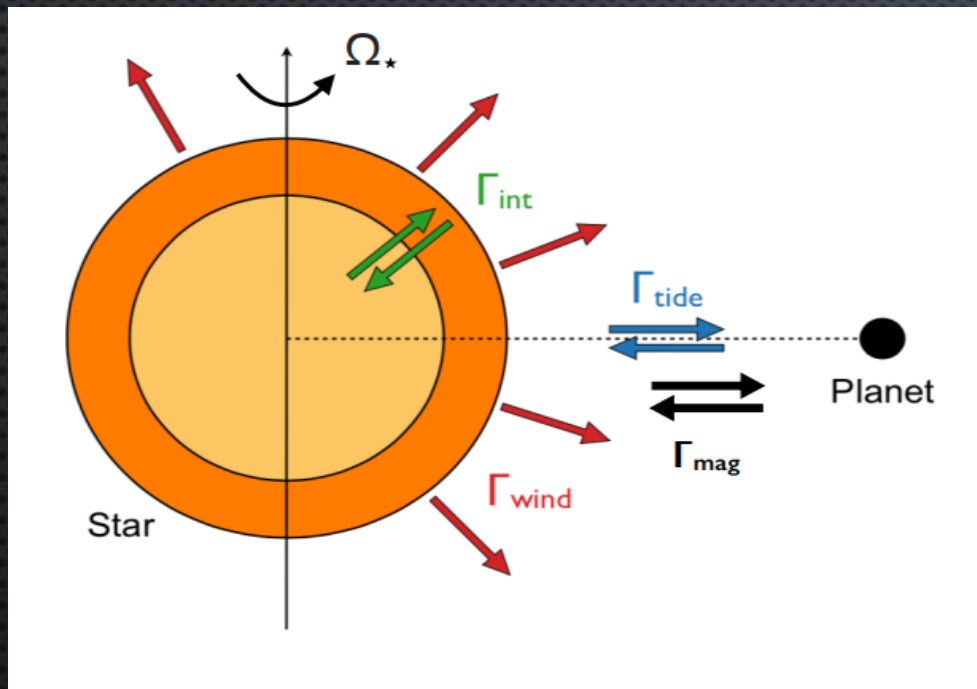


# ПРИЛИВНАЯ ДИССИПАЦИЯ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА ДИНАМИКУ СИСТЕМ С ЭКЗОПЛАНЕТАМИ

ЛАЗОВИК ЯРОСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ

# ТИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМАХ «ЗВЕЗДА-ПЛАНЕТА»



1. ВНУТРЕННИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗВЕЗДАХ
2. ЗВЕЗДНЫЙ ВЕТЕР
3. ПРИЛИВНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
4. МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
5. ПОТЕРЯ ВЕЩЕСТВА:
  - ФОТОИСПАРЕНИЕ
  - ПЕРЕНОС ВЕЩЕСТВА ЧЕРЕЗ ПОЛОСТЬ РОША



# ПРИЛИВНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

1. КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ПРИЛИВЫ ( $Q'_{eq}$ )

2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИЛИВЫ

- ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ ( $Q'_{iw}$ ) –  
ПРИ  $2P_{orb} > P_{rot}$
- ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ( $Q'_{gw}$ ) –  
ПРИ  $M_{pl} > M_{crit}(P_{orb}, M_*, t)$

$$\frac{1}{Q'} = \frac{1}{Q'_{eq}} + \frac{1}{Q'_{iw}} + \frac{1}{Q'_{gw}}$$

$$\frac{1}{a} \left( \frac{da}{dt} \right)_t = \frac{\Omega_* - n}{|\Omega_* - n|} \frac{9n}{2} \left( \frac{M_{pl}}{M_*} \right) \left( \frac{R_*}{a} \right)^5 \frac{1}{Q'}$$

$Q'$  – ПАРАМЕТР ПРИЛИВНОЙ ДИССИПАЦИИ  
(ОПРЕДЕЛЯЕТ ТЕМП МИГРАЦИИ ПЛАНЕТЫ);

$M_*$  – МАССА ЗВЕЗДЫ;

$R_*$  – РАДИУС ЗВЕЗДЫ;

$I_*$  – МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ЗВЕЗДЫ;

$\Omega_*$  – УГЛОВАЯ ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ ЗВЕЗДЫ;

$M_{pl}$  – МАССА ПЛАНЕТЫ;

$n$  – ОРБИТАЛЬНАЯ УГЛОВАЯ ЧАСТОТА ПЛАНЕТЫ;

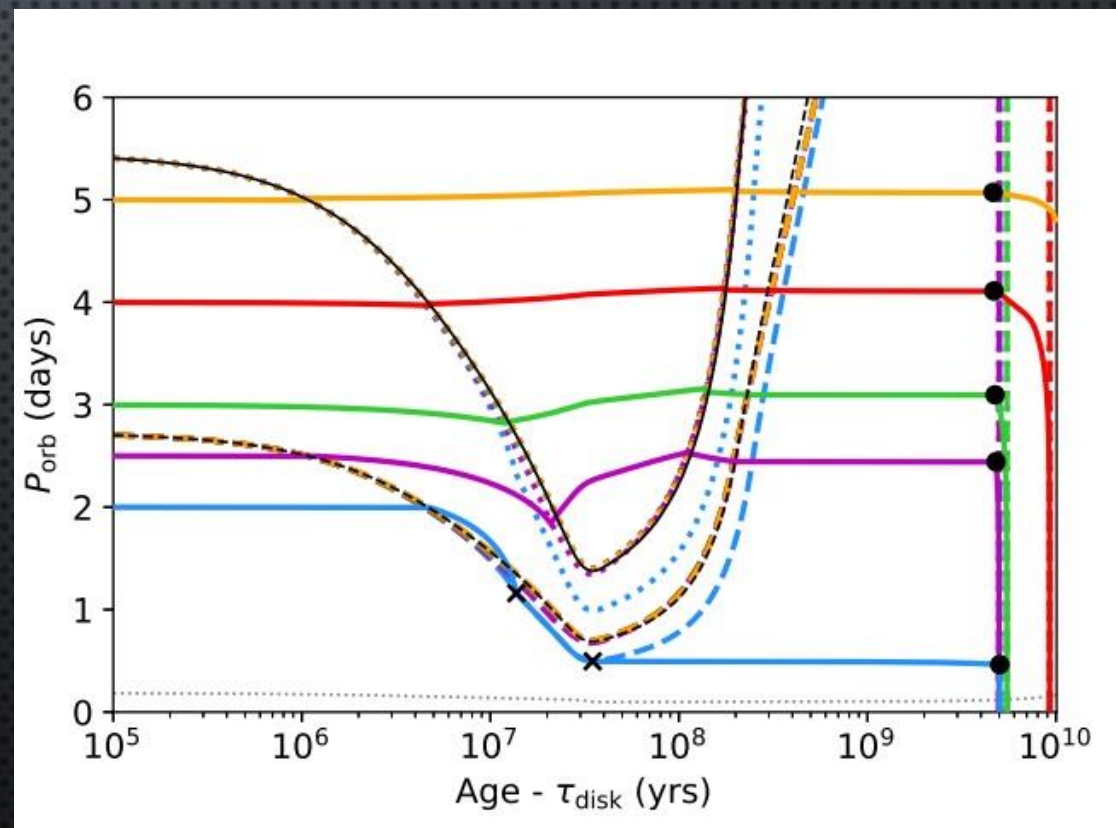
$a$  – ОРБИТАЛЬНЫЙ РАДИУС.

Расчет темпов диссипации приливной энергии – Barker (2020)

## ПРИМЕРЫ ОРБИТАЛЬНЫХ ТРЕКОВ

$M_{pl} = 3M_J$ ,  $M_* = 1M_{\odot}$ , УМЕРЕННОЕ ВРАЩЕНИЕ ( $P_0 = 5.5$  СУТ)

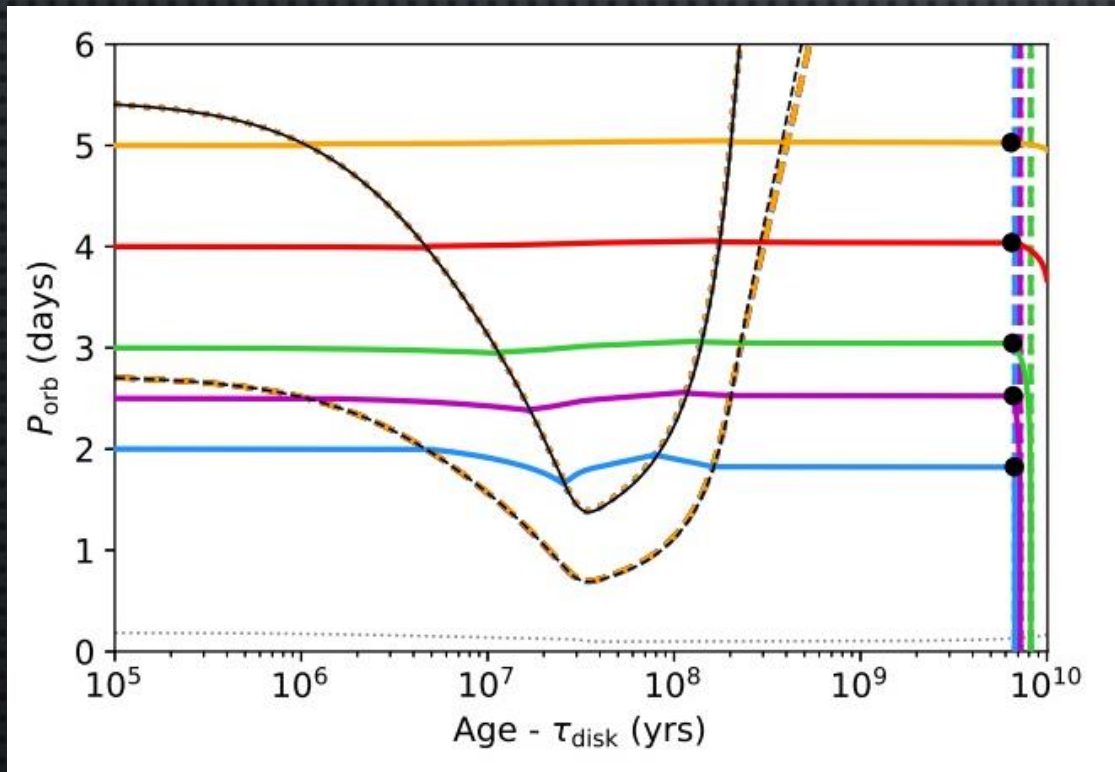
Линия	Обозначение
Черная сплошная	Коротационный радиус одиночной звезды
Черная пунктирная	$P_{orb} = \frac{1}{2}P_{rot}$ (граница возбуждения инерциальных волн)
Цветные сплошные	Орбитальные треки планет
Цветные пунктирные	Возмущенное положение коротационного радиуса и $P_{orb} = \frac{1}{2}P_{rot}$



