

Сергиенко Мария Викторовна

**СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ГЕНЕТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ
МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ И ИХ РОДИТЕЛЬСКИХ ТЕЛ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА**

1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Научный руководитель: **Нефедьев Юрий Анатольевич**,
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Бусарев Владимир Васильевич**,
доктор физико-математических наук,
Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова, Государственный астрономический
институт им. П.К. Штернберга, ведущий научный
сотрудник

Девяткин Александр Вячеславович,
доктор физико-математических наук, старший научный
сотрудник, Главная (Пулковская) астрономическая
обсерватория РАН, главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится «24» октября 2023 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного
совета 24.1.032.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва ул.
Пятницкая, д. 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института астрономии РАН и на сайте
<http://www.inasan.ru>

Автореферат разослан «25» августа 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.032.01, к.ф.-м.н.

Н.В. Чупина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Фундаментальной задачей современной астрономии, несомненно, является изучение Солнечной системы (СС), а именно малых тел, таких как кометы, астероиды, метеороиды. Согласно современной концепции образования СС, кометы и астероиды несут информацию о том протовеществе, которое больше четырех млрд лет назад участвовало в образовании планет СС. Основная масса комет и астероидов не изменили свои физико-химические свойства и состав, так как являются объектами с малыми массами, поэтому их вещество осталось практически неизменным с момента образования планетной системы [1]. В связи с этим, изучая малые небесные тела (МНТ), мы можем получить ценные сведения об эволюции СС.

Вопросы образования СС в настоящее время очень актуальны [2]. Исследования малых небесных тел Солнечной системы и, в первую очередь, астероидов и комет играет первостепенную роль в развитии эволюционной теории [3-7]. Таким образом, изучение всего комплекса малых тел является актуальной задачей.

Комплекс МНТ как астероидов, так и комет представляет потенциальную опасность для Земли вследствие возможных столкновений [1]. Для построения более точных моделей распределения малых тел в околоземном и межпланетном пространстве наиболее важны исследования, которые определяют природу этих объектов, их химико-физические свойства, работа по выявлению потухших кометных ядер из числа сближающихся с Землей астероидов, и изучение связанных с ними метеороидных потоков [8-10]. На основе наблюдений метеоров строятся модели распределения метеороидного вещества в околоземном и межпланетном пространстве, что помимо фундаментального аспекта, имеет большое прикладное значения для успешной реализации космических проектов. Комплекс МНТ Солнечной системы представляет собой многочисленную популяцию астероидов, комет, метеороидов потокового и спорадического типа и их ассоциаций. Международный астрономический союз (МАС) приводит реестр из 110 подтвержденных наблюдениями метеорных потоков [11]. Из них 78 потоков – это потоки-сироты с неустановленными родительскими телами (РТ) астероидами и кометами, практически все они относятся к малым метеорным потокам с невысокой активностью. Проблема изучения и отождествления малых потоков связана в основном с нерегулярностью их наблюдений инструментальными методами, вследствие чего отсутствуют данные об их структуре, радиантах, скоростях и орбитальных параметрах [12,13].

Очень активно обсуждается вопрос о вероятной связи метеорных потоков и астероидов, принимая, что астероид может быть ядром или фрагментом ядра угасшей кометы, которая в прошлом была активна и породила поток метеороидов, также нельзя исключить вопрос об образовании метеорного потока из частиц пыли при распаде астероида [14,15]. По данной тематике выполнено достаточно много исследований, в том числе по поиску связей астероидов с такими ежегодными интенсивными метеорными потоками как Геминиды, Тауриды, Квадрантиды, альфа-Каприкарниды и др. [16,17]. Однако связи малых потоков с околоземными объектами исследованы пока недостаточно именно по причине недостаточности данных о потоках.

Изучая связи МНТ с метеорными потоками и при идентификации их с возможными родительскими телами (РТ) применяют критерии подобия орбит как функций их расстояния. Наиболее распространенными являются D критерии, в которых степень близости

(тождественности) двух орбит оценивается некоторым безразмерным параметром D в заданном фазовом орбитальном пространстве. Метрика Холшевникова, разработана К.В. Холшевниковым позже и, в отличие от формальных D критериев, рассматривается именно как расстояние между орбитами в астрономических единицах [18]. При выполнении данной работы особое внимание было уделено совместному использованию D критерия Драммонда [19], который включает в себя безразмерные величины в заданном фазовом пространстве, с размерной метрикой Холшевникова [18], параметров динамической эволюции орбит – квазистационарных параметров ν и μ [20], параметр μ представляет собой проекцию кинетического момента движения на нормаль к плоскости эклиптики, а квазистационарный параметр ν применяется для оценки вероятности тесных сближений с планетами, параметр Тиссерана [21] и долготы перигелия π , что позволило более точно учитывать влияние внешних тел на орбитальную эволюцию МНТ, а для достоверности определения родительских тел были применены критерии Ашера [22] и более строгий критерий Саутворта-Хоккинса [23].

