


Рис 9. Зависимость времени нахождения частицы на орбите от ее начальной высоты ($i = 51^\circ$, $c_s = c_a = 4.6$).

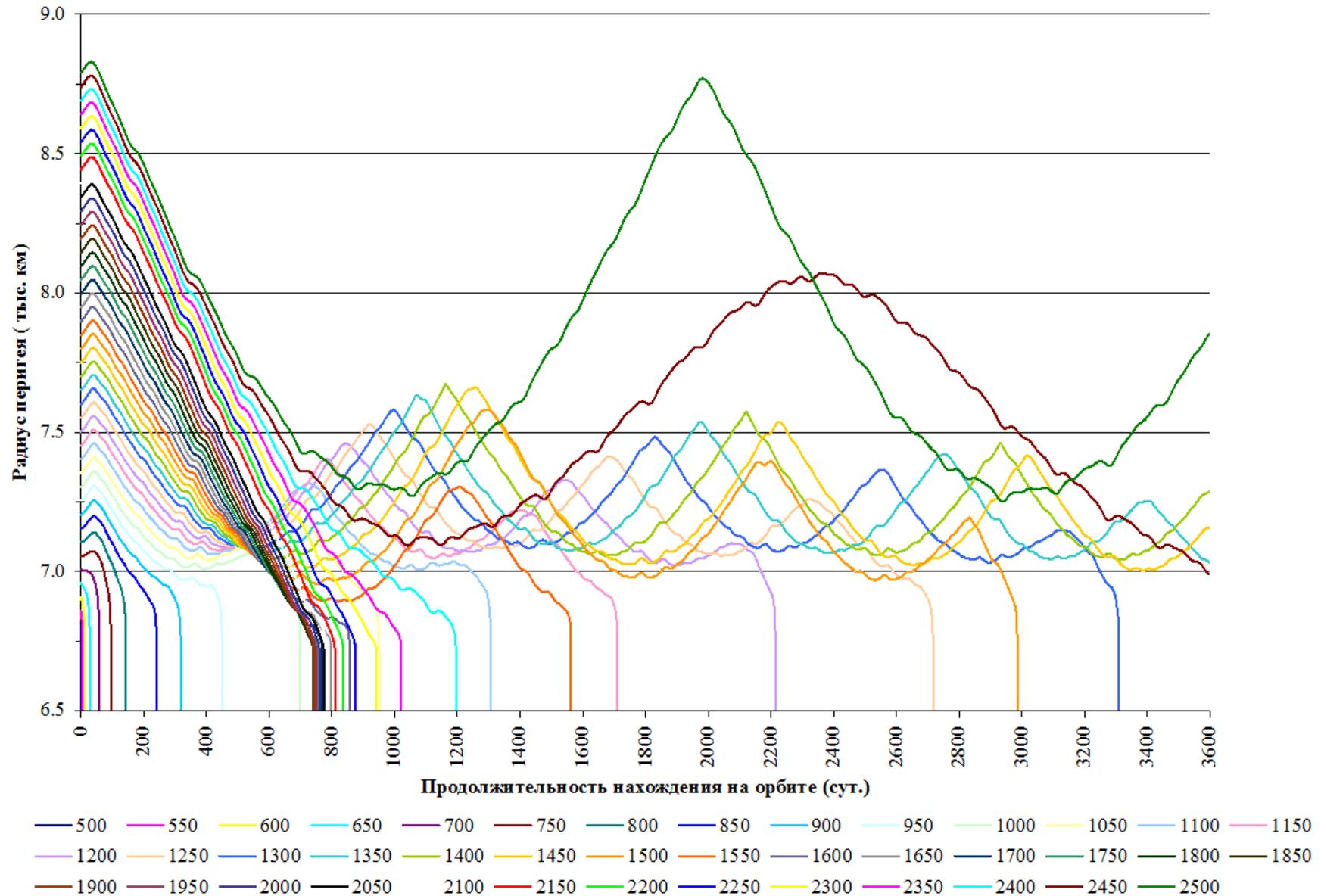


Рис 10. Зависимость времени нахождения частицы на орбите от ее начальной высоты ($i = 51^\circ$, $c_s = c_a = 4.6$).

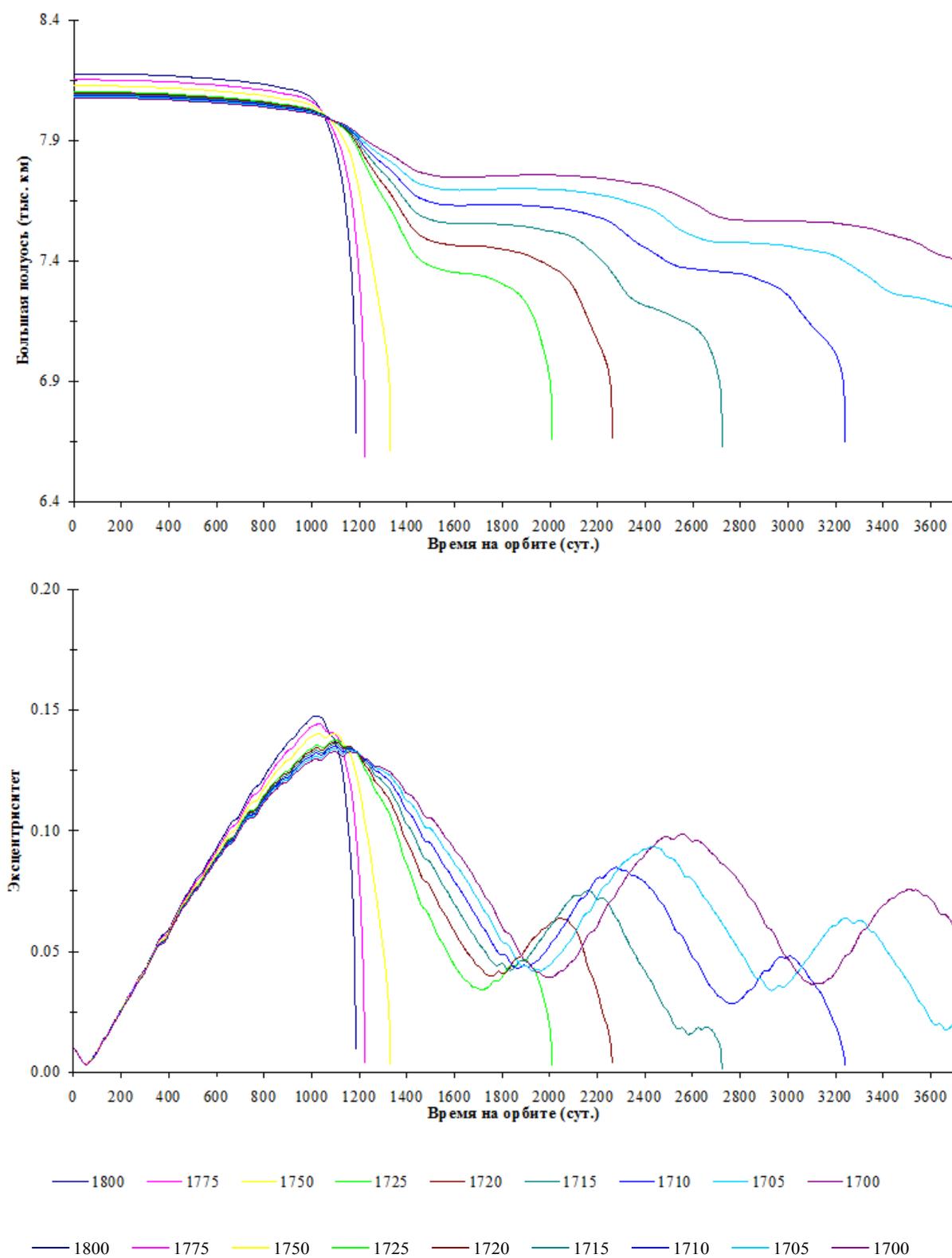


Рис 11а. Эволюция элементов орбит группы частиц с различными начальными высотами ($c_a = 1.6$, $c_s = 3.2$).

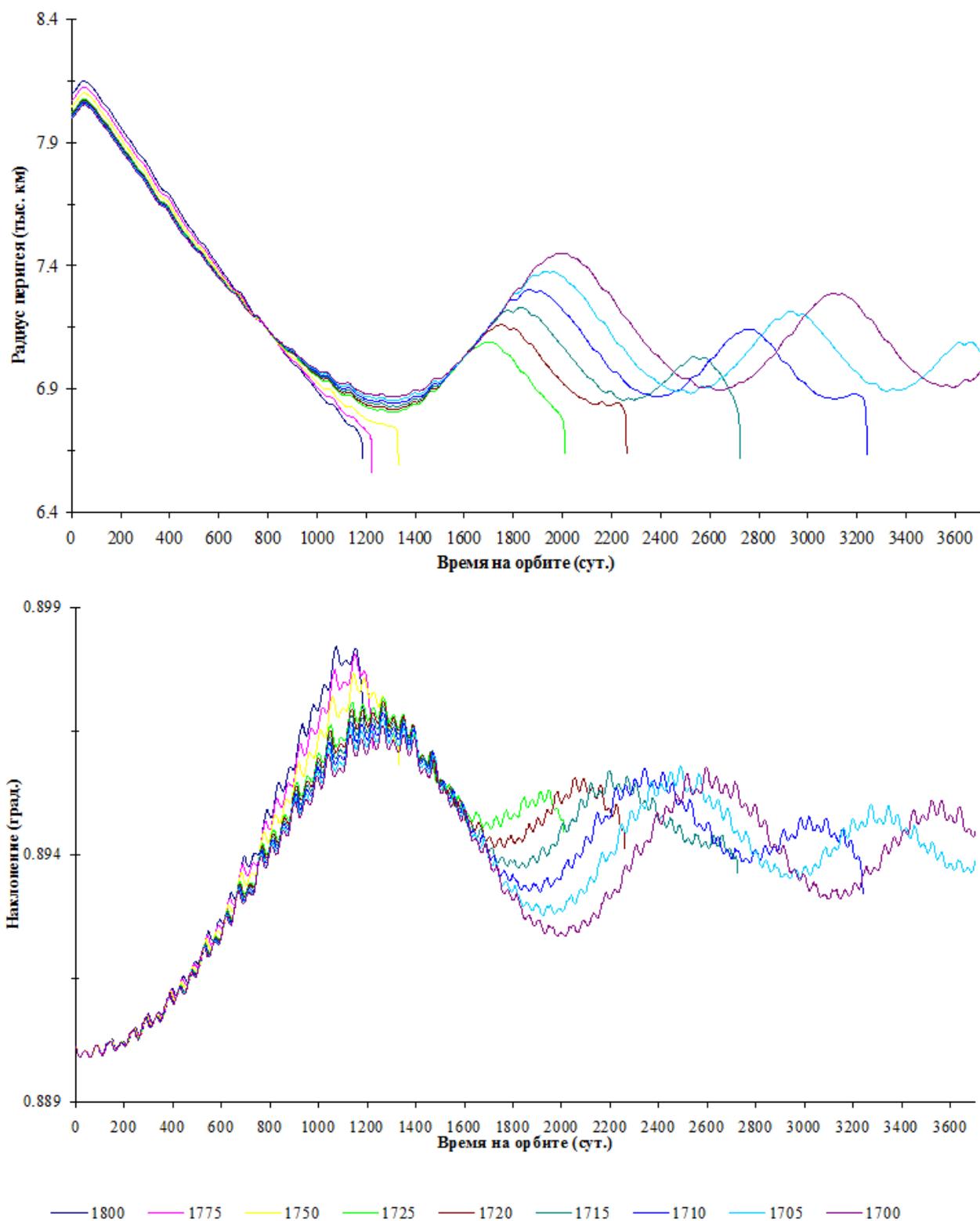


Рис 11б. Эволюция элементов орбит группы частиц с различными начальными высотами ($c_a = 1.6$, $c_s = 3.2$).

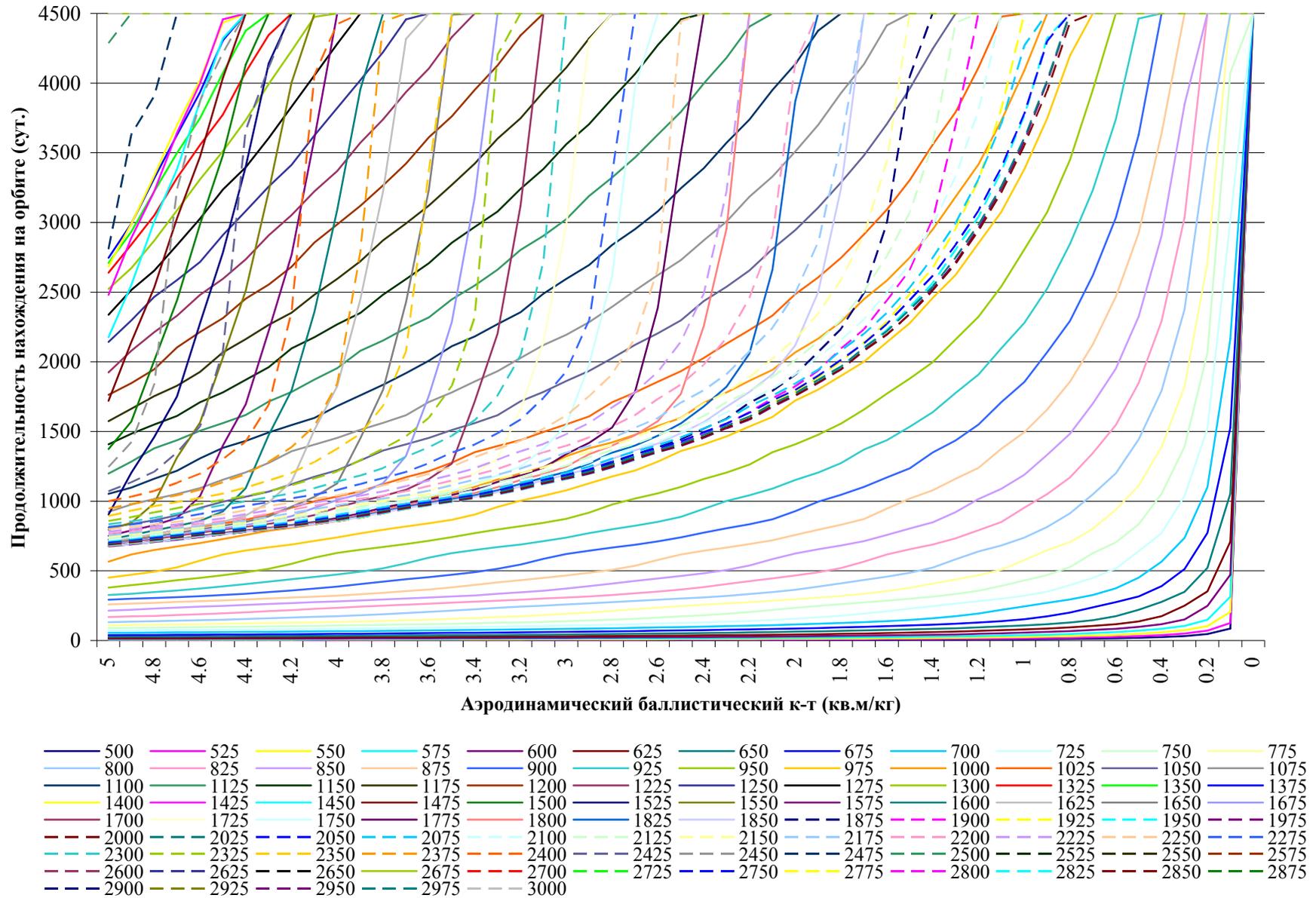


Рис 12. Зависимость времени существования частицы от ее баллистического коэффициента c_a ($i = 51^\circ$, $c_s = c_a$).

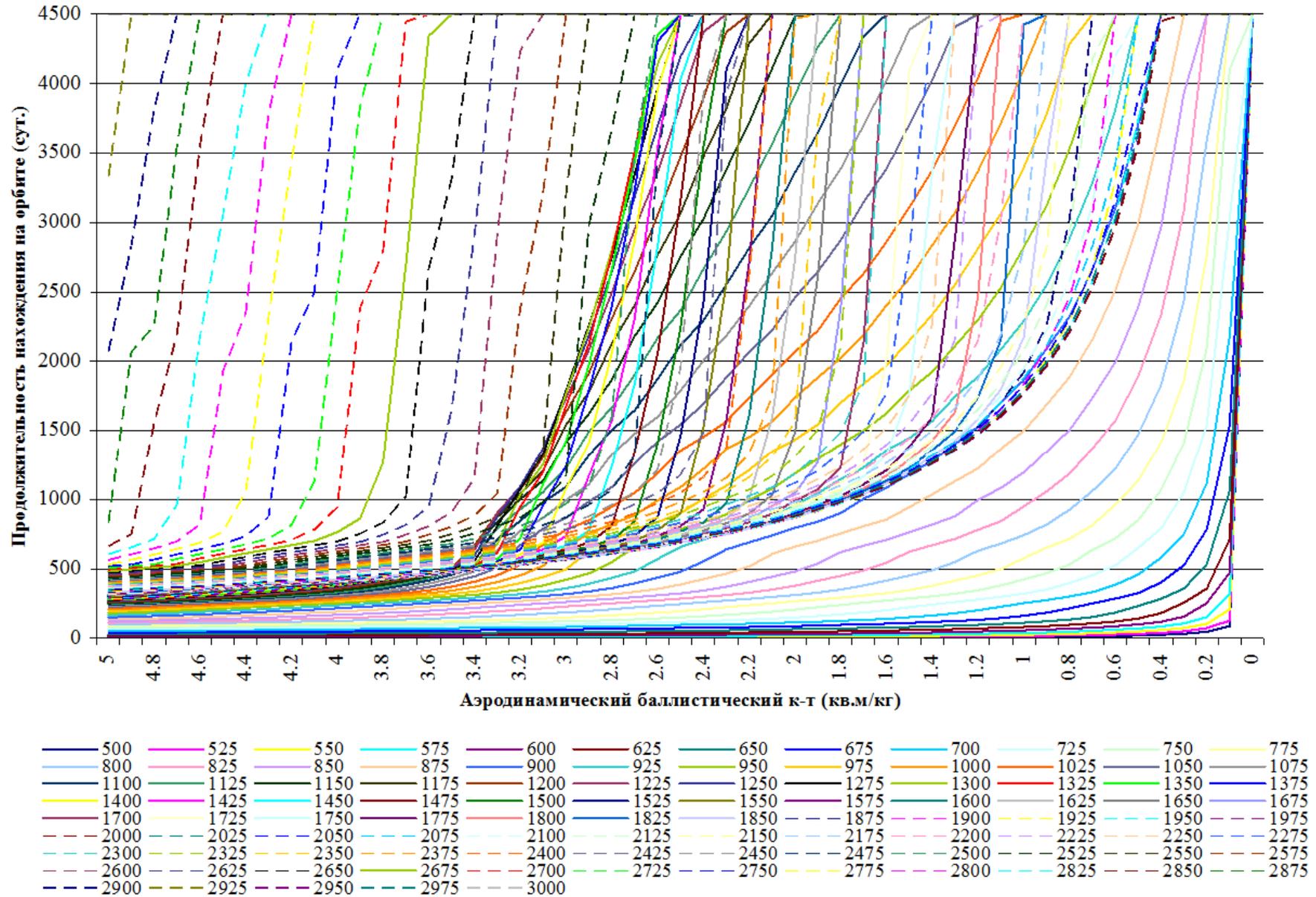


Рис 13. Зависимость времени существования частицы от ее баллистического коэффициента c_a ($i = 51^\circ$, $c_s = 2c_a$)

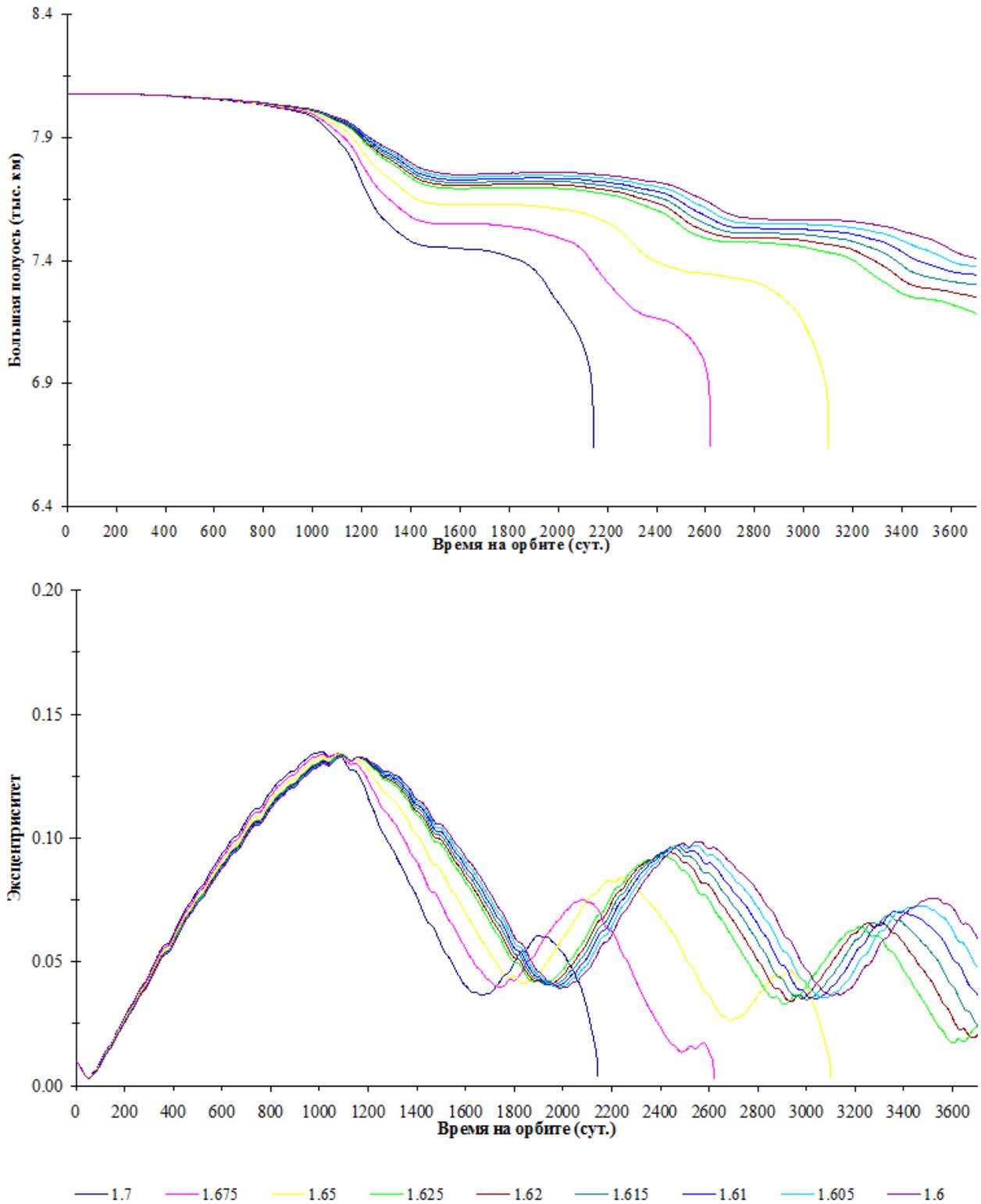


Рис 14а. Эволюция элементов орбит частиц с различными баллистическими коэффициентами ($h = 1500$ км, $c_s = 2c_a$).

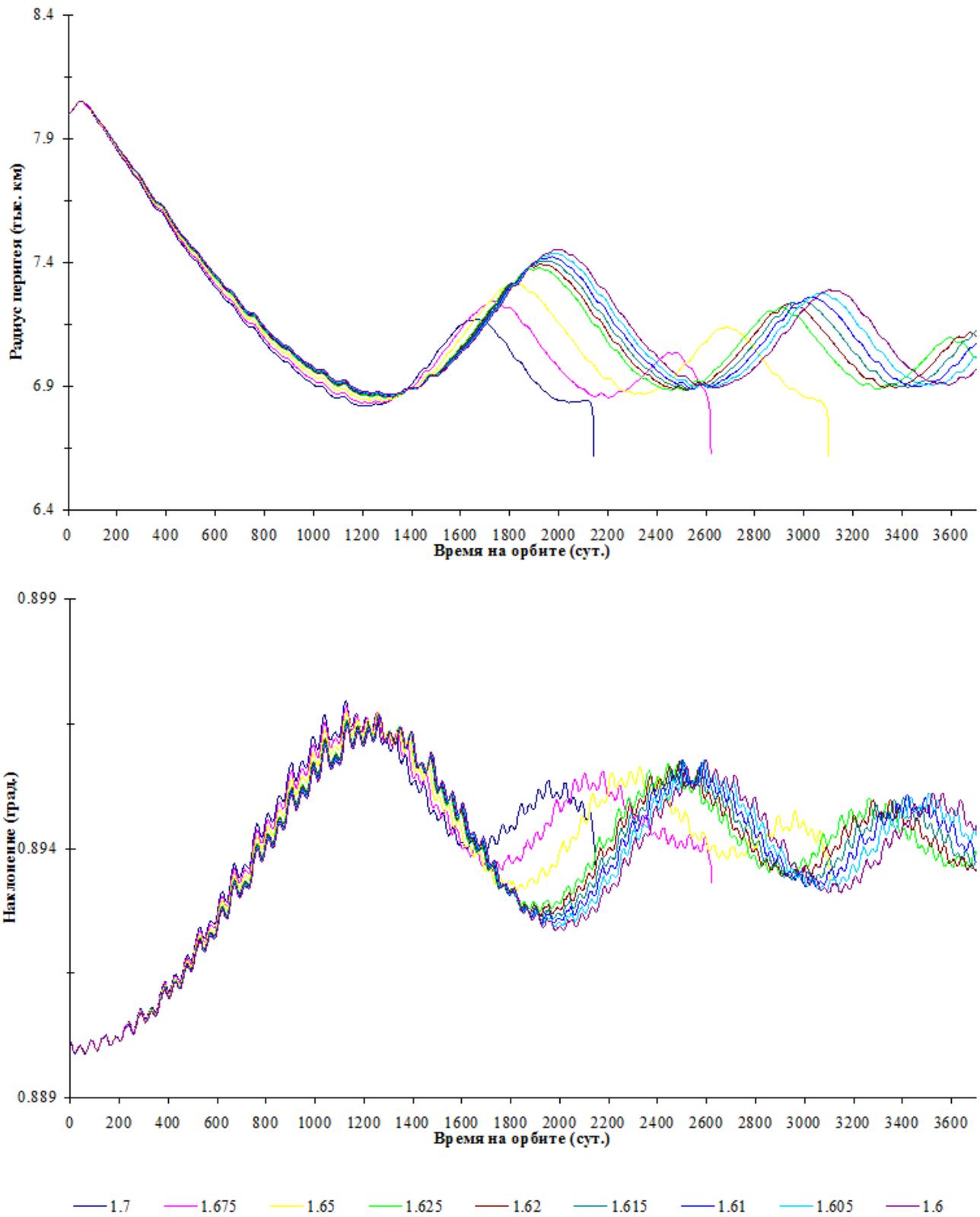


Рис 14б. Эволюция элементов орбит частиц с различными баллистическими коэффициентами ($h = 1500$ км, $c_s = 2c_a$)

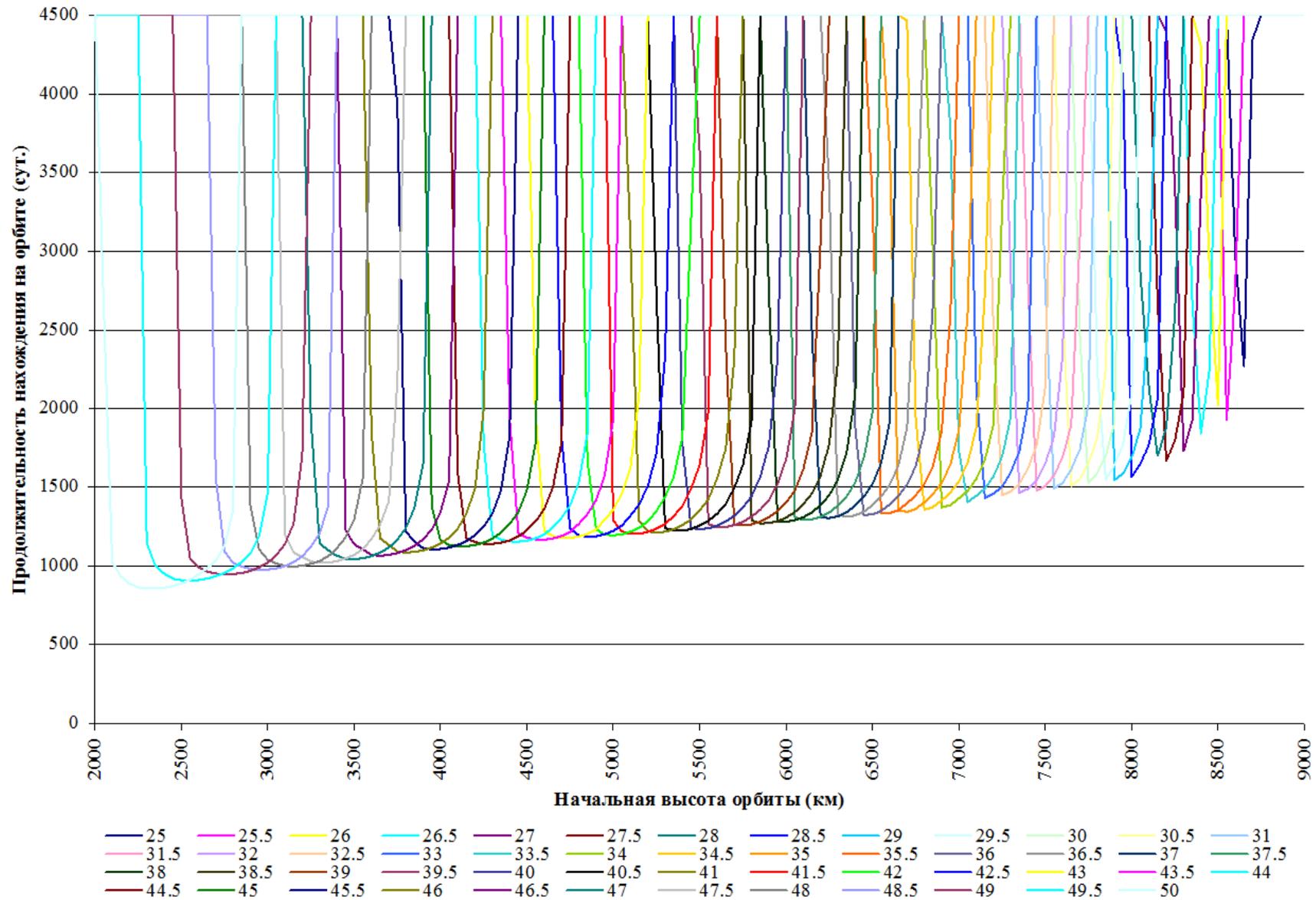


Рис 15. Зависимость времени существования частицы от ее начальной высоты $25^\circ \leq i \leq 50^\circ$ ($e = 0.01$, $c_s = c_a = 4.6$).

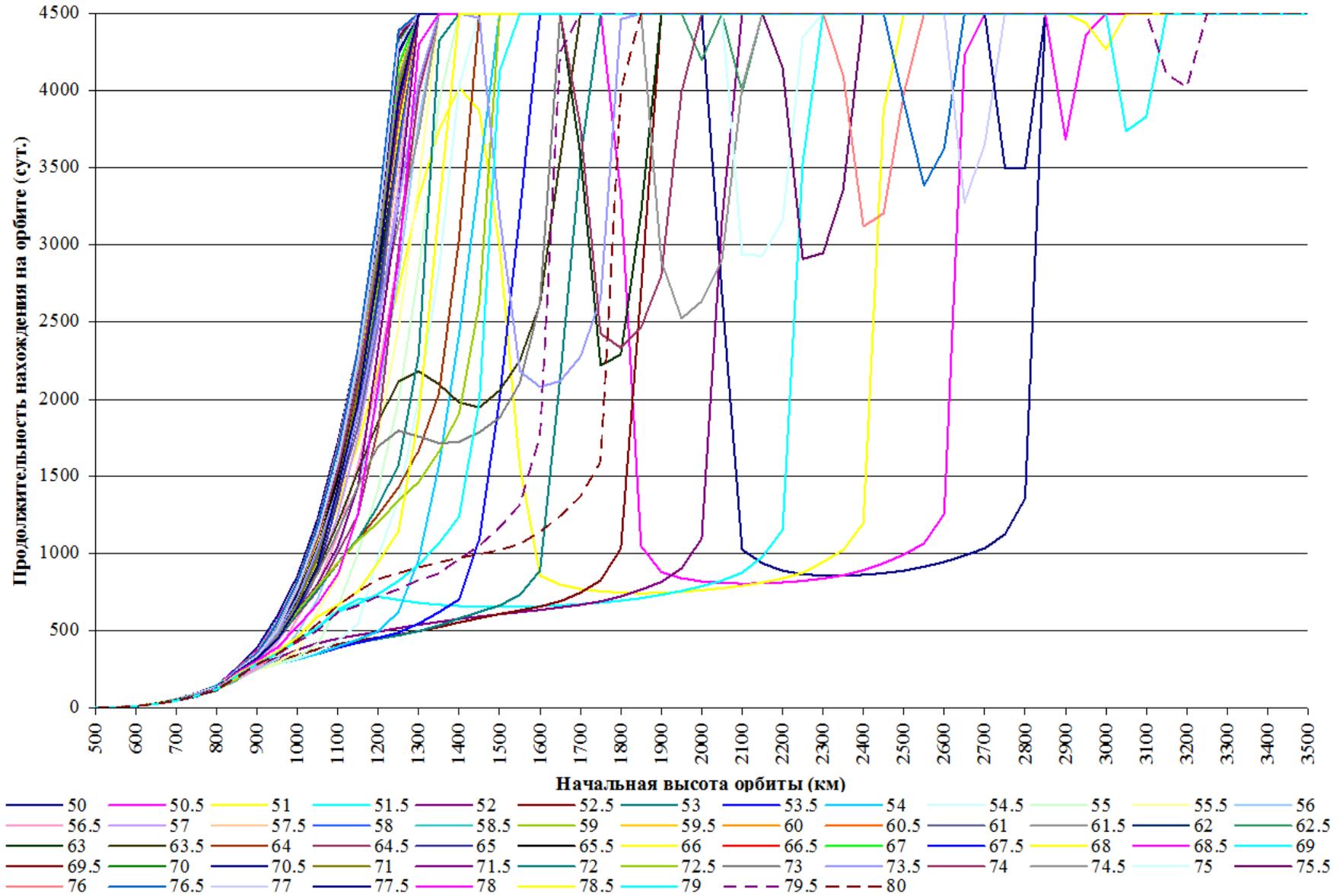


Рис 16. Зависимость времени существования частицы от ее начальной высоты при $50^\circ \leq i \leq 80^\circ$ ($e = 0.01$, $c_s = c_a = 4.6$).

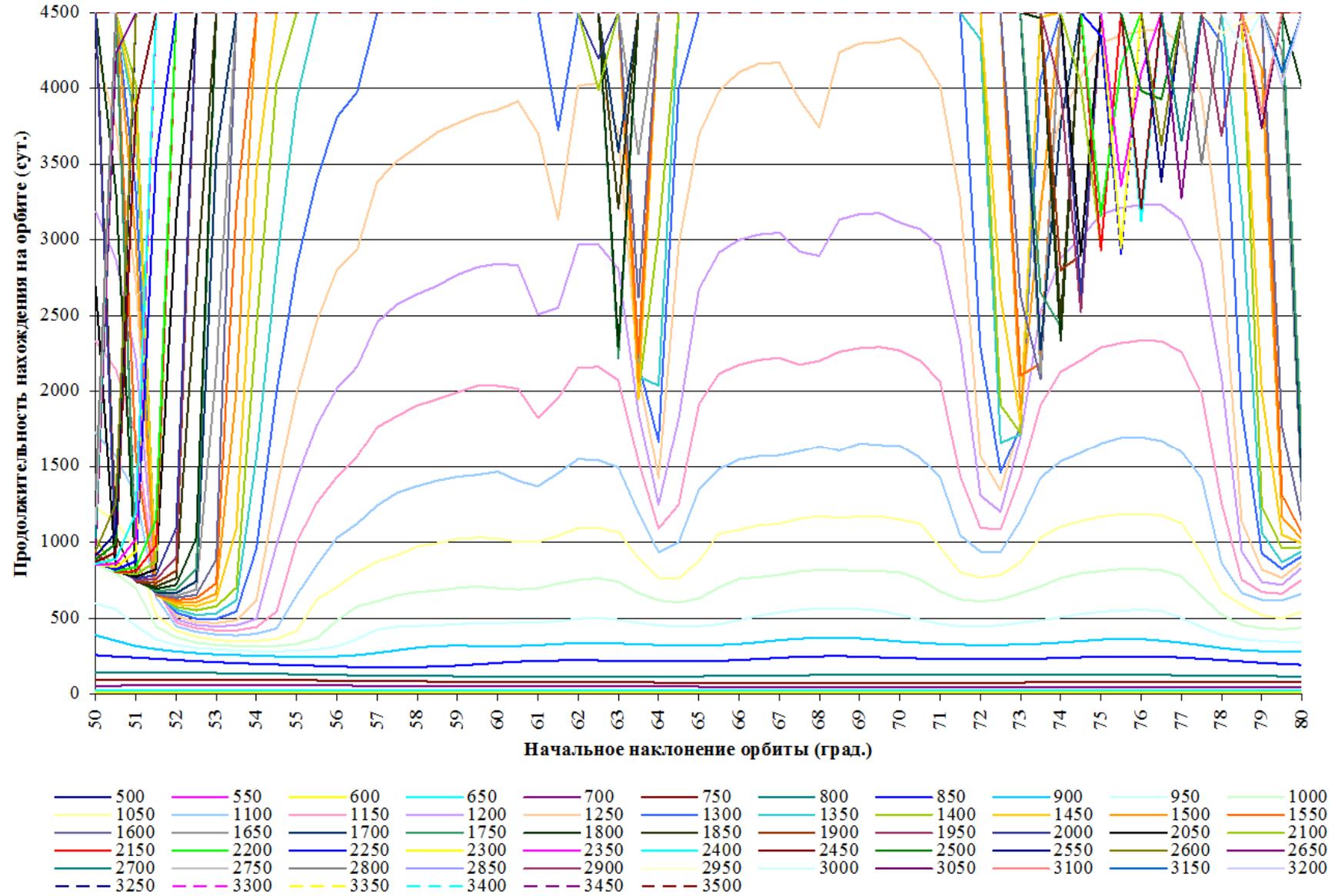


Рис 17. Зависимость времени существования частицы ее начального наклонения ($e = 0.01$, $c_s = c_a = 4.6$).

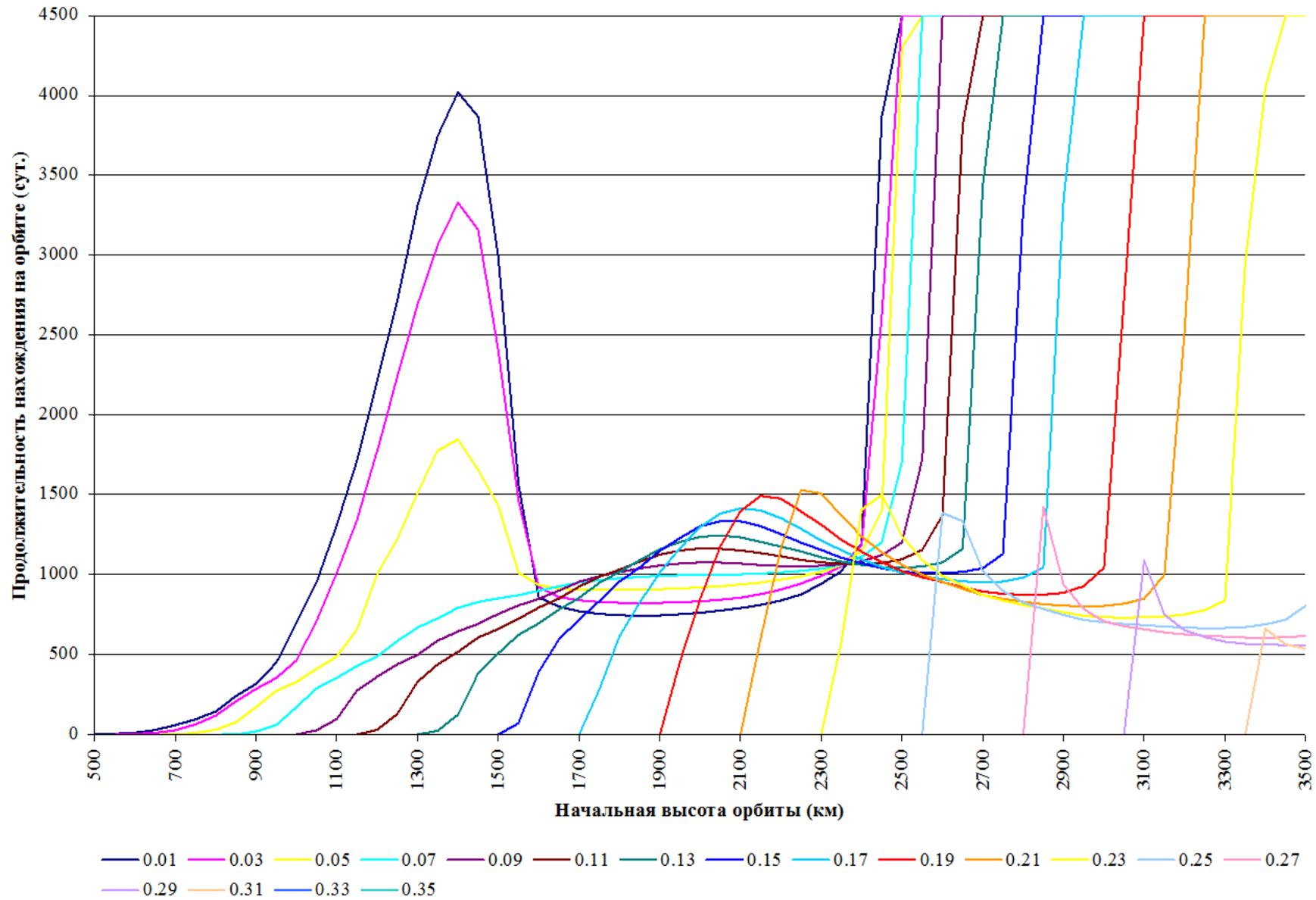


Рис 18. Зависимость времени существования частицы от ее начальной высоты при $0.01 \leq e \leq 0.35$ ($i = 51^\circ$, $c_s = c_a = 4.6$).

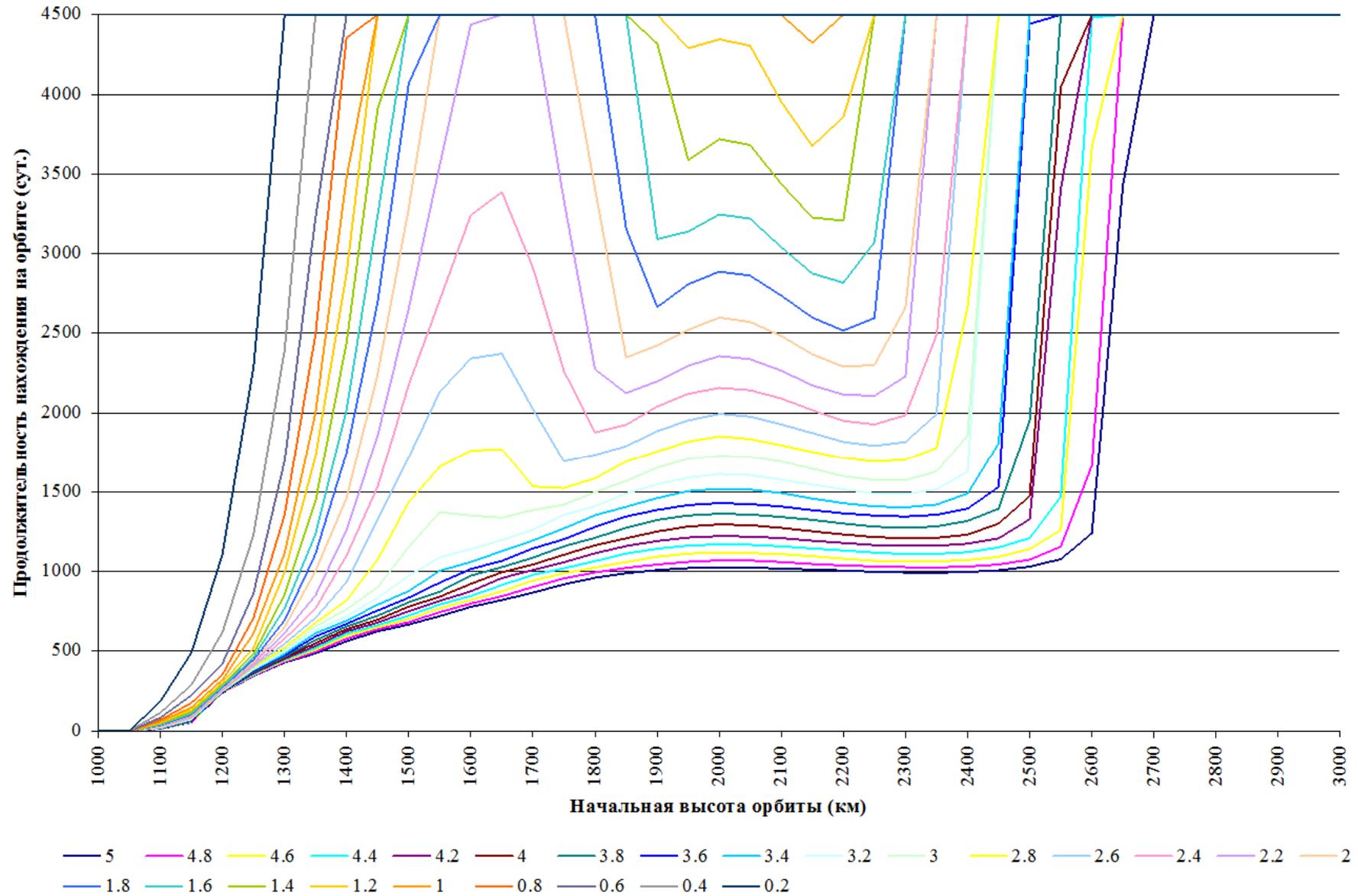


Рис 19. Зависимость времени существования частицы от баллистического коэффициента c_a ($e = 0.1$, $i = 51^\circ$, $c_s = c_a$).

Подписано в печать 08.12.2010. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,86. Тираж 59 экз. Заказ 104.
ИПМ им.М.В.Келдыша РАН. 125047, Москва, Миусская пл., 4.

© ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, 2010