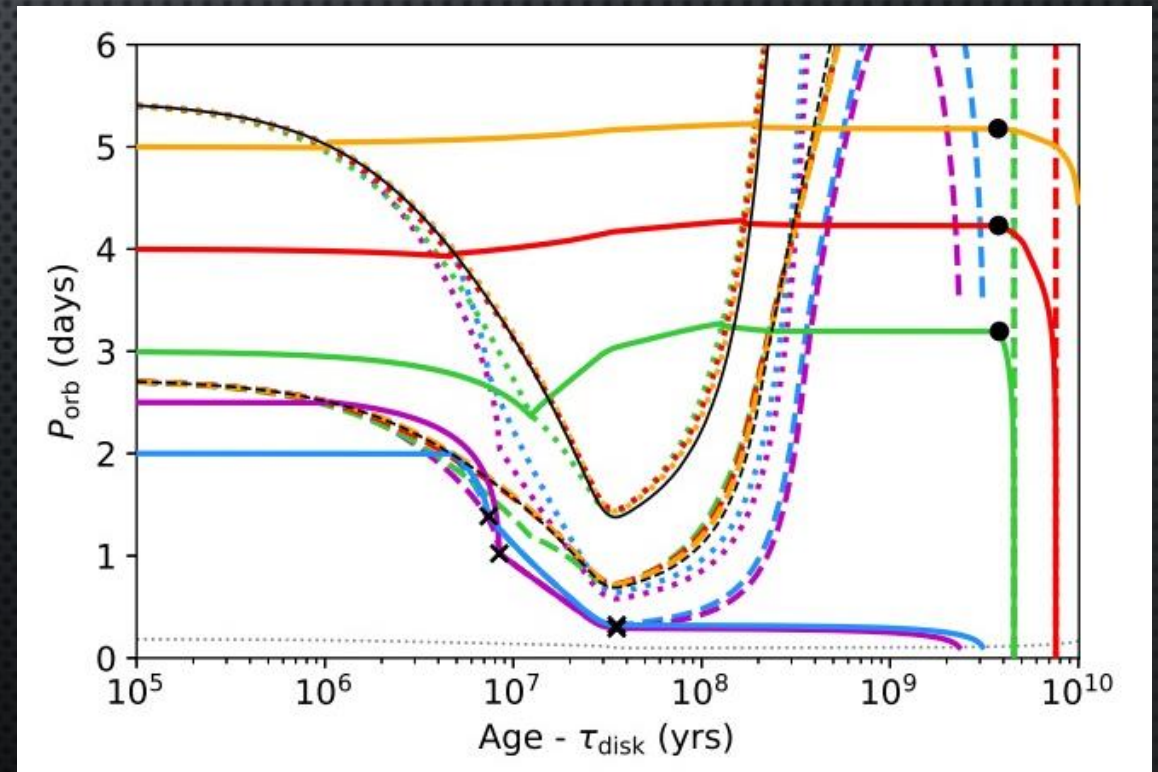


# ВЛИЯНИЕ МАССЫ ПЛАНЕТЫ

$$M_{pl} = 1M_J$$

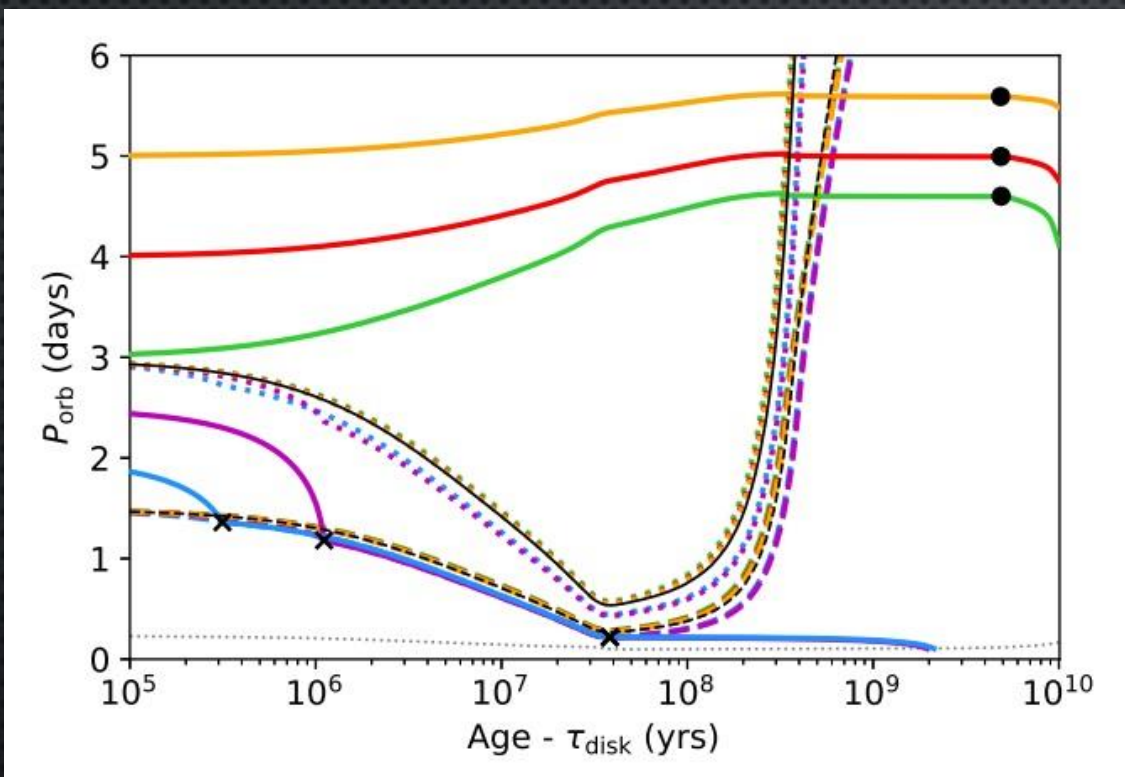


$$M_{pl} = 7M_J$$

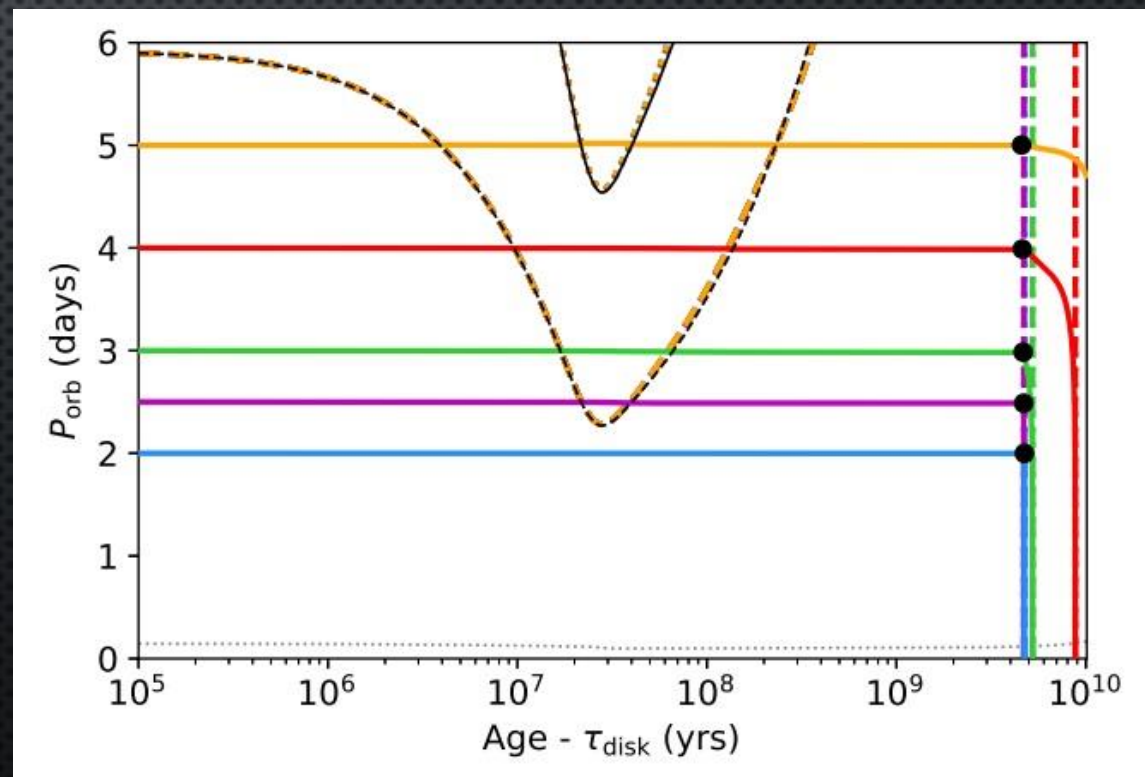


# ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗВЕЗДЫ

Быстрое вращение ( $P_{rot,0} = 3$  сут),  $M_{pl} = 3M_J$



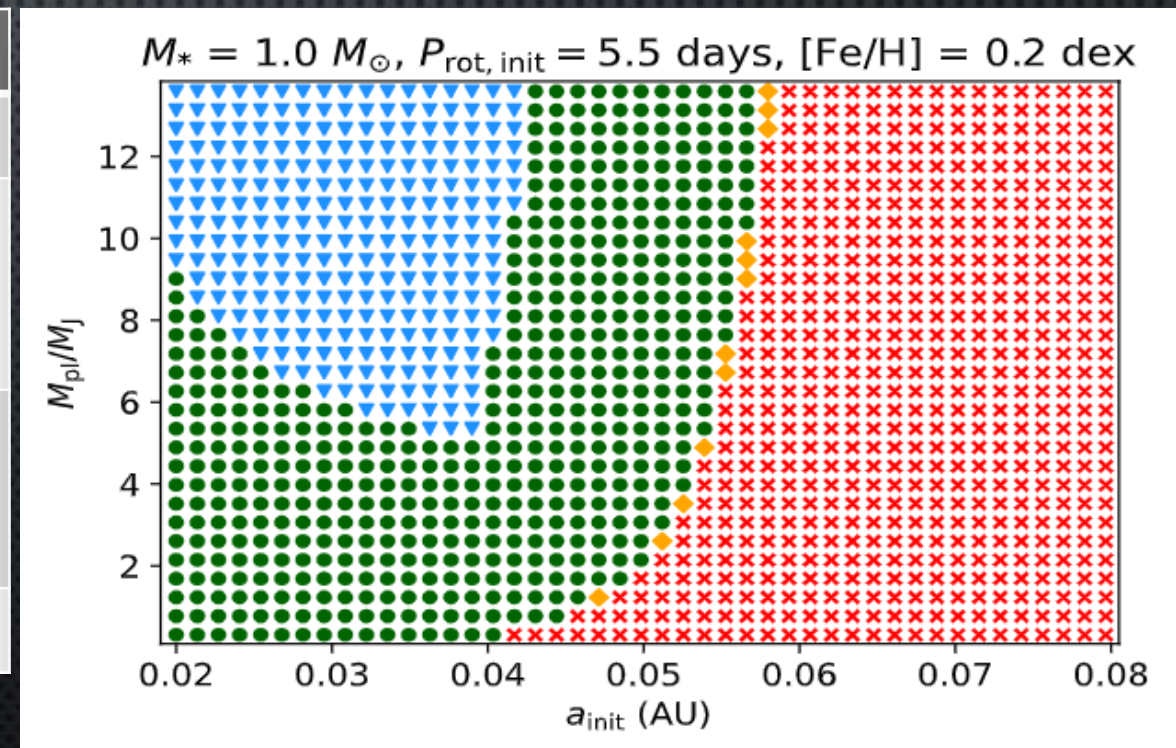
Медленное вращение ( $P_{rot,0} = 12$  сут),  $M_{pl} = 3M_J$





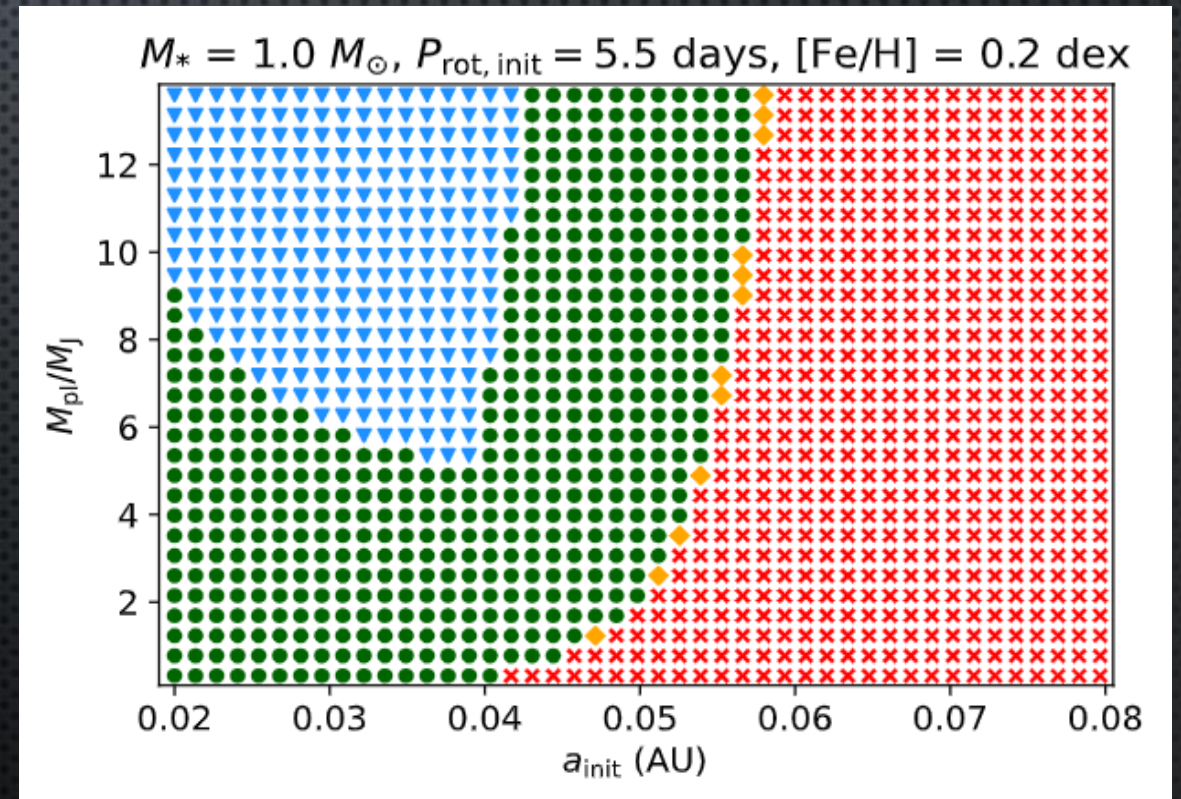
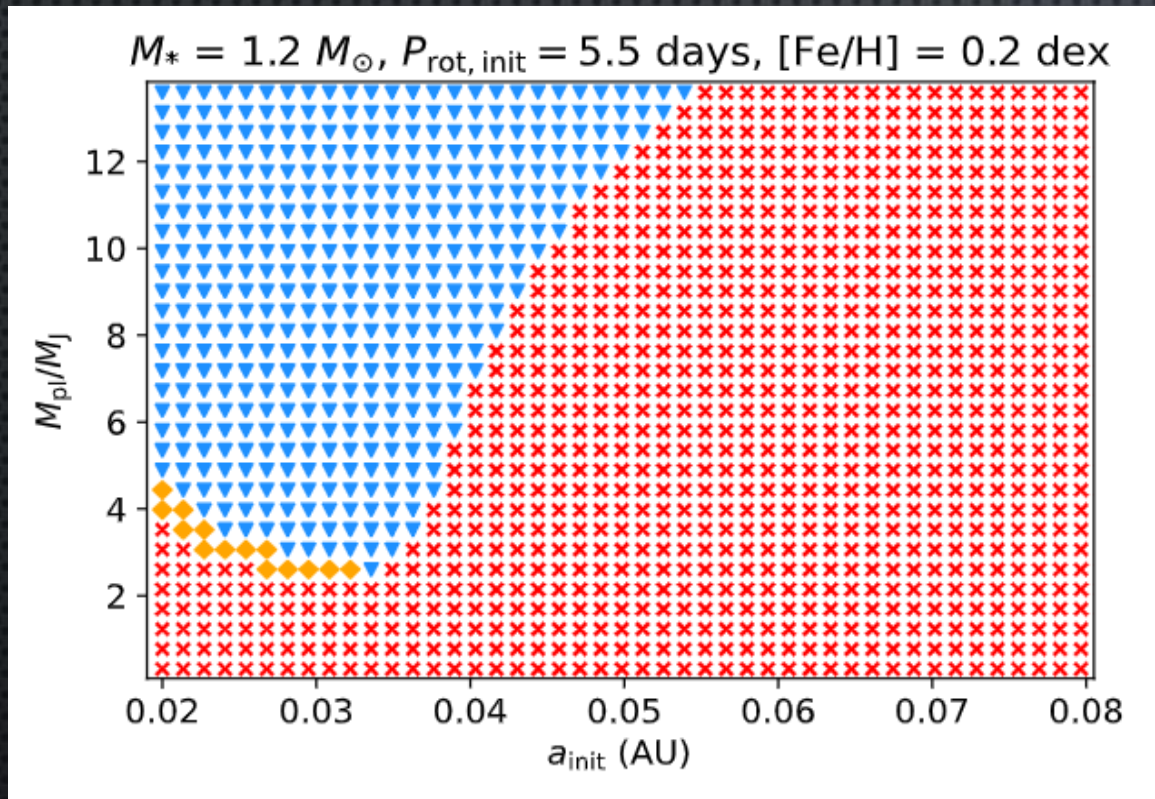
# ДИАГРАММА ВЫПАДЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ

Маркер	Исход
Красный крест	Нет выпадения
Зеленый круг	Выпадение вследствие диссипации гравитационных волн
Синий треугольник	Выпадение до начала диссипации гравитационных волн
Желтый ромб	Промежуточный исход



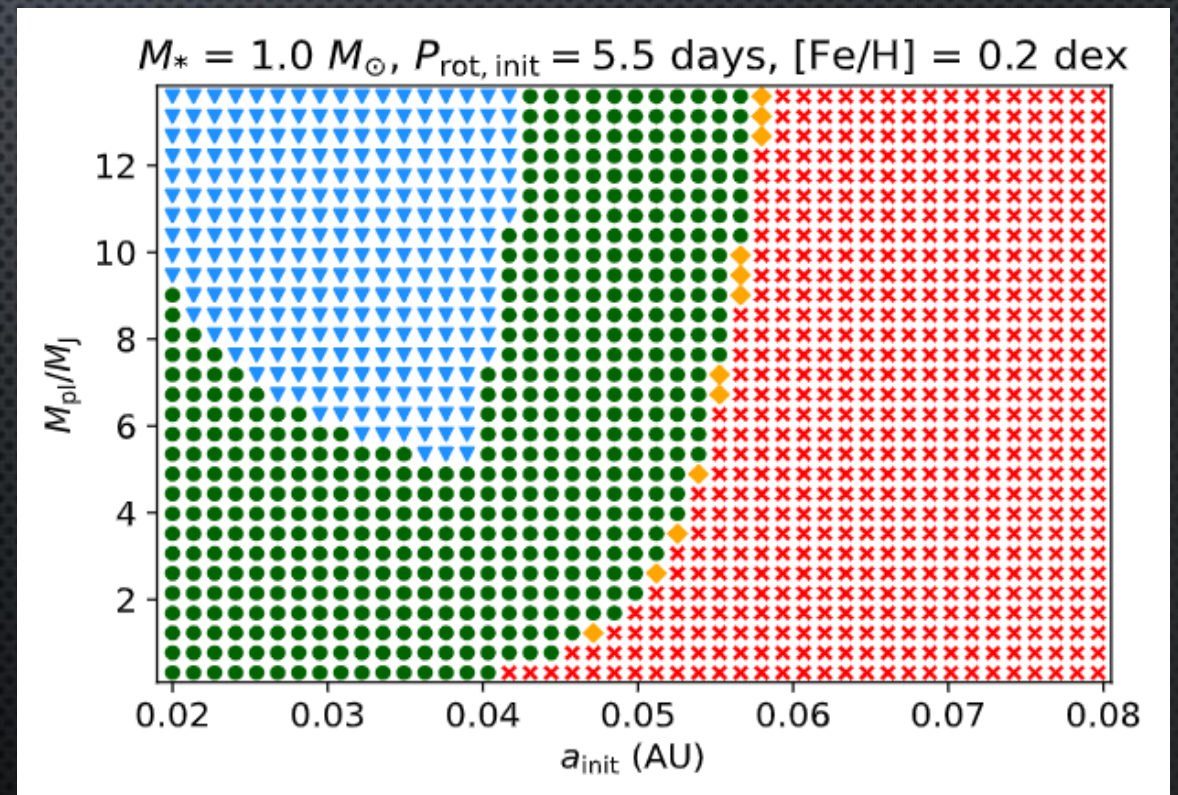
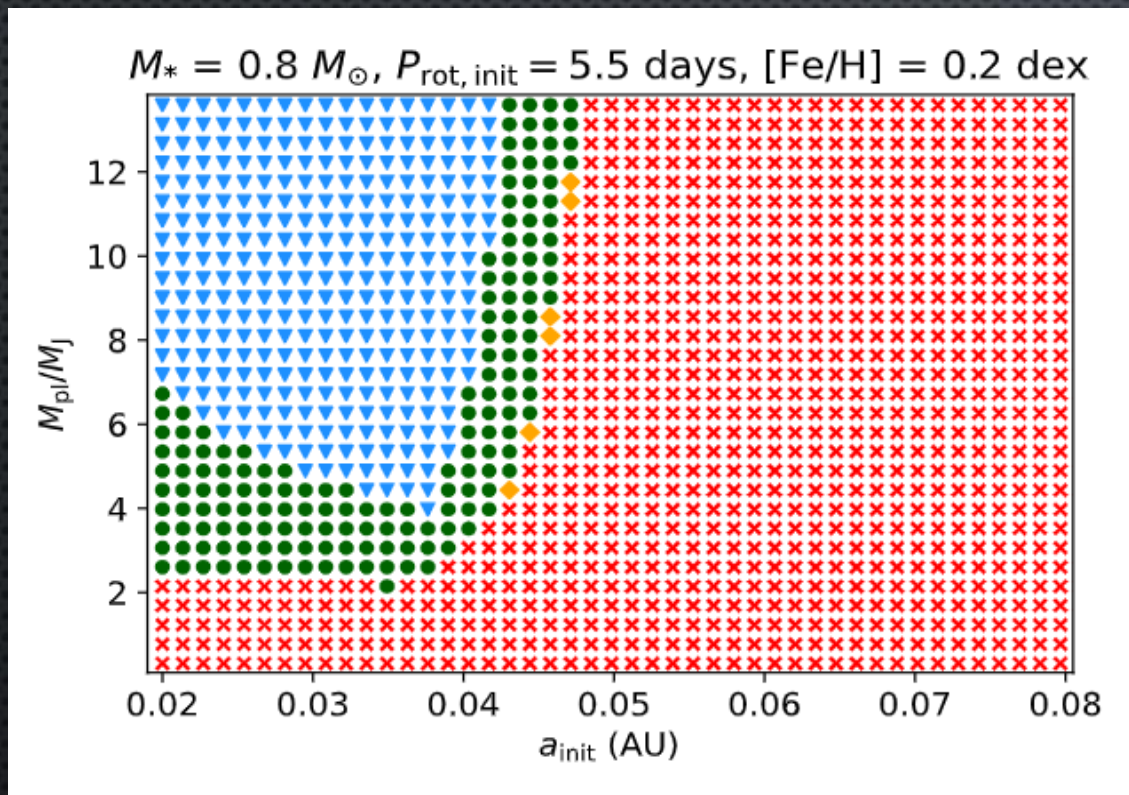


# ДИАГРАММЫ ВЫПАДЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ (ВЛИЯНИЕ МАССЫ ЗВЕЗДЫ)



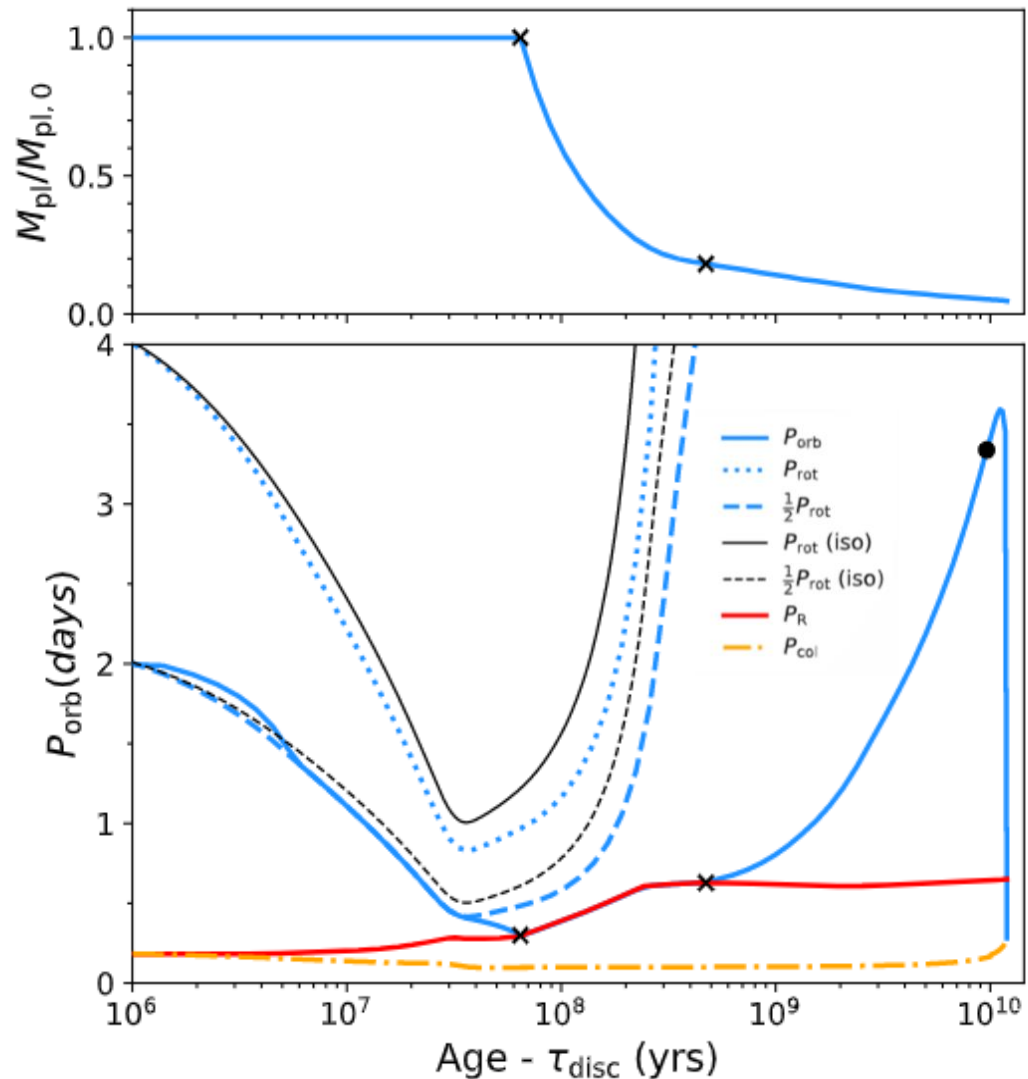


# ДИАГРАММЫ ВЫПАДЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ (ВЛИЯНИЕ МАССЫ ЗВЕЗДЫ)





# УЧЕТ МАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПОТЕРИ ВЕЩЕСТВА

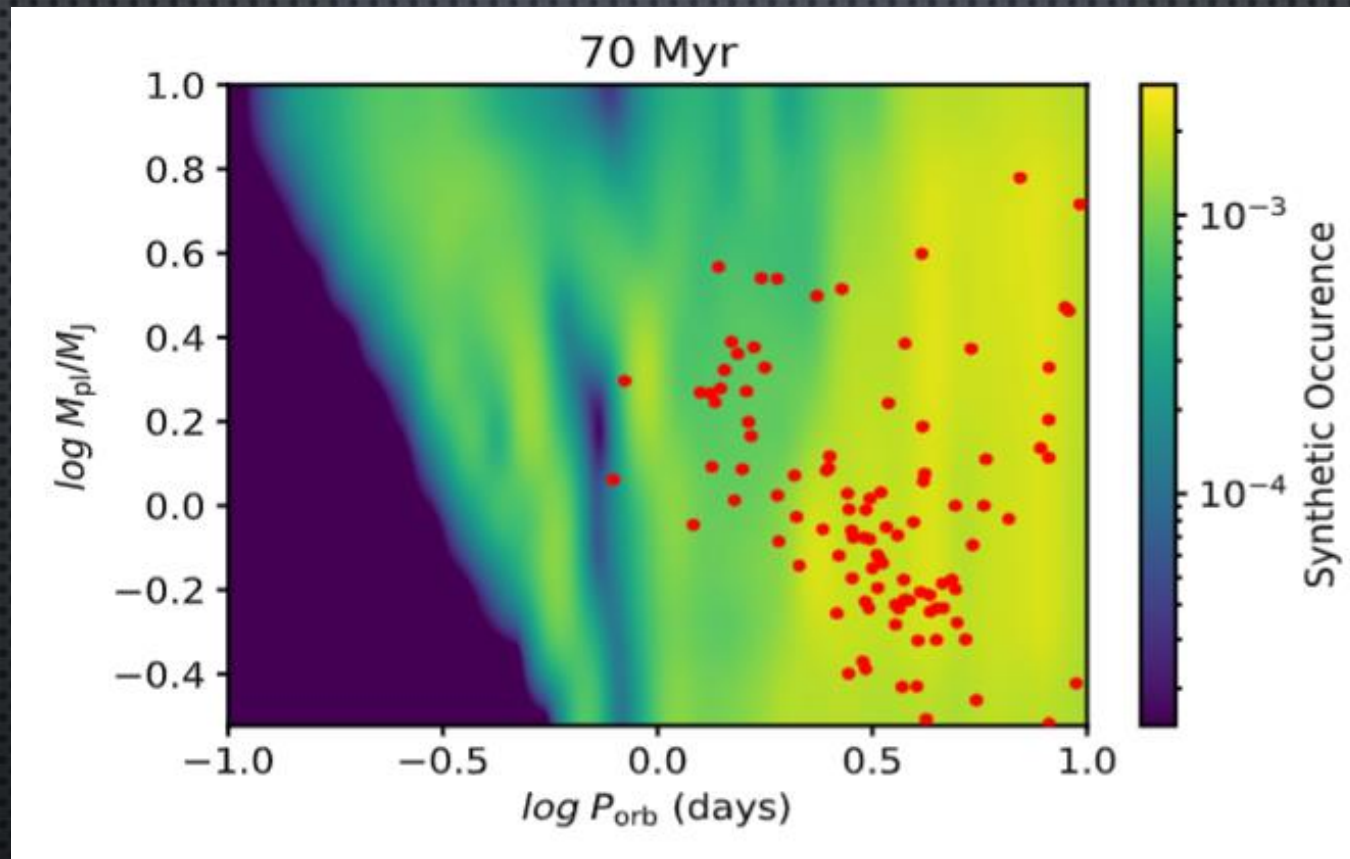


Красная линия – предел Роша;  
Желтая штрих-пунктирная линия – поверхность звезды  
Черная точка – момент начала диссипации гравитационных волн;  
Черные кресты ограничивают фазу переноса вещества через полость Роша.

Эволюция массы и орбитальный трек горячего юпитера с  $M_{\text{pl},0} = 2 M_J$ , обращающегося вокруг звезды солнечной массы с  $P_{\text{rot},0} = 4.5$  сут



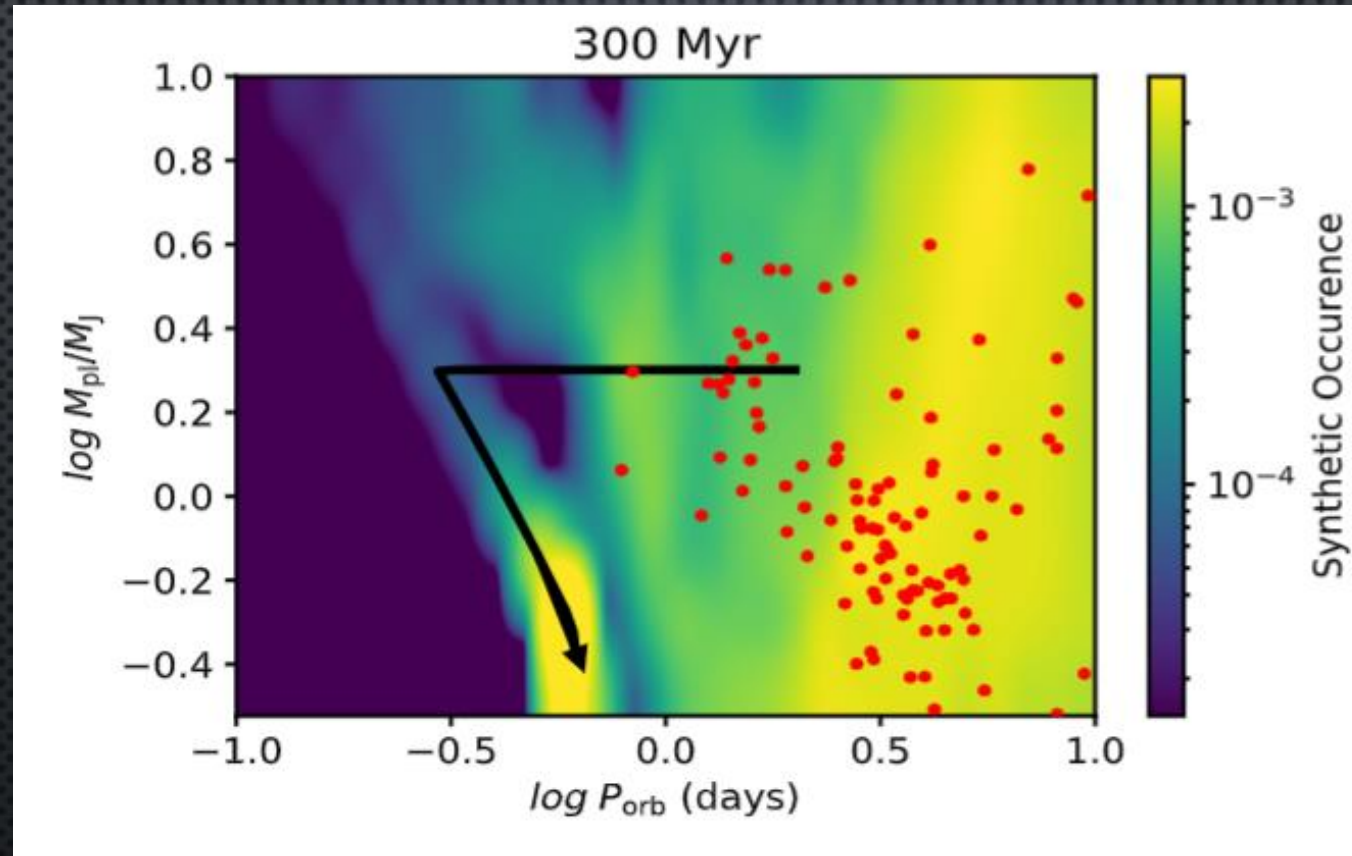
# ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ)



Красные круги – наблюдаемые планеты у звезд с массой в диапазоне  $[0.95, 1.05] M_{\odot}$