С целью исследования генетических взаимосвязей метеорных комплексов с кометами и астероидами разработано достаточно много подходов. Нами в данной работе использован синтетический метод, основанный на совокупности критериев, позволяющий при изучении генетических связей МНТ учитывать как начальные условия формирования метеорного комплекса, так и факторы его последующей динамической эволюции. При этом выявляется система связанных околоземных небесных объектов в контексте их возможных генетических связей.

При исследовании генетических взаимосвязей МНТ существует проблема в виде неоднозначности подходов нахождения пороговых значений критериев, решая которую можно отклонить или принять гипотезу о вероятной связи двух тел. Если расстояние между двумя рассматриваемыми орбитами ниже некоего критического значения, то считается, что два этих тела могут иметь схожее происхождение. На сегодняшний день нет разработанной единой методики для решения данной задачи, исследователи применяют разные методы нахождения порогового значения и, в результате, в работах разных авторов может быть указан один и тот же метеорный поток в возможной связи с разными МНТ, что приводит к неоднозначности в установлении его РТ. Поэтому разработка алгоритмов определения пороговых значений критериев является актуальной и востребованной задачей.

Полученные в работе результаты в дальнейшем планируется использовать, и уже использованы, при редукции наблюдений, получаемых телескопом Мини-МегаТортора – уникальном телескопе Казанского университета и для анализа данных наблюдений метеорного радара КФУ (Казанский (Приволжский) федеральный университет). А также полученные результаты применимы для планирования как наземных наблюдений, так и космических миссий, которые своей целью ставят изучение метеороидного содержания не только на околоземной орбите, но и при экстраполировании метеороидной обстановки на траектории полета от Земли до Марса, а также для решения вопросов астероидной опасности.

Таким образом, цель данной работы состоит в построении системы генетически связанных МНТ с помощью созданного синтетического метода, включающего в себя совокупность критерия Драммонда, метрики Холшевникова, квазистационарных параметров μ и ν , параметра Тиссерана и долготы перигелия π [24].

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Целью исследования является создание системы генетических связей метеорных потоков и их родительских тел с использованием синтетического метода.

Задачи, которые реализовывались для достижения поставленной цели:

1. Анализ реестра метеорных потоков по классификации наблюдаемой активности и орбитальным параметрам. Анализ реестра базы данных АСЗ (астероиды, сближающиеся с Землей) как потенциальных кандидатов для поиска РТ метеорных потоков. Анализ физико-химических и орбитальных параметров групп околоземных астероидов Атоны, Аполлоны, Амуры, Атиры как потенциальных кандидатов для поиска РТ метеорных потоков.
2. Создание синтетического метода по определению генетических связей МНТ на основе совокупности критериев подобия орбит Драммонда, метрики Холшевникова и квазистационарных параметров μ и ν , параметра Тиссерана T , полученных как следствие из ограниченной задачи трех тел, и долготы перигелия λ .
3. Разработка алгоритма нахождения пороговых значений критериев генетических связей МНТ.
4. Создание независимого метода отбора кандидатов в РТ.
5. Анализ стохастических связей малых метеорных комплексов δ -Канкриды, κ -Цигниды, h -Виргиниды, Андромедиды и ρ -Геминиды с околоземными астероидами групп Аполлоны и Амуры на основе синтетического метода.
6. Оценка взаимосвязей в группах РТ исследуемых метеорных потоков с помощью критерия D_{SH} Саутворта-Хоккинса и его модификации – критерия D_{AH} Ашера
7. Построение автоматизированного программного комплекса анализа малых небесных тел АПКМНТ.
8. Исследование структуры метеорных потоков на основе графического метода анализа данных.

Работа носит как теоретический, так и практический характер, в частности, проводились и анализировались наблюдения, полученные на телескопе Мини-МегаТортора. Так как программное обеспечение телескопа, к сожалению, не позволяет непосредственно определить динамические параметры метеоров, поэтому мы, практически в ручном режиме, определяли эти параметры из снимков, полученных с помощью телескопа Мини-МегаТортора и, по возможности, включили эти результаты в данную диссертационную работу, как дополнение к используемым базам данных. Сами наблюдения удалось выполнять дистанционно, с использованием пункта управления телескопом в АОЭ (Астрономическая обсерватория им. В.П. Энгельгардта, КФУ).

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

Данная диссертация – это завершенное научное исследование, все результаты, представленные в работе, оригинальны и опубликованы в работах автора впервые.

1. Впервые разработан, создан и применен в работе синтетический метод генетических связей околоземных объектов по нахождению генетических связей МНТ на основе совокупности критериев подобия орбит Драммонда, метрики Холшевникова и квазистационарных параметров μ и ν , параметра Тиссерана T , полученных как следствие из ограниченной задачи трех тел, и долготы перигелия λ .

2. Впервые разработан алгоритм нахождения пороговых значений для всех критериев генетических связей МНТ, используемых в синтетическом методе.
3. Впервые создан и применен в работе независимый способ отбора кандидатов в РТ.
4. Впервые произведен анализ стохастических связей малых метеорных комплексов δ -Канкриды, κ -Цигниды, h -Виргиниды, Андромедида и ρ -Геминиды с АСЗ на основе синтетического метода.
5. Впервые произведена проверка генетических взаимосвязей АСЗ между собой в группах РТ исследуемых метеорных потоков.
6. Впервые за период 17 лет построены и проанализированы структурные параметры метеорного потока δ -Канкриды на основе графического метода анализа данных, и по определенной величине среднегодовой максимальной активности потока сделан вывод о долготе узла Ω РТ, связанного с потоком δ -Канкрид.
7. Впервые исследован характер изменения функции светимости метеоров вдоль орбиты Земли и определена величина среднегодовой максимальной активности, а также момент ее наступления.
8. Впервые смоделирован профиль пространственной плотности потока δ -Канкриды для разных масс метеороидов.
9. Впервые построены и проанализированы зависимости большой полуоси от массы и эксцентриситета от массы, и оценены возрастные параметры потока δ -Канкрид.
10. Впервые уточнены значения суточного смещения радиантов и получены значения площади радиации.

НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Результаты, представленные в данной работе, направлены на решение обширного круга задач в области метеорной астрономии.

Научную значимость представляют:

1. Созданный синтетический метод генетически связанных МНТ по определению генетических связей МНТ позволил получить более достоверные их генетические связи.
2. Подтверждено предположение, что для поиска РТ для метеорных потоков наиболее подходят группы Аполлона и Амура.
3. Разработанный алгоритм нахождения пороговых значений критериев генетических связей МНТ может в дальнейшем использоваться для нахождения генетических связей МНТ.
4. Созданный независимый способ отбора кандидатов в РТ на основе интервальной оценки при помощи СКО (среднеквадратичное отклонение) позволил получить более вероятные РТ для метеорных потоков.
5. На основе разработанного синтетического метода выявлены стохастические связи малых метеорных комплексов с околоземными астероидами.
6. Полученные структурные параметры метеорного потока δ -Канкриды позволили сделать вывод о долготе узла Ω РТ и смоделировать профиль пространственной плотности потока.
7. Практическое применение совокупности критериев для поиска РТ метеорных потоков, оценивающих расстояние между орбитами МНТ и критериев, учитывающих гравитационные и негравитационные возмущения, позволило получить более точные значения генетических связей, что может быть использовано при анализе других систем МНТ.

Результаты работы могут быть применены в ИНАСАН, ГАИШ МГУ, КФУ, ИКИ РАН, УрФУ, ГАО РАН и в научных организациях, занимающихся схожими исследованиями.

В заключении следует отметить, что исследования, выполненные в настоящей работе по установлению генетических связей между МНТ, позволят использовать полученные результаты при развитии новых методов метеорной астрономии.

ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты, а именно их достоверность, можно подтвердить: 1) согласованностью полученных нами результатов с результатами, опубликованными ведущими мировыми учеными; 2) совокупностью использования сразу нескольких критериев генетической общности; 3) проведением тестирования критериев подобия орбит и квазистационарных параметров на их устойчивость к геометрии орбит и ошибок методов наблюдений, на внешнюю и внутреннюю сходимость относительно геометрии орбит МНТ и селекционных ошибок наблюдений метеоров разными методами; 4) оценкой взаимосвязей динамических параметров выделенных АСЗ, входящих в группу Аполлонов и Амуров, с помощью критерия $D_{АН}$ Ашера и критерия D_{SH} Саутворта-Хоккинса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы как теоретические, так и экспериментальные методы и расчеты. Материалы, используемые в работе – это мировые базы данных и данные, полученные телескопом Мини-МегаТортора. В результате был построен синтетический метод анализа и создана система генетических связей МНТ. Также следует отметить, что был разработан автоматизированный программный комплекс анализа малых небесных тел АПКМНТ на языке Си ++, содержащий 5 модулей и отражающий все этапы исследования: 1) Модуль по нахождению значений согласно критериям D Драммонда, метрики ρ Холшевникова, квазистационарных параметров μ и ν , долготы перигелия π , параметра Тиссерана T между средней орбитой метеорного потока и собственными орбитами метеороидов с помощью синтетического метода. 2) Модуль по определению и оценке критических значений согласно критериям Драммонда, метрики Холшевникова, долготы перигелия π , квазистационарных параметров μ и ν , а также параметра Тиссерана T , с использованием индивидуальных орбит метеороидов и средней орбиты метеорного потока, их дисперсий σ^2 и среднеквадратичных отклонений σ . 3) Модуль по определению степени выполнения совокупности критериев D Драммонда, метрики ρ Холшевникова, квазистационарных параметров μ и ν , долготы перигелия π , параметра Тиссерана T между средней орбитой потока и орбитами астероидов. 4) Модуль по отбору кандидатов в РТ. 5) Модуль анализа и оценки взаимосвязей динамических параметров в группах РТ. Все методы, подходы и программы, реализуемые в работе, были проанализированы и протестированы на их достоверность и точность.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Методика поиска вероятных связей метеорных потоков-сирот с околоземными объектами, которая включает синтетический метод анализа малых небесных тел, алгоритм определения пороговых значений критериев генетических связей и независимый способ отбора кандидатов в родительские тела.

2. Определены стохастических связи малых метеорных комплексов и получены параметры взаимосвязей пяти метеорных потоков с 89 околоземными астероидами. В результате данного исследования получены параметры идентификации метеорных потоков и их родительских тел, и проведен анализ полученных результатов на достоверность.
3. На основе графического метода анализа данных получены структурные параметры метеорного потока δ -Канкриды. Определено, что структура δ -Канкрид соответствует структуре старых потоков. Определена долгота узла орбиты для вероятного родительского тела. Построены профили активности, профили светимости и массы потока в зависимости от долготы Солнца, и по профилям определен максимум активности потока. Изучена структура радиантов ветвей потока на основе данных из каталогов метеорных орбит. Уточнены значения суточного смещения радиантов и получены значения площади радиации.
4. Построены и проанализированы зависимости орбитальных элементов большой полуоси и эксцентриситета от массы для северной NCC и южной SCC ветвей метеорного потока δ -Канкрид. Выявлено смещение максимума активности потока по долготе Солнца в зависимости от массы частиц. Впервые сделан вывод о том, что значения больших полуосей и эксцентриситетов смещаются в меньшую сторону в зависимости от уменьшения массы метеороидов. Установлено, что в области слабых звездных величин для обеих ветвей значения больших полуосей совпадают по размеру с резонансными орбитами в области 3:1.
5. Определены возрастные параметры потока δ -Канкрид за счет действия негравитационного эффекта Пойнтинга-Робертсона. Сделано предположение, что северная ветвь потока NCC имеет возраст в диапазоне от 24 до 30 тысячи лет на основании расчетов для метеороидов углеродного и кремниевого химсостава. Сделан вывод, что в потоке отсутствует мелкая фракция и преимущественно масса метеороидов больше или равна 0.001 г.
6. Создана система генетических связей пяти метеорных потоков и их родительских тел с использованием синтетического метода, алгоритма определения пороговых значений и независимого способа отбора родительских тел, и проведен анализ достоверности полученных результатов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в базы цитирования SCOPUS, WoS, РИНЦ, рекомендованных ВАК

1. **Sergienko M.V.**, Sokolova M.G., Andreev A.O., Nefedyev Y.A. Search for possible connections of the h-Virginids meteor shower with near-Earth asteroids // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2103. – P. 012037.
2. **Сергиенко М.В.**, Соколова М.Г., Нефедьев Ю.А., Андреев А.О. Метеорный поток к-Цигниды и его связь с околоземными астероидами // *Астрономический журнал*. – 2020. – Т. 97. – №12. – С. 1051-1056.
3. **Sergienko M.V.**, Sokolova M.G., Andreev A.O., Nefedyev Y.A. The study of near Earth objects and meteor showers // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1697. – P. 012036.

4. **Сергиенко М.В.**, Соколова М.Г., Холшевников К.В. Многофакторная методика поиска малых тел на близких орбитах // *Астрономический журнал*. – 2020. – Т. 97. – № 5. – С. 432-440.
5. **Sergienko M.V.**, Sokolova M.G., Andreev A.O., Nefedyev Y.A. Genetic analysis of the meteor showers and asteroids // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol.1400. – P. 022045.
6. Sokolova M.G., **Sergienko M.V.**, Nefedyev Y.A., Andreev A.O., Nefedyev L.A. Genetic analysis of parameters of near earth asteroids for determining parent bodies of meteoroid streams // *Advances in Space Research*. – 2018. – Vol. 62, Issue 8. – P. 2355-2363.
7. Sokolova M.G., Nefedyev Y.A., **Sergienko M.V.**, Demina N.Y., Andreev A.O. Analysis of the Lyrids' meteor stream structure for long timeslots // *Advances in Space Research*. – 2016. – Vol. 58, Issue 4. – P. 541-544.
8. Соколова М.Г., **Сергиенко М.В.** Сравнение структур метеорных потоков кометного и предположительно астероидного происхождения // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. – 2016. – Т. 50. – № 6. – С. 401-411.
9. Соколова М.Г., **Сергиенко М.В.** Астероиды, сближающиеся с Землей, как возможные родительские тела метеорных потоков // *Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки*. – 2016. – Т. 158. – № 4. – С. 583-592.

Иные публикации по теме диссертации

1. Nefedyev Y.A., **Sergienko M.V.**, Andreev A.O. Analysis of orbital elements of near earth objects over a long-term period // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2021. – Vol. 56, Issue 1. – P. 6087.
2. Nefedyev Y.A., **Sergienko M.V.**, Andreev A.O. The coordinate ranging of the delta Cancrids meteor shower // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2021. – Vol. 56, Issue 1. – P. 6088.
3. Андреев А.О., Соколова М.Г., Нефедьев Ю.А., **Сергиенко М.В.** Астероидно-кометная опасность и генетические связи малых небесных тел // *Минералы: строение, свойства, методы исследования*. – 2020. – № 11. – С. 21-22.
4. **Сергиенко М.В.**, Соколова М.Г., Андреев А.О., Нефедьев Ю.А. Метод нахождения родительских тел для малых метеорных потоков // *Минералы: строение, свойства, методы исследования*. – 2020. – № 11. – С. 266-267.
5. **Сергиенко М.В.**, Соколова М.Г., Нефедьев Ю.А., Андреев А.О. Исследование генетических связей метеорного потока к-цигниды // *Минералы: строение, свойства, методы исследования*. – 2020. – № 11. – С. 268-269.
6. Соколова М.Г., **Сергиенко М.В.** Радианты и элементы орбит метеороидов комплекса δ -Канкриды // *Научные труды Института Астрономии РАН*. – 2020. – Т. 5. № 3. – С. 125-128.
7. **Sergienko M.V.**, Sokolova M.G., Andreev A.O., Nefedyev Y.A. The kappa cygnids meteoroid shower and its connection with near-earth asteroids // *Meteoritics & planetary science*. – 2019. – Vol. 54, Issue 2. – P. 6056.
8. **Sergienko M.V.**, Sokolova M.G., Andreev A.O., Nefedyev Y.A. Analysis of the genetic connections between near-earth objects and delta cancrids meteoroids // *Meteoritics & planetary science*. – 2019. – Vol. 54, Issue 2. – P. 6057.

9. Sokolova M.G., **Sergienko M.V.**, Andreev A.O., Nefedyev Y.A. Dynamic evolution of the orbits of 2001yb5 and (356394) 2010qd2 asteroids // Meteoritics & planetary science. – 2019. – Vol. 54, Issue 2. – P. 6059.
10. Nefedyev Y.A., Sokolova M.G., Andreev A.O., **Sergienko M.V.**, Demina N.Y. The use of the d-criterion method for the analysis of observational data of tunguska event // Meteoritics & planetary science. – 2018. – Vol. 53, Issue S1. – P. 6188.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 9 публикациях, в рецензируемых научных журналах, входящих в базы цитирования SCOPUS, WoS, РИНЦ, рекомендованных ВАК. Результаты и выводы, полученные в рамках данной диссертационной работы, докладывались на различных научных семинарах, итоговых научных конференциях КФУ, а также автор докладывал результаты работы на Международных и Всероссийских конференциях.

Основные результаты диссертации докладывались Всероссийских и Международных конференциях:

Всероссийские конференции:

1. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2017 «Астрономия: познание без границ», г. Ялта, Крым, Россия, 17 сентября – 22 сентября 2017 г.
2. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2021: «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Москва, 23-28 августа 2021 г.
3. Всероссийская астрометрическая конференция "Пулково-2018" 1-5 октября 2018 г.
4. Третья астрометрическая конференция-школа «Астрометрия вчера, сегодня, завтра» 14–16 октября 2019 г., ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия.

Международные конференции:

1. Международная конференция «Околоземная астрономия – 2015», п. Терскол, Кабардино-Балкария, Россия, 31 августа – 5 сентября 2015 г.
2. IX Международная научная конференция « Физика солнечной плазмы и активность Солнца», пгт. Научный, Крым, Россия 4 сентября – 10 сентября 2016 г.
3. Международная конференция «Околоземная астрономия – 2017» , 2-6 октября 2017, Краснодарский край, Туапсинский район, п. Агой, Россия
4. Международная конференция «81st Annual Meeting of the Meteoritical-Society», г. Москва, 22-27 июля 2018 г.
5. Международная конференция «Околоземная астрономия-2019», 30 сентября - 4 октября 2019, Казань, Россия.
6. Международная конференция «PhysicA.SPb/2019» , ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, 22-24 октября 2019 г.
7. Международная конференция 20th International Scientific GeoConference SGEM 2020, 16 - 25 August 2020, Albena, Bulgaria.
8. Международная конференция «PhysicA.SPb/2020» , ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, 20-22 октября 2020 г.
9. Международная конференция «84th annual meeting of the meteoritical society», Чикаго, США, 15-21 августа 2021 г.

10. Международная конференция «PhysicA.SPb/2021», ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, 18-22 октября 2021 г.
11. Научно-практическая конференция с международным участием «Околосемная астрономия-2022», 18-21 апреля 2022 г.
12. Международная конференция «PhysicA.SPb/2022», ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, 17-21 октября 2022 г.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА В СОВМЕСТНЫХ РАБОТАХ

Автор самостоятельно получал основные результаты данной диссертационной работы. Содержание диссертационной работы, а также основные положения, выносимые на защиту, отражают личную позицию и вклад автора в опубликованные работы. Автор диссертации всегда принимал активное участие в анализе данных, расчетах и последующей интерпретации результатов. В написании всех статей, которые опубликованы в рамках данного диссертационного исследования, автор непосредственно участвовал, начиная от постановки задачи и непосредственных расчетов, до получения самих результатов и их интерпретации, а также, в написании и технической реализации самой статьи.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложение. Полный текст диссертации состоит из 218 страниц, включая 55 рисунков, 72 таблицы. Список литературы включает 185 пунктов на 16 страницах. Приложение состоит из 4 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведена актуальность, новизна исследования, цели и задачи диссертационной работы, научная, методическая и практическая значимость, методы и методология исследования, основные положения, выносимые на защиту, достоверность, апробация работы, описан личный вклад автора, приведены основные публикации по теме диссертации, приведены данные о структуре и объеме диссертации, кратко описаны основные разделы работы.

В **первой главе** приводится анализ современного состояния проблемы по изучению МНТ. Проанализированы и обобщены работы по проблеме изучения МНТ. Приведены результаты анализа по изучению генетических связей МНТ с использованием различных методов и подходов. Сделан вывод, что основное внимание в мировой практике посвящено поиску генетических связей с кометами и астероидами главных метеорных потоков, имеющих высокую наблюдаемую активность, при этом недостаточно изучены малые потоки с низкой наблюдаемой активностью. Поэтому актуальной задачей является исследование таких метеорных потоков в контексте их генетических связей с астероидами, сближающимися с Землей (АСЗ). Возможно, что ряд АСЗ могут быть ядрами потухших комет, которые утратили свою летучую составляющую за счет многократного прохождения перигелия. Приведено описание и сравнение цифровых баз данных современных наблюдений МНТ. Проанализированы разные методы наблюдений метеорных потоков – визуальный, телевизионный и радиолокационный. Сделан вывод, что наиболее пригодным для наших исследований является телевизионный метод наблюдения. Произведен анализ реестра метеорных потоков по классификации наблюдаемой активности и орбитальным параметрам (рис. 1). Построено распределение метеорных потоков-сирот по величине

большой полуоси, сделан вывод, что в основном метеорные потоки имеют размеры средней орбиты потока, меньше, чем 5 а.е., следовательно, возможно проводить для них поиск потенциальных РТ среди астероидов, пересекающих орбиту Земли. Произведен анализ реестра базы данных АСЗ как потенциальных кандидатов для поиска РТ метеорных потоков (рис. 2). Проанализированы физико-химические и орбитальные параметры групп околоземных астероидов Атоны, Аполлоны, Амуры, Атиры как потенциальных кандидатов для поиска РТ метеорных потоков (рис. 3-6). Сделан вывод, что группы астероидов Аполлоны и Амуры являются наиболее подходящими для поиска в них РТ для метеорных потоков. Созданы рабочие (модифицированные) базы данных метеорных орбит и орбит астероидов, используемые нами для расчетов.

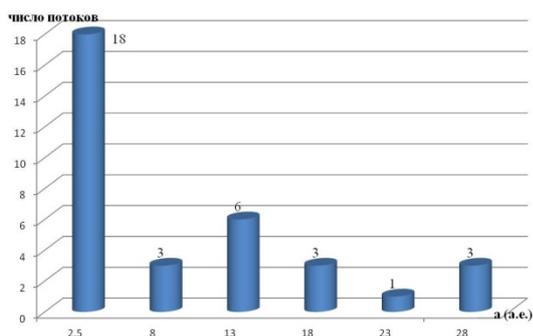


Рис. 1. Распределение по большой полуоси средних орбит метеорных потоков-сирот

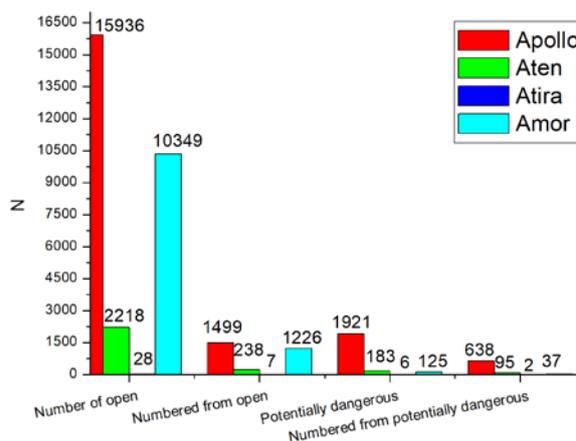


Рис. 2. Анализ цифровой базы АСЗ

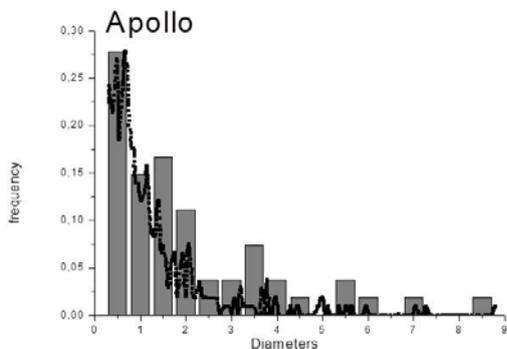


Рис. 3. Анализ распределения АСЗ по диаметру в группе Аполлоны

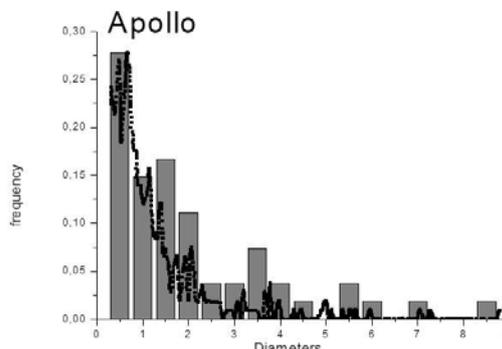


Рис. 4. Анализ распределения АСЗ по диаметру в группе Аполлоны

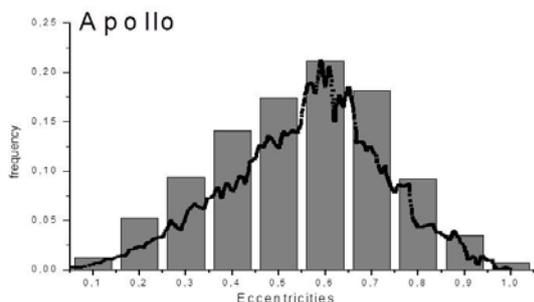


Рис. 5. Анализ распределения АСЗ по эксцентриситету в группе Аполлоны

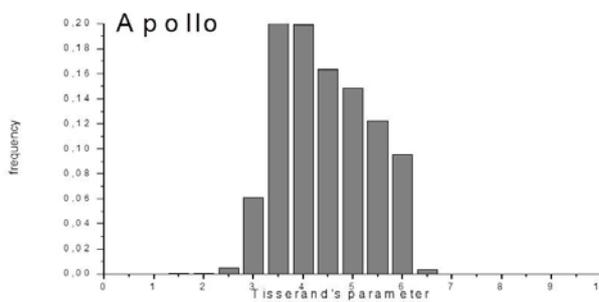


Рис. 6. Анализ распределения АСЗ по параметру Тиссерана в группе Аполлоны

Приведены данные и описание малых метеорных комплексов δ -Канкриды, κ -Цигниды, h -Виргиниды, Андромедида и ρ -Геминиды к которым мы применяем разработанный нами синтетический метод генетически связанных МНТ.

Во **второй** главе рассмотрено создание синтетического метода по определению генетических связей МНТ на основе совокупности критериев подобия орбит Драммонда, метрики Холшевникова и квазистационарных параметров μ и ν , параметра Тиссерана T , полученных как следствие из ограниченной задачи трех тел, и долготы перигелия π (рис. 7). Определены основные критерии для оценки параметров генетических связей МНТ. Показано, что критерии генетической общности могут быть как безразмерными D критериями, так и размерными метриками К.В. Холшевникова. Проведено тестирование D критериев на их устойчивость к геометрии орбит и ошибок методов наблюдений. Показано, что D критерий Драммонда имеет более высокую внешнюю и внутреннюю сходимость относительно геометрии орбит МНТ и селекционных ошибок наблюдений метеоров разными методами. В рамках дополнительных критериев применяются квазистационарные параметры динамической эволюции и параметр Тиссерана, полученные как следствие из ограниченной задачи трех тел. Произведен анализ их значений на устойчивость. Рассмотрены существующие способы определения верхних пороговых значений критериев и проблемы неоднозначности их определения. Сделан вывод, что отсутствие единой методики определения пороговых значений критериев приводит к тому, что в научных публикациях в качестве РТ для конкретного метеорного потока выявляются разные МНТ. Описан алгоритм построения и использования синтетического метода по определению генетических связей МНТ. Определена актуальность и практическая значимость авторского синтетического метода по нахождению генетических связей МНТ.



Рис. 7. Синтетический метод по нахождению генетических связей околоземных объектов

В **третьей** главе описан созданный способ определения пороговых значений всех используемых критериев по единой методике в рамках авторского синтетического метода. Разработана методика независимого отбора кандидатов в РТ, основанная на оценке попадания вероятного РТ в интервал значений – пороговое значение каждого критерия \pm среднеквадратичное отклонение σ и определение меры выполнения совокупности всех критериев по аналогии с определением произведения вероятности совместных событий. Приводится результат исследования параметров единой методики определения верхних

пороговых значений критериев и способа отбора генетически связанных МНТ на основе разработанного автоматизированного программного комплекса анализа малых небесных тел АПКМНТ.

Изначально метод предполагает, что для каждой используемой базы данных орбит метеоров, рассчитываются элементы средней орбиты потока метеоров с использованием элементов индивидуальных орбит метеороидов и их дисперсий. Данный подход направлен на учет начальных условий выброса метеороидов из РТ и последующую эволюцию их орбит. Далее задается алгоритм определения пороговых значений критериев. В рамках созданного алгоритма, индивидуально для каждого метеорного потока, для всех используемых в синтетическом методе критериев, между орбитой метеороида и средней вычисленной орбитой потока, производится расчет средних пороговых значений, их дисперсий и среднеквадратичных отклонений. Было показано, что для каждого критерия, приведенного в синтетическом методе необходимо определять свои пороговые значения и их среднеквадратичные ошибки (σ) для каждого исследуемого метеорного потока.

Описан разработанный независимый способ отбора кандидатов в РТ. Независимый отбор кандидатов в РТ базируется на оценке близости орбит МНТ путем проверки выполнения каждого критерия согласно полученным для них пороговым значениям и их среднеквадратическим ошибкам σ (СКО). Степень близости орбит МНТ оценивается некоторым фактором P следующим образом. Фактор принимается равным 1, когда значения критерия Драммонда и метрики Холшевникова меньше или равны вычисленному пороговому значению критерия; значение 0,9 принимается в случае, когда значения критериев Драммонда и Холшевникова, а также долготы перигелия, параметра Тиссерана и квазистационарных параметров попадают в интервал пороговое значение критерия $\pm \sigma$ (СКО); соответственно, значение 0,8 принимается при попадании в интервал пороговое значение критерия $\pm 2\sigma$ и т.д. Общий фактор P определяется как произведение выполнения совместных событий, т.е. совокупности выполнения всех критериев с определенным пороговым значением. Таким образом, отбор объектов с близкими орбитами выполняется путем вычисления общего фактора P как меры выполнения всех критериев, чем выше этот фактор, тем более вероятна генетическая связь МНТ.

Описан созданный на языке Си++ программный комплекс многопараметрического анализа генетических связей МНТ (АПКМА), который содержит 5 модулей и отражает все этапы исследования: 1) Модуль по нахождению значений согласно критериям D Драммонда, метрики ρ Холшевникова, квазистационарных параметров μ и ν , долготы перигелия π , параметра Тиссерана T между средней орбитой метеорного потока и индивидуальными орбитами метеороидов с помощью синтетического метода. 2) Модуль по оценке пороговых значений и определению степени выполнения совокупности критериев D Драммонда, метрики ρ Холшевникова, квазистационарных параметров μ и ν , долготы перигелия π , параметра Тиссерана T , с использованием индивидуальных орбит метеороидов и средней орбиты метеорного потока, их дисперсий σ^2 и среднеквадратичных отклонений σ . 3) Модуль по отбору кандидатов в РТ. 4) Модуль по анализу и оценке взаимосвязей динамических параметров выделенных NEA (Near-Earth Asteroids, околоземные астероиды) согласно независимым критериям Ашера D_{AH} и Саутворта-Хоккинса D_{SH} .

Приведены основные результаты применения синтетического метода к исследованию генетической связи метеорных потоков δ -Канкриды, k -Цигниды, h -Виргиниды, ρ -Геминиды, Андромедиды с NEA групп Аполлоны и Амуры. Указаны вычисленные автором средние орбиты исследованных метеорных комплексов. По каждому из критериев генетической

общности, входящих в синтетический метод, приведены рассчитанные пороговые значения. Для каждого метеорного потока показан результат применения независимого способа отбора астероидов и приведен анализ полученных результатов.

В четвертой главе приведен анализ стохастических связей малых метеорных потоков δ -Канкриды, k -Цигниды, h -Виргиниды, ρ -Геминиды, Андромедиды с АСЗ на основе синтетического метода и анализируются полученные результаты. Сделаны основные выводы по достоверности и надежности найденных параметров генетически связанных МНТ. Выполнены работы по нахождению основных параметров генетической связи АСЗ, при этом были использованы современные орбиты АСЗ, которые могут определенным образом совпасть в процессе вычислений на программном комплексе АПКМНТ. Для более надежного анализа и подтверждения достоверных генетических связей была исследована орбитальная эволюция NEA и определены количественные характеристики пересечения их орбиты с орбитой Земли. Необходимо отметить, что метеорные потоки, связанные с АСЗ должны пересекать орбиту Земли примерно такое же количество раз, как и связанные с ними АСЗ.

Была проведена проверка генетических связей групп РТ среди выделенных NEA между собой при помощи использования независимых критериев - критерия Саутворта-Хоккинса, содержащего значения пяти элементов орбиты перигелийного расстояния q , эксцентриситета e , наклона i , аргумента перицентра ω , долготы восходящего узла Ω , и его модификации – D критерия Ашера, который включает в себя значения трех элементов орбиты перигелийного расстояния q , эксцентриситета e , наклона i . В результате, получено, что все связанные с метеорными комплексами АСЗ находятся в хорошем согласии взаимных значений критериев Ашера и Саутворта-Хоккинса, следовательно, могут быть вероятными РТ для метеорных потоков.

Сделан вывод, что NEA, отождествленные с потоком Северные δ -Канкриды (NCC) это (1991 AQ), (2017 YO4), (2010 XC11), (2015 PU228), (2001YB5), 2212 Nephaisos (1978 SB), (2019 AQ), