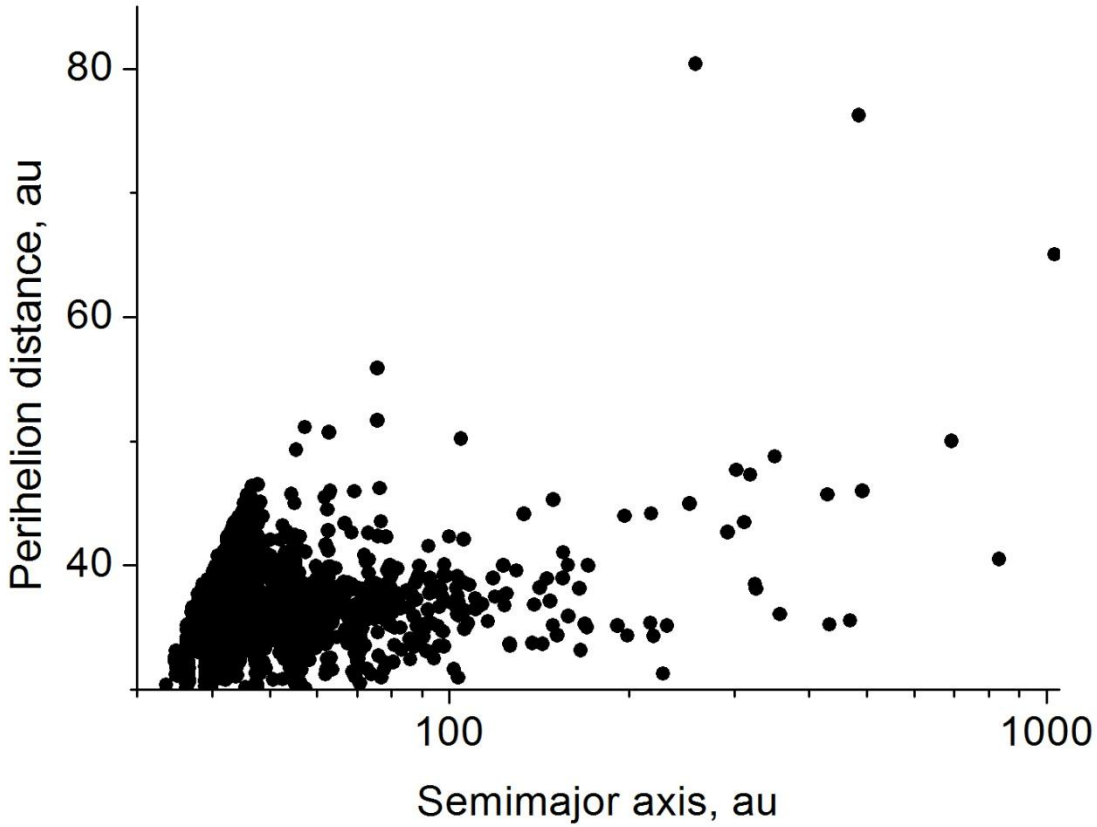
Структура транснептуновой области как отражение динамических процессов во внешней части ранней Солнечной системы