Системы имеют равный возраст и наблюдаемы вне зависимости от своего положения

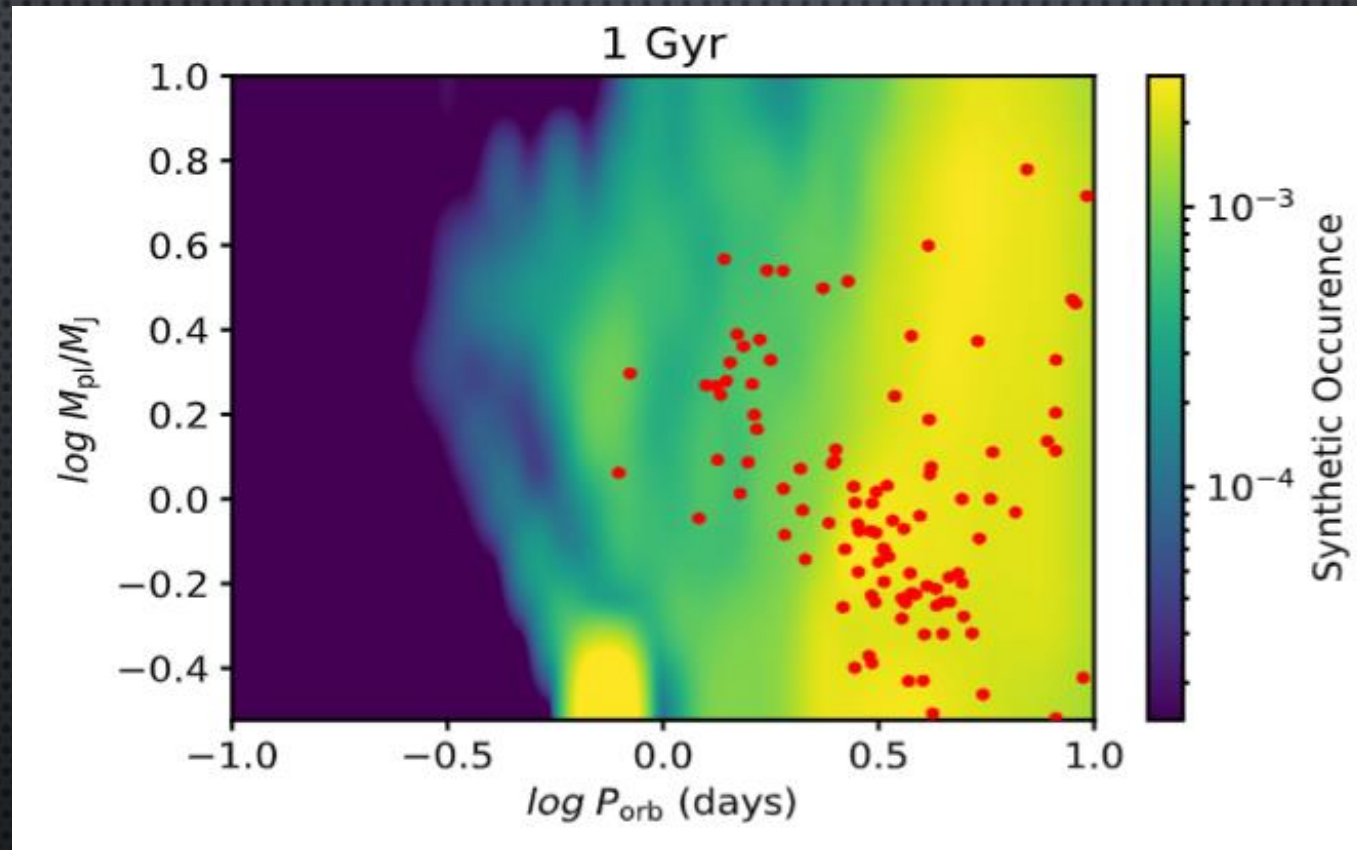
# ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ)



Красные круги – наблюдаемые планеты у звезд с массой в диапазоне  $[0.95, 1.05] M_{\odot}$

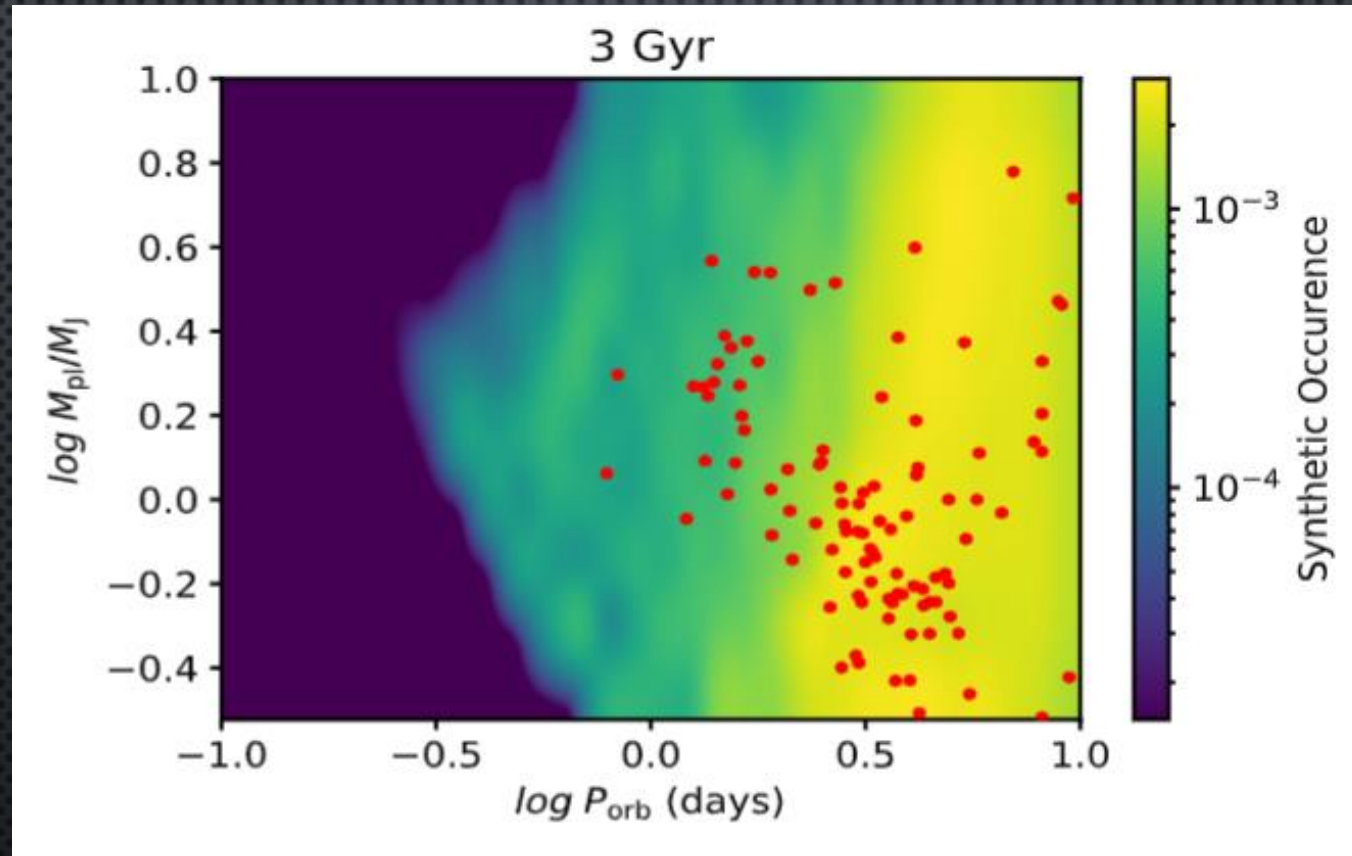


# ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ)



Красные круги – наблюдаемые планеты у звезд с массой в диапазоне  $[0.95, 1.05] M_{\odot}$

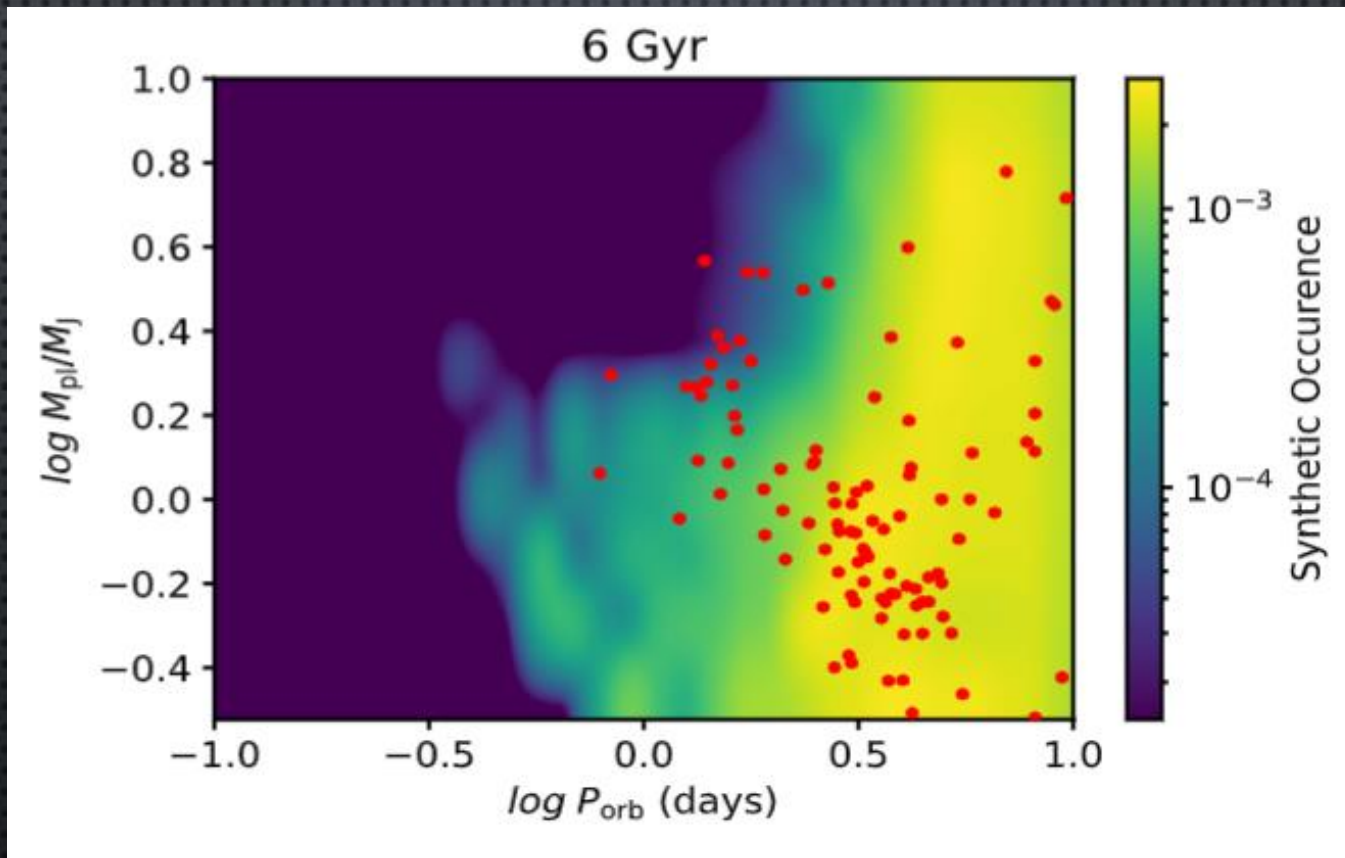
# ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ)



Красные круги – наблюдаемые планеты у звезд с массой в диапазоне  $[0.95, 1.05] M_{\odot}$

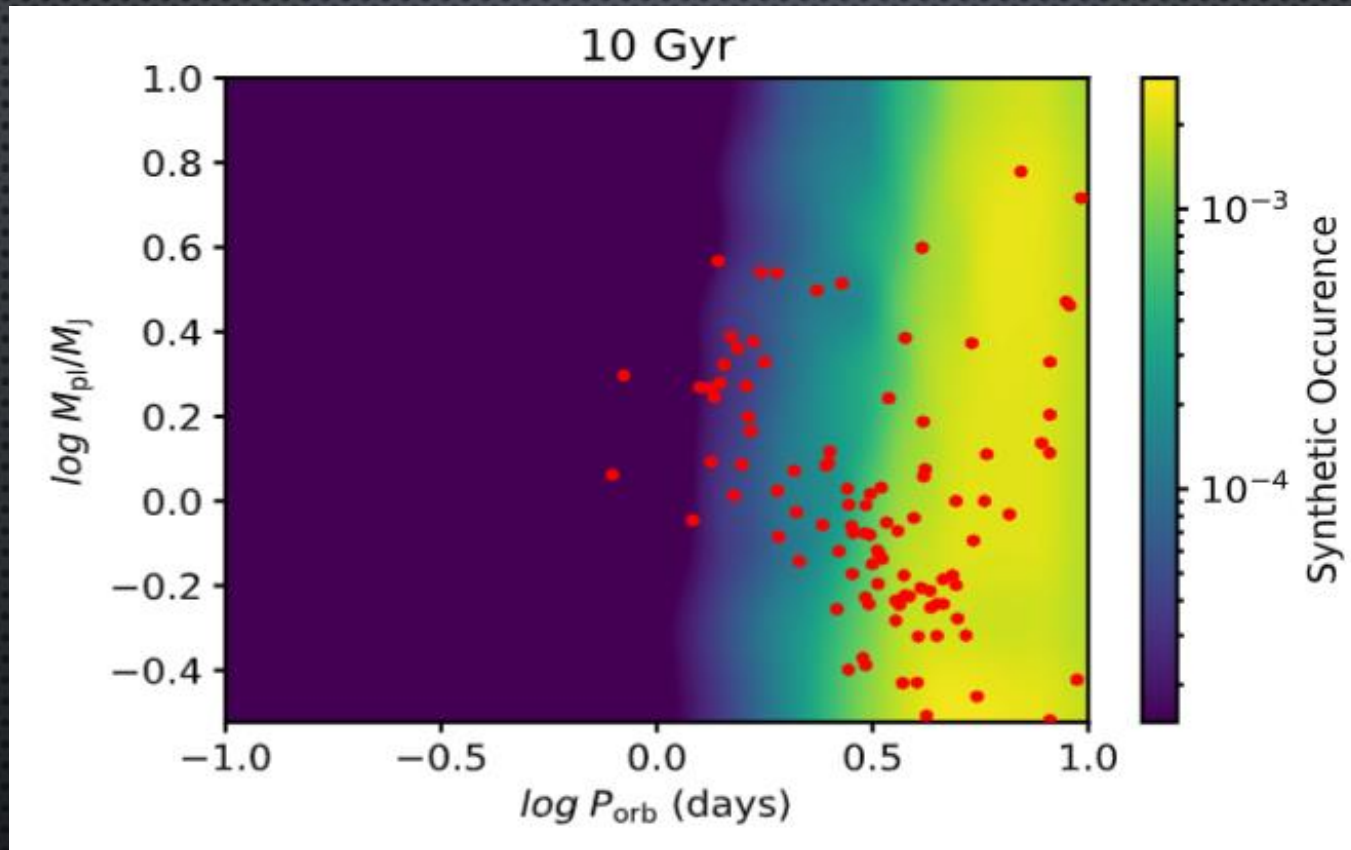


# ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ)



Красные круги – наблюдаемые планеты у звезд с массой в диапазоне  $[0.95, 1.05] M_{\odot}$

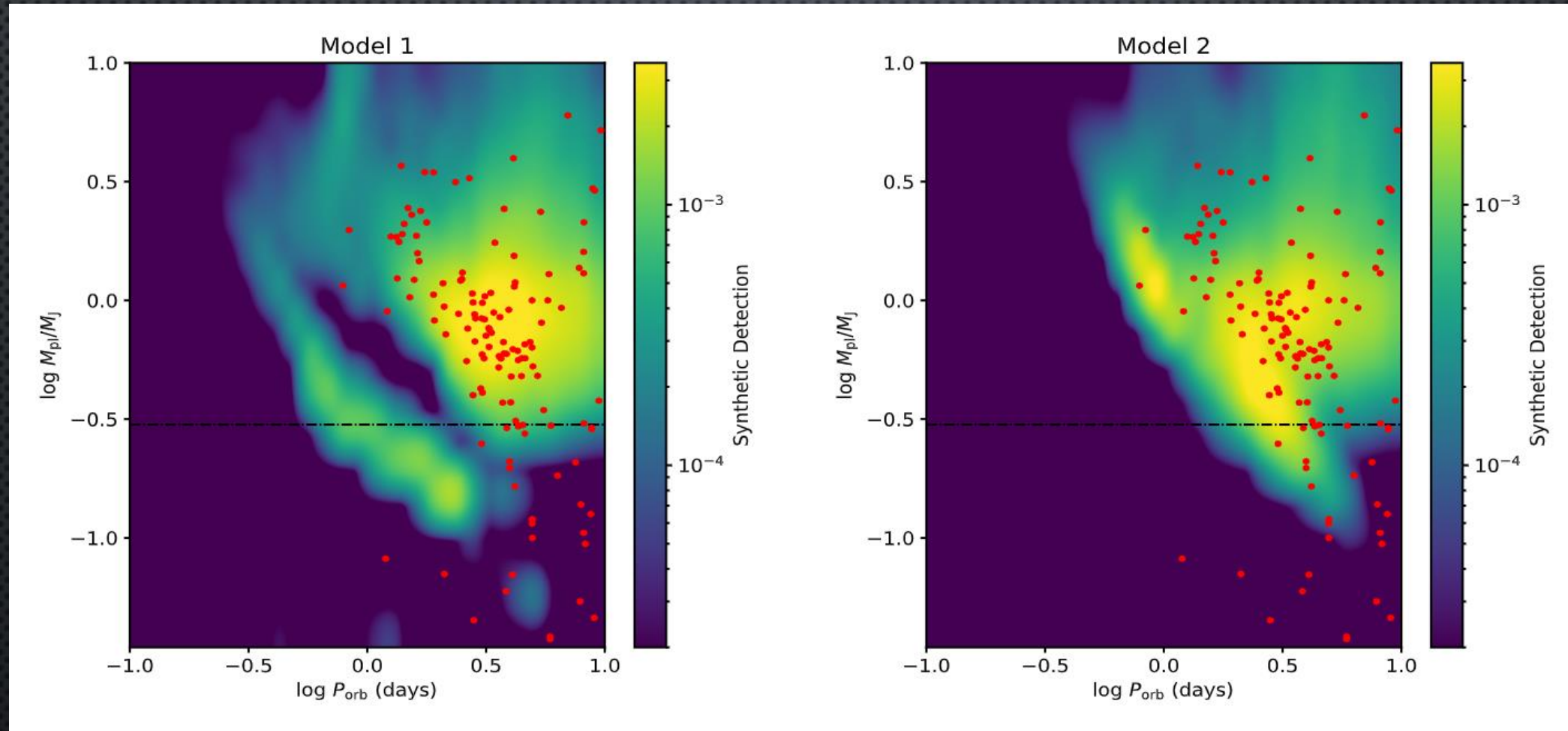
# ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ)



Красные круги – наблюдаемые планеты у звезд с массой в диапазоне  $[0.95, 1.05] M_{\odot}$



# ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ (БОЛЕЕ СЛОЖНЫЕ МОДЕЛИ)



МОДЕЛЬ 1

МОДЕЛЬ 2

# ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ: ИТОГИ

1. 12 – 15% начальной популяции горячих Юпитеров было поглощено или претерпело существенную потерю массы;
2. Для 0.2 – 0.25% транзитных систем можно обнаружить вариацию времени транзита за 10 лет наблюдений;
3. Согласно модели 1 (модели 2), 3.6% (6.7%) транзитных горячих Юпитеров находится на стадии переноса вещества через полость Роша;
4. Модель 2 предполагает, что планеты WASP-19b, HATS-18b, and OGLE-TR-56b, вероятно, заполняют свои полости Роша. При этом планеты WASP-4b and COROT-1b близки к заполнению своих полостей Роша
5. Модель 2 допускает возможность трансформации горячих Юпитеров в горячие Нептуны. Тем не менее, для образования суперземель требуется время, существенно превышающее возраст тонкого диска;
6. Модели 1 и 2 успешно воспроизводят высокое число обнаруженных Юпитеров с периодом  $\sim 3$  сут и верхнюю границу наблюдаемого распределения, модель 2 качественно воспроизводит левую нижнюю границу распределения.

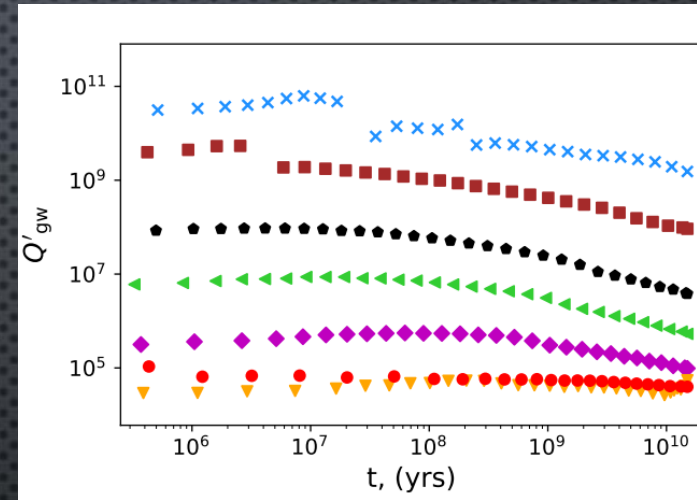
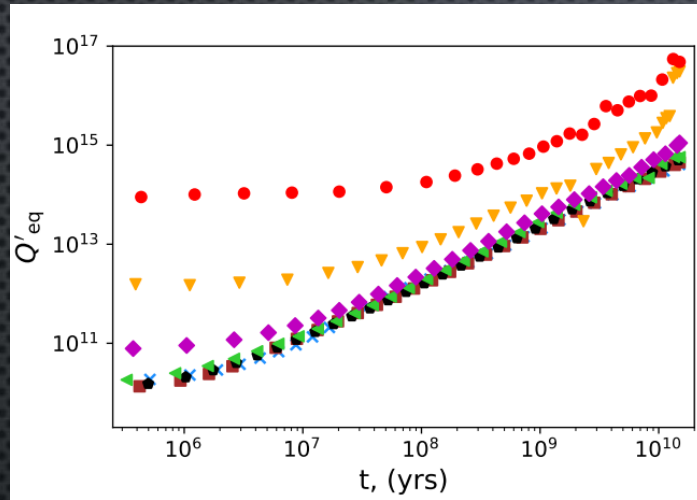


# ДИССИПАЦИЯ ПЛАНЕТНЫХ ПРИЛИВОВ

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ПРИЛИВЫ

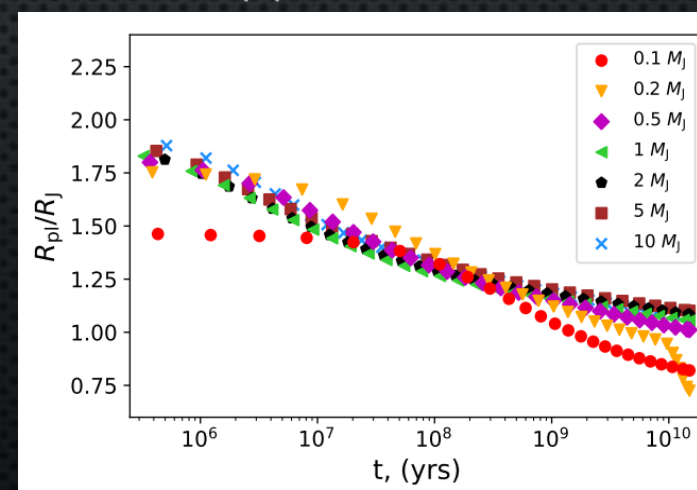
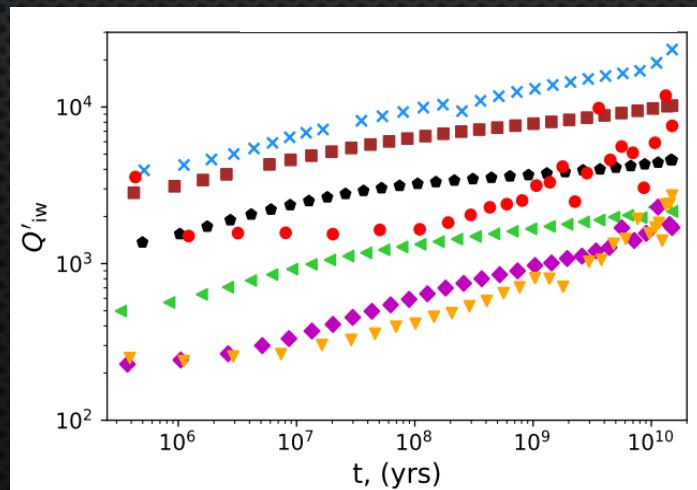
ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ

$$P_{rot} = 10 \text{ ч}$$
$$P_{tide} = 1 \text{ СУТ}$$

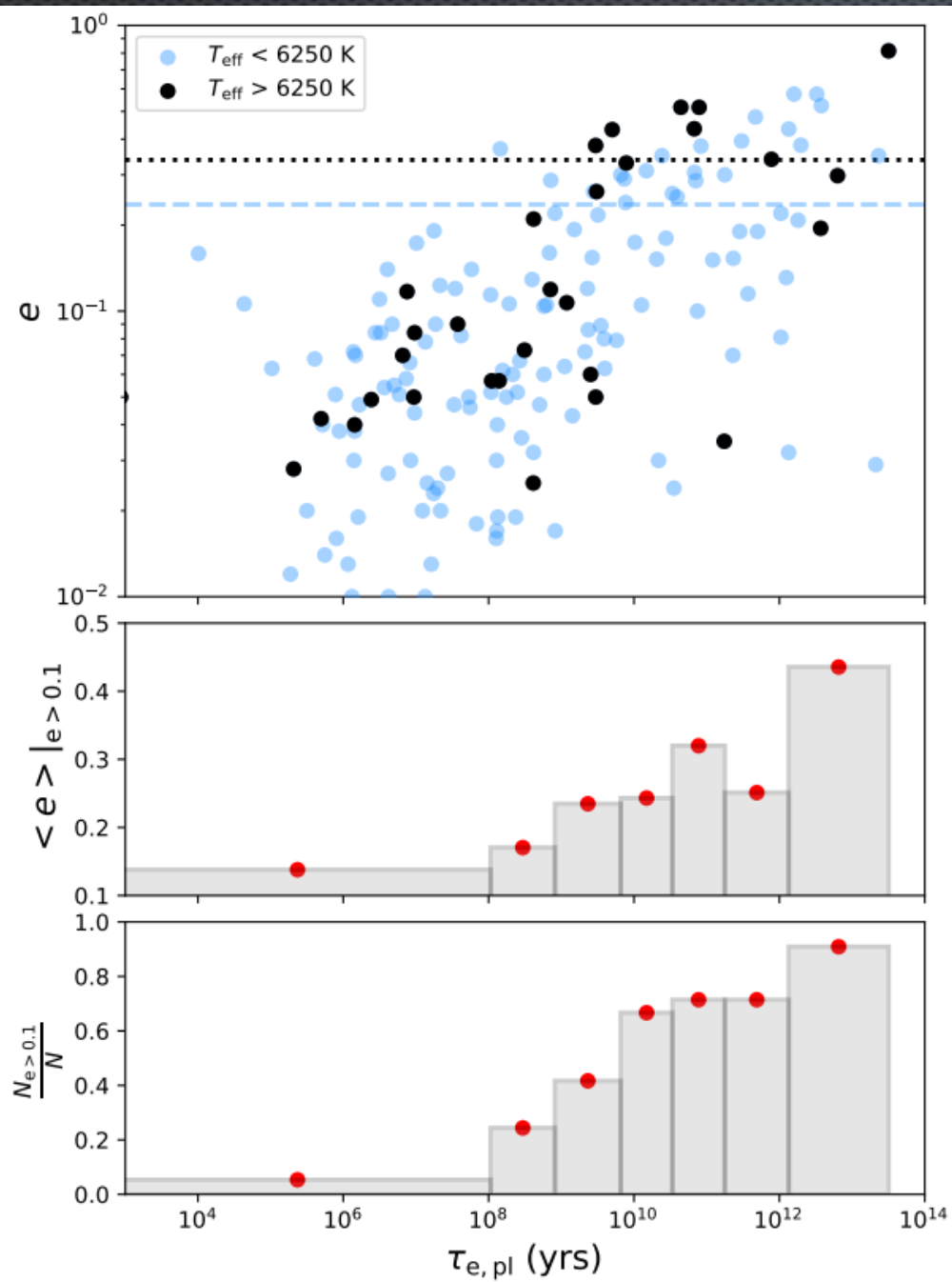


ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ

РАДИУС ПЛАНЕТЫ



# ЦИРКУЛЯРИЗАЦИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ СИСТЕМ



- Верхняя панель: РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОВ НАБЛЮДАЕМЫХ ГОРЯЧИХ И ТЕПЛЫХ ЮПИТЕРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ ЦИРКУЛЯРИЗАЦИИ, ВЫЧИСЛЕННОГО ПРИ ПОМОЩИ ОЦЕНОК ТЕМПОВ ДИССИПАЦИИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ВОЛН.
- Средняя панель: СРЕДНИЙ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТ СРЕДИ ПЛАНЕТ ПЛАНЕТ С НЕКРУГОВЫМИ ОРБИТАМИ.
- Нижняя панель: ДОЛЯ ПЛАНЕТ С НЕКРУГОВЫМИ ОРБИТАМИ ПО ОТНОШЕНИЮ К ОБЩЕМУ ЧИСЛУ ПЛАНЕТ В КАЖДОМ ИНТЕРВАЛЕ ВРЕМЕНИ ЦИРКУЛЯРИЗАЦИИ.

$$\tau_{e,pl} = \frac{4}{63} \frac{Q'_{pl}}{n} \frac{M_{pl}}{M_*} \left( \frac{a}{R_{pl}} \right)^5$$



# ПУБЛИКАЦИИ

1. LAZOVIK Y. A., 2021, MNRAS, 508, 3408
2. LAZOVIK Y. A., 2023, MNRAS, 520, 3749
3. LAZOVIK, Y.A., BARKER, A.J., DE VRIES, N.B., ASTOUL, A, 2024, MNRAS, 527, 8245

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!