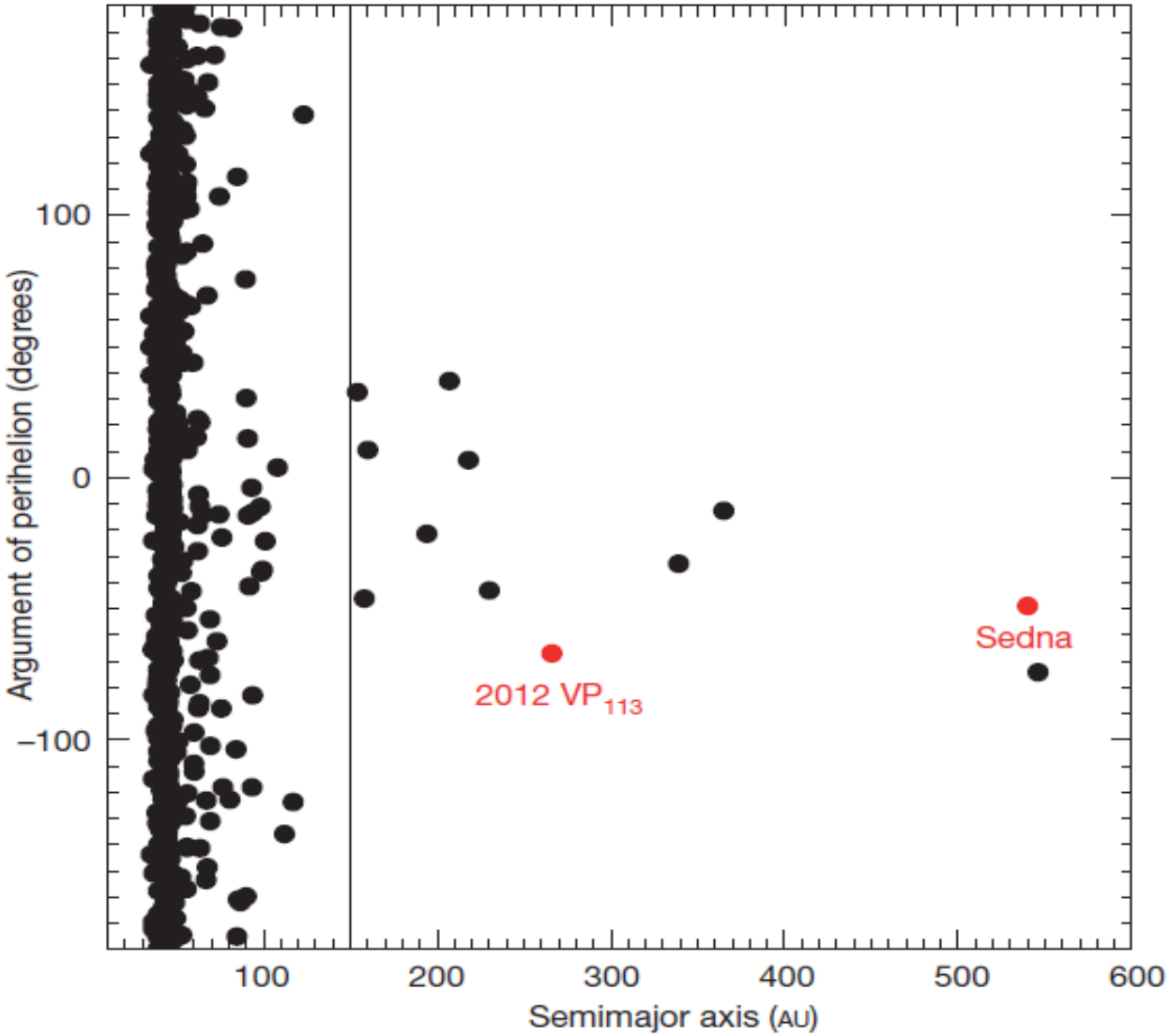
В.В.Емельяненко

ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ РАН

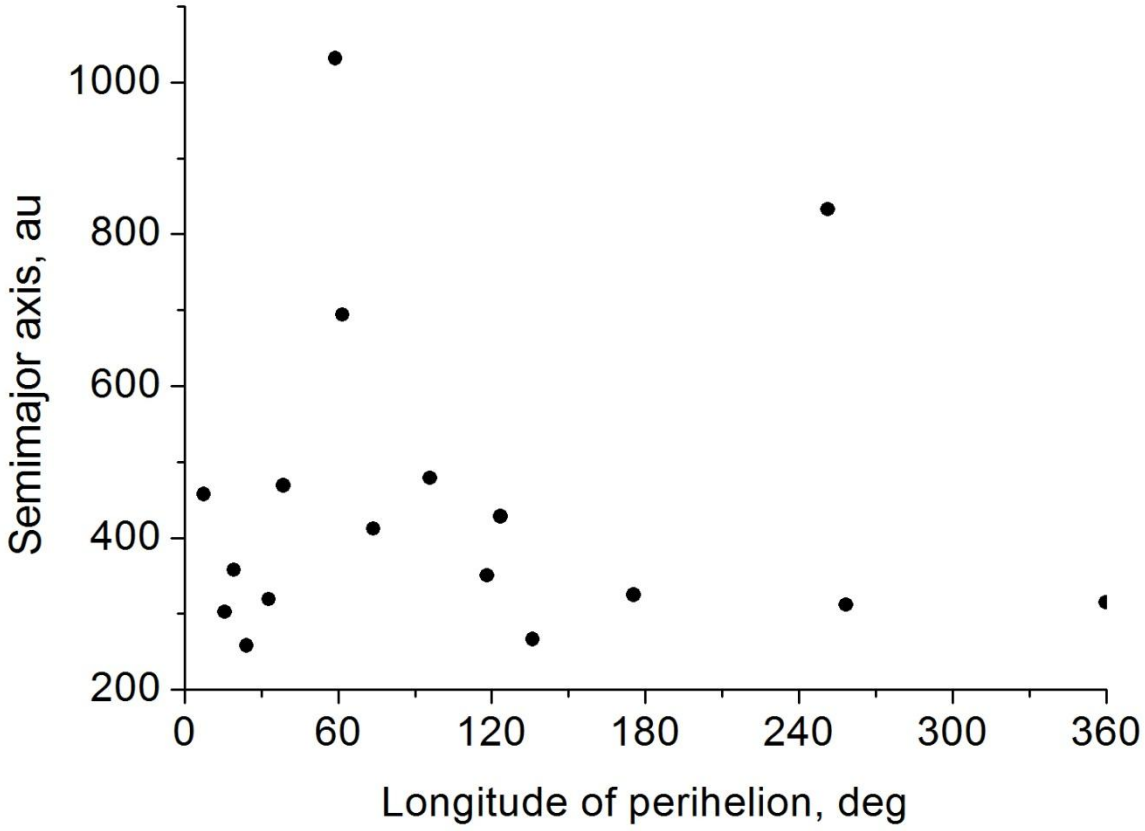
Распределение больших полуосей и перигелийных расстояний для транснептуновых объектов с *q*>30 а.е., наблюдавшихся в нескольких оппозициях



Концентрация аргументов перигелиев далеких транснептуновых объектов вблизи 0 (Trujillo, Sheppard, 2014)



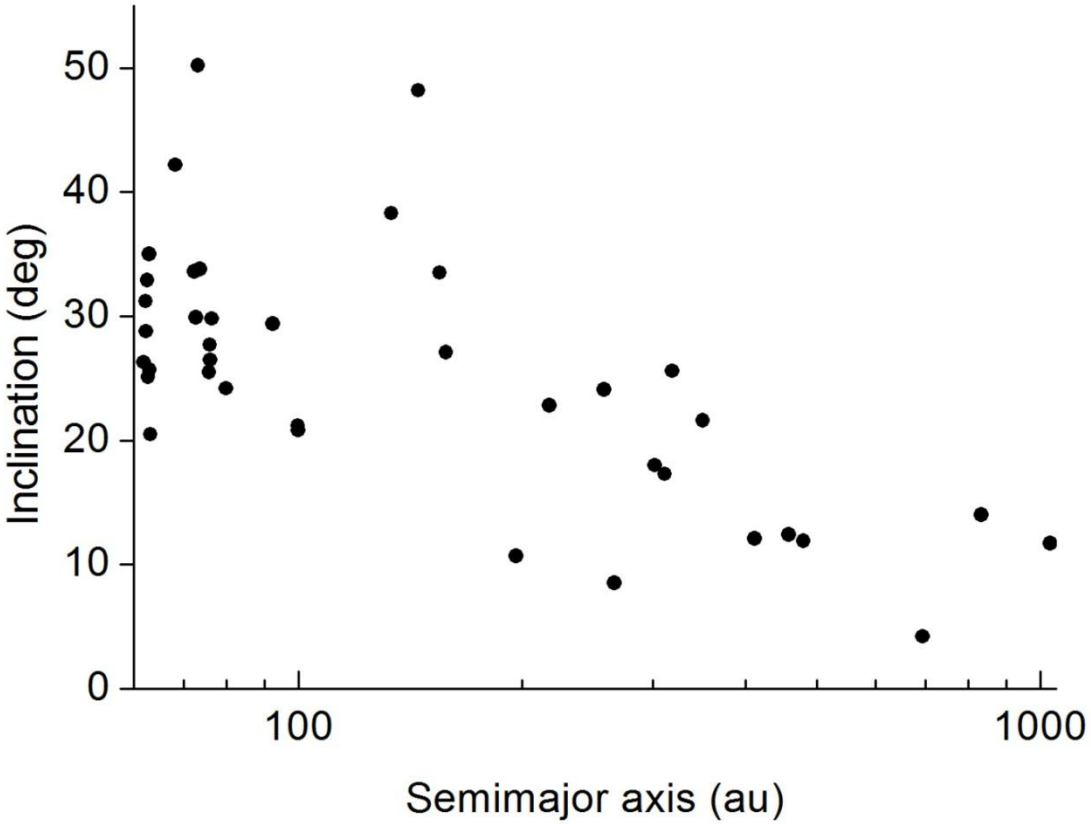
Распределение долгот перигелиев и больших полуосей для транснептуновых объектов с *q*>30 а.е., *a*>250 а.е., наблюдавшихся в нескольких оппозициях



Далекие транснептуновые объекты и девятая планета

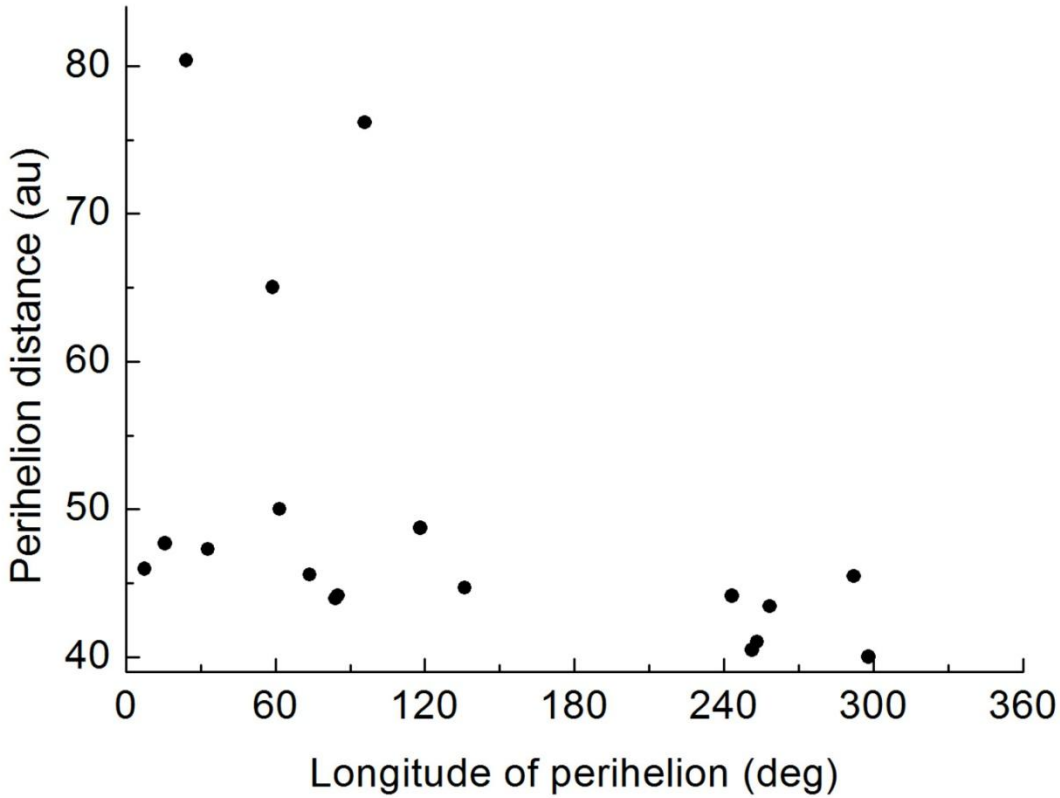
- Недавнее открытие далеких транснептуновых объектов, движущихся по орбитам с большими полуосями *a*>250 а.е., дало новую и довольно неожиданную информацию о структуре внешней части Солнечной системы. В распределении угловых элементов орбит этих объектов обнаружилась необычная группировка вблизи определенных значений (Trujillo, Sheppard, 2014; Batygin, Brown, 2016).
- В результате подробных небесномеханических исследований было показано, что наблюдаемые особенности в распределении орбит далеких транснептуновых объектов могли быть произведены планетой с массой ~ 5-10 масс Земли, движущейся по орбите с большой полуосью ~ 400-800 а.е., эксцентриситетом ~ 0.2-0.5 и наклоном ~ 15-25° (Batygin, Brown, 2016; Batygin и др., 2019).

Распределение больших полуосей и наклонов орбит для транснептуновых объектов с *q*>40 а.е., *a*>60 а.е., наблюдавшихся в нескольких оппозициях



Распределение долгот перигелиев и перигелийных расстояний для транснептуновых объектов с *q*>40 а.е., *a*>100 а.е., наблюдавшихся в нескольких оппозициях

<*i*>=15º <*i*>=30º



Трудности гипотезы о девятой планете

- Несмотря на интенсивные поиски, планета до сих пор не обнаружена.
- Модели распределения орбит комет семейства Юпитера, пришедших из транснептуновой области при наличии девятой планеты, плохо согласуются с наблюдаемым распределением (Nesvorny et al., 2017).
- Представляет огромные трудности объяснение образования столь массивной и далекой планеты (Batygin et al., 2019).

Альтернативные гипотезы

Вместо девятой планеты, самогравитирующий диск транснептуновых объектов с массой порядка 10 масс Земли может поддерживать наблюдаемое распределение долгот перигелиев (Sefilian & Touma 2019; Zderic et al. 2020). Этот сценарий также имеет большие трудности (напр., Batygin et al. 2019) в рамках аккреционной теории формирования планет и классической концепции о минимальной массе протопланетного диска.

Гравитационная неустойчивость и фрагментация околозвездных дисков

Гравитационная неустойчивость и фрагментация околозвездных дисков уже давно рассматривается как возможный механизм быстрого формирования планет-гигантов (Boss, 1997). В настоящее время существует довольно устоявшаяся точка зрения, что условия фрагментации околозвездного диска выполняются в его внешней части, на расстояниях от звезды r>50-100 а.е. (например, Johnson, Gammie, 2003; Rafikov, 2005). Минимальная начальная масса самогравитирующих газовых сгущений, возникших при фрагментации диска, составляет ~ $10m_J$, где m_J - масса Юпитера (например, Stamatellos, Whitworth, 2009), а начальные радиусы таких образований, рассматриваемые при моделировании фрагментации диска, составляют от нескольких астрономических единиц (Boss, 2011; Galvagni, Mayer, 2014) до нескольких десятков астрономических единиц (Vorobyov, 2013). В последнее время было показано, что образующиеся гигантские сгущения участвуют в сложном динамическом процессе взаимодействия с диском, что приводит, в частности, к миграции сгущений (Mayer и др., 2002; Vorobyov, Basu, 2005; Nayakshin, 2010; Baruteau и др., 2011; Zhu и др., 2012; Stamatellos, 2015; Vorobyov, Elbakyan, 2018). Более того, мигрирующие сгущения могут испытывать тесные сближения друг с другом, что зачастую приводит к выбросу объектов на гиперболические орбиты (Terquem, Papaloizou, 2002; Vorobyov, Elbakyan, 2018).

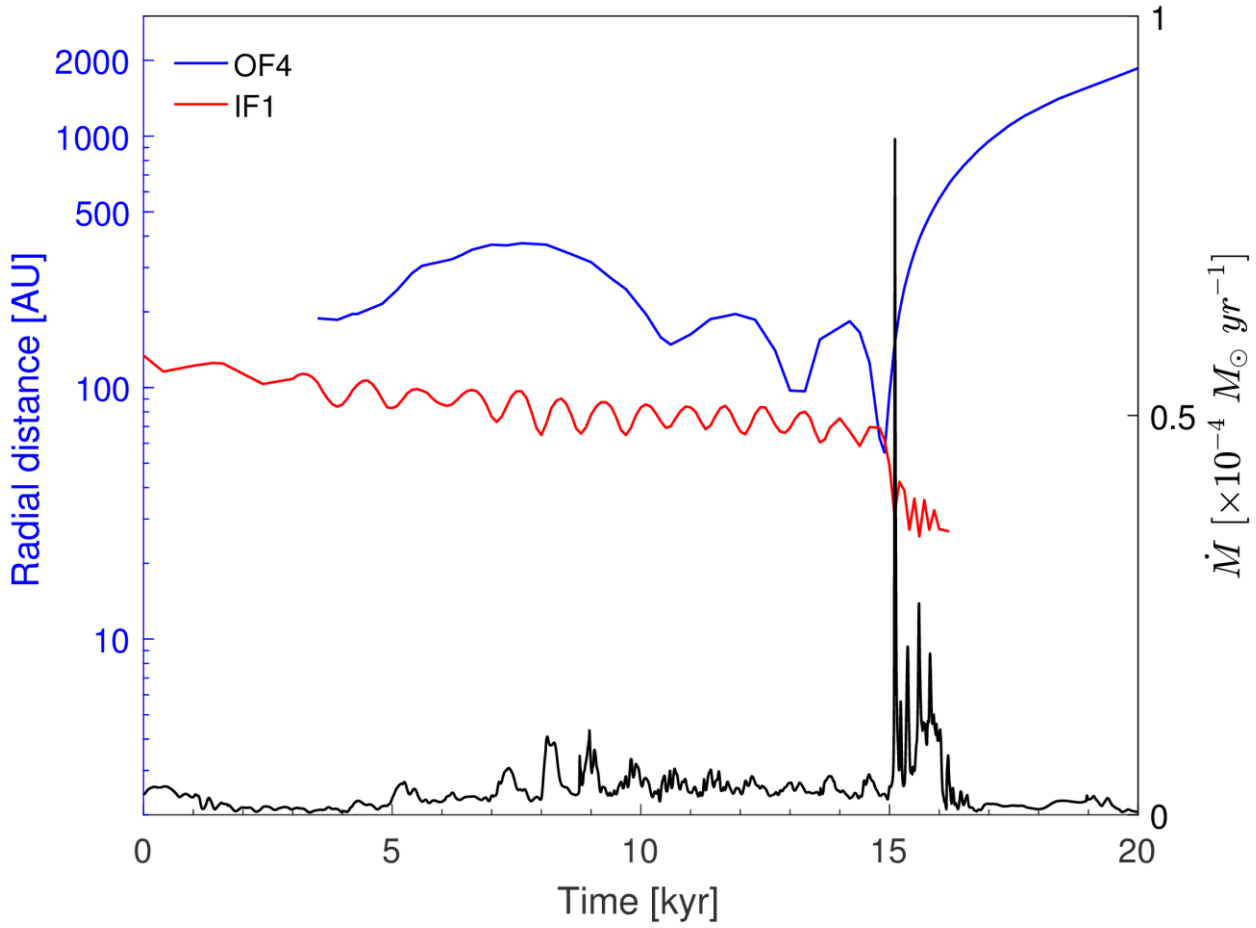
Модель

Предполагается, что планетезимали существуют в областях Хилла гигантских сгущений на стадии их миграции. Хотя вопрос формирования малых тел за короткий промежуток времени является открытым, есть много работ, в которых рассматривается очень быстрое образование малых тел во внешней части Солнечной системы. Например, авторы работы (Wahlberg Jansson & Johansen 2014) показывают, что в их численных экспериментах планетезимали различных размеров могут быть созданы в результате потоковой неустойчивости на 40 а.е. в протопланетных дисках: более 100 км - за 25 лет, 10 км - за несколько сотен лет, 1 км - за несколько тысяч лет. В работах (Nayakshin & Cha 2012; Nayakshin 2017) утверждается, что создание твердых тел внутри областей гигантских газопылевых сгущений проще, чем в околозвездных дисках.

Планетезимали выбрасываются из областей Хилла, когда гигантские сгущения переходят на орбиты с большими эксцентриситетами, испытывают тесные сближения друг с другом или мигрируют внутрь Солнечной системы.

Гигантские сгущения гравитационно взаимодействуют с окружающими их планетезималями.

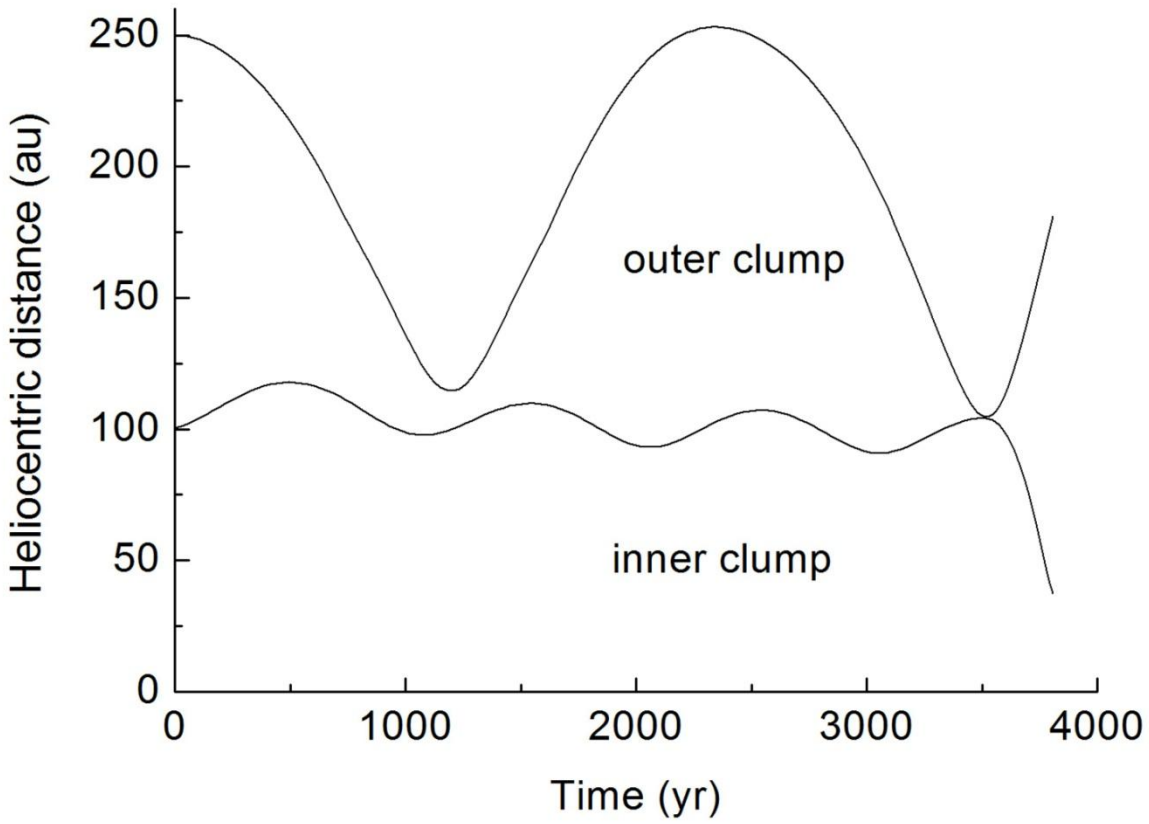
Изменение расстояний двух газопылевых сгущений от звезды (Vorobyov, Elbakyan, 2018)



Модель (Emel'yanenko, Astronomy & Astrophysics, 2020, 642, L20)

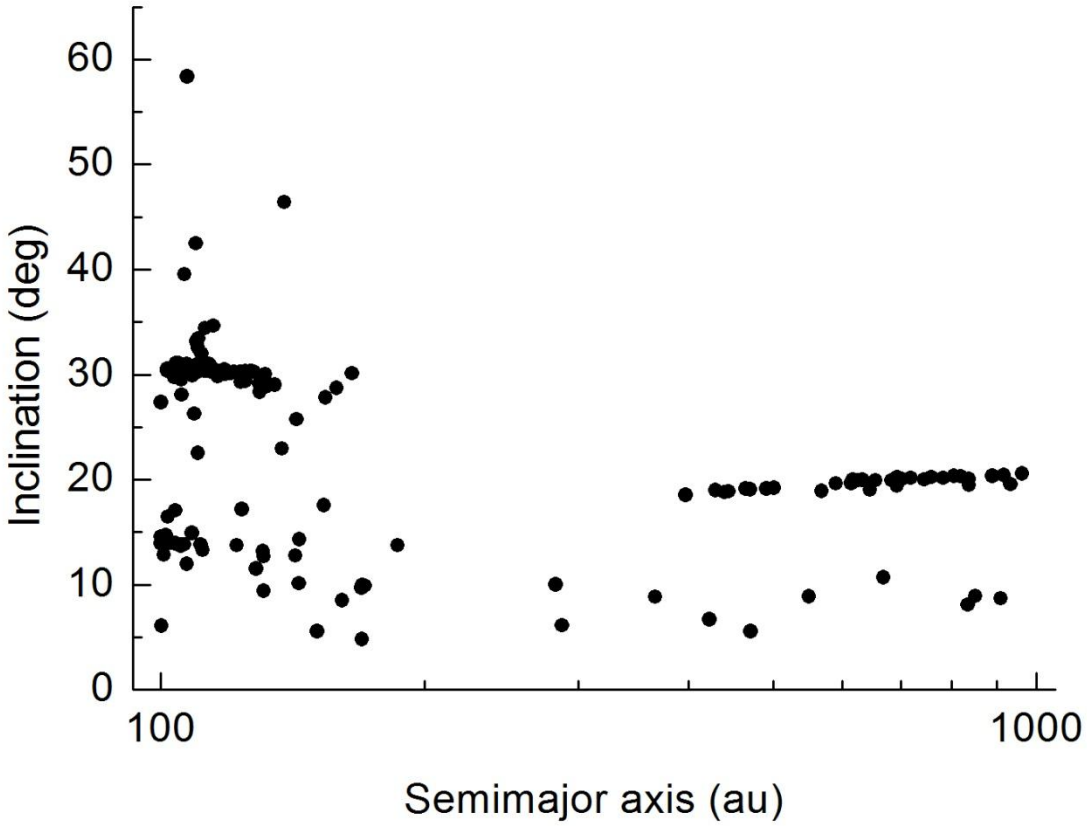
Исследуется систему двух взаимодействующих гигантских сгущений (масса ~ $10m_J$, где m_J - масса Юпитера), окруженных планетезималями в областях Хилла. В этой модели внешний объект с меньшей массой движется по начальной орбите с e~0.5. Внутренний объект начинает двигаться по почти круговой орбите с a~100 а.е. Через некоторый промежуток времени объекты сближаются. В результате взаимных возмущений эти объекты выходят на орбиты с большими эксцентриситетами. Внешний объект выбрасывается на почти параболическую или гиперболическую орбиту. Внутренний объект выходит на орбиту с q~30 а.е., и эта орбита быстро округляется на таком расстоянии за счет взаимодействия с протопланетным газовым диском.

Изменение гелиоцентрических расстояний для внутреннего (*i*= 15º) и внешнего (*i*= 30º) сгущений



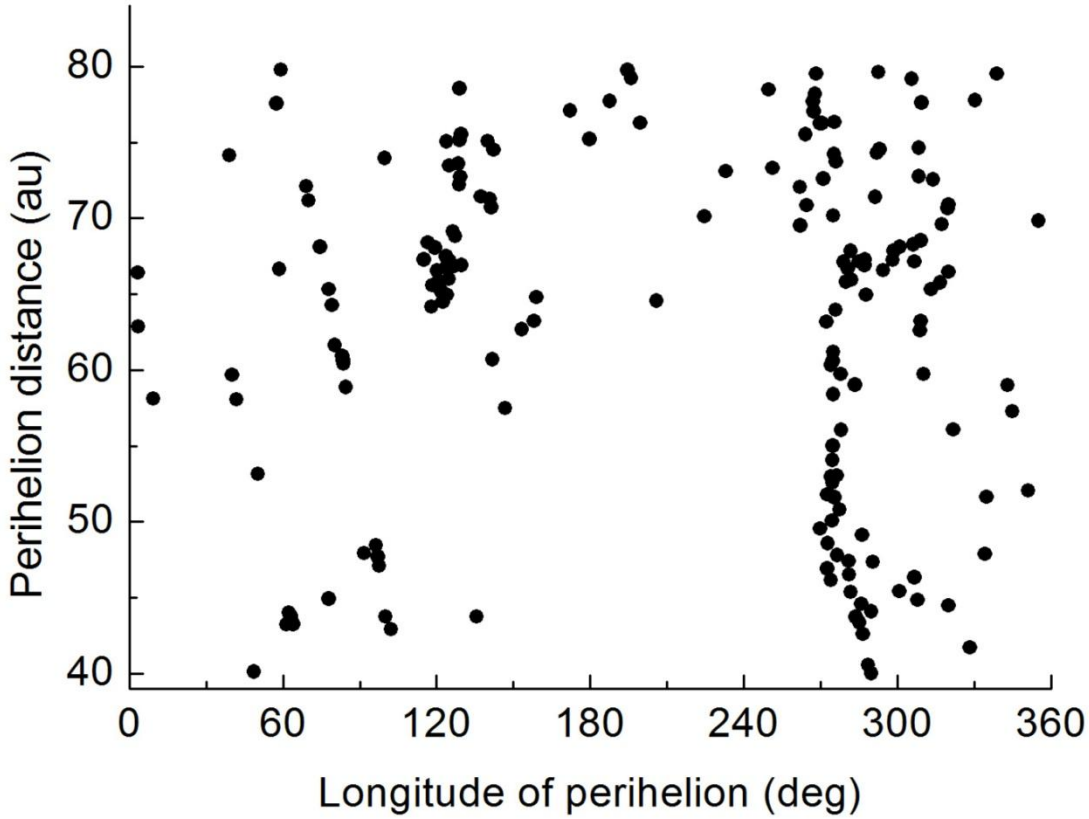
На первом этапе представленного варианта два сгущения немного мигрируют внутрь. Внешний объект с массой 12 масс Юпитера и радиусом R = 6.4 а.е. стартует в афелии орбиты с a=187 а.е., q=123 а.е., i=30°, π=257°. Внутренний объект массой 17 масс Юпитера и радиусом R = 7.2 а.е. начинает движение по орбите с a=110 а.е., q=100 а.е., i=15°, π=98°. Около каждого сгущения 1000 частиц первоначально распределены между R и радиусом области Хилла сгущения в афелии (37 а.е. для внешнего сгущения и 20 а.е. для внутреннего сгущения). Через 3500 лет происходит тесное сближение сгущений. Это событие происходит вблизи перигелия внешнего сгущения и афелия внутреннего сгущения.

Распределение больших полуосей и наклонов орбит для малых тел с 40<*q*<80 а.е., 100<*a*<1000 а.е.



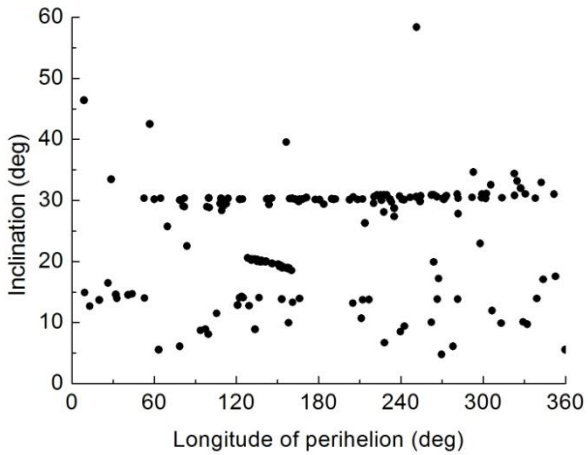
Распределение долгот перигелиев и перигелийных расстояний для малых тел с 40<*q*<80 а.е., 100<*a*<1000 а.е.

<*i*>=16.4º <*i*>=28.7º

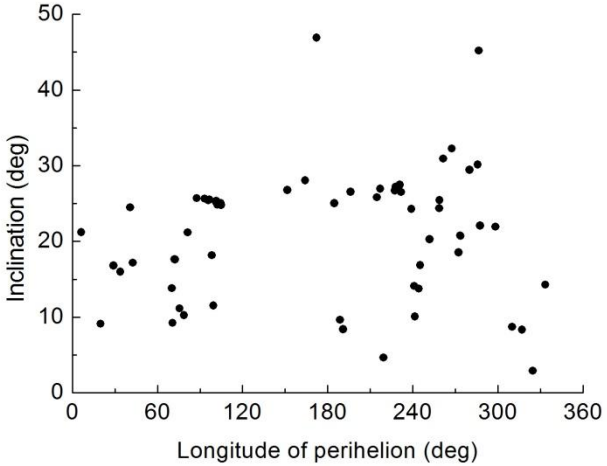


Распределение долгот перигелиев и наклонов для малых тел с 40<*q*<80 а.е., 100<*a*<1000 а.е. через 200 миллионов лет

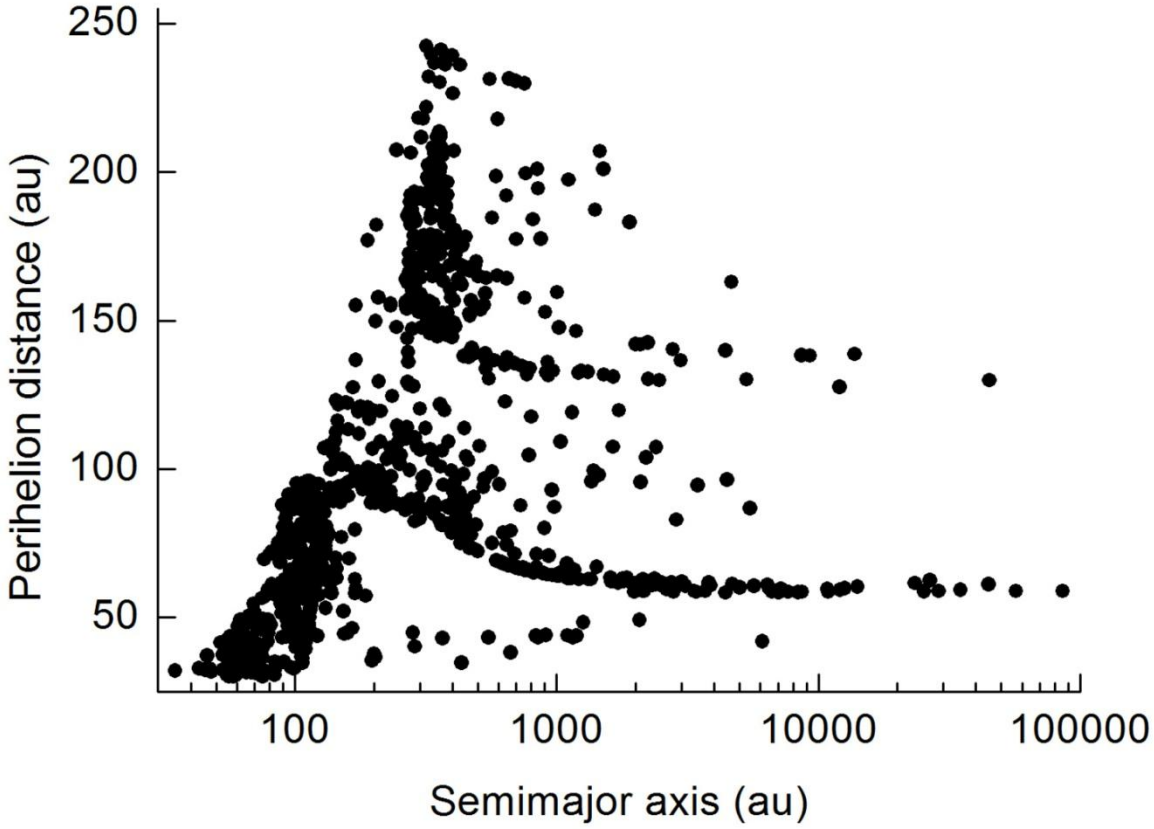
4 внешние планеты + диск объектов с нулевой массой :



4 внешние планеты+ диск объектов с массой, равной 10 массам Земли



Распределение больших полуосей и перигелийных расстояний для малых тел с q>30 а.е., 0<a<10^5 а.е.



Следствия

1. Протопланетный солнечный диск был более протяженным, чем в классической концепции MMSN (Minimum Mass Solar Nebula).

2. Существует много неоткрытых малых тел с q>80 а.е.

3. В рассмотренной модели создается множество объектов с 30<q<40 а.е. и большими эксцентриситетами. Поэтому гигантские сгущения, мигрирующие во внешней части Солнечной системы, могли играть важную роль в создании популяции транснептуновых объектов на орбитах с большими эксцентриситетами.

4. В рассмотренной модели многие объекты переходят на орбиты с большим эксцентриситетом, расположенные как во внутреннем ядре, так и во внешней части облака Оорта. Следовательно, формирование облака Оорта может быть связано с описанным процессом.

Заключение

Основные особенности наблюдаемого орбитального распределения далеких транснептуновых объектов можно объяснить их происхождением в областях Хилла мигрирующих гигантских газопылевых сгущений, которые образуются во внешней части Солнечной системы в результате гравитационной неустойчивости и фрагментации протопланетного диска.

Проблемы

- Эволюция газопылевых сгущений и протопланетного диска

а) сгущения на орбитах с большими эксцентриситетами

б) время существования сгущений (~0.5 млн лет, Vorobyov & Elbakyan 2018)

в) условия в протопланетном диске после исчезновения сгущений

- Образование планетезималей (Nayakshin & Cha 2012, Nayakshin 2017)

а) внутри сгущений или в протопланетном диске?

в) в какой части сгущения рост твердых тел наиболее эффективен?

в) сравнение с образованием спутниковых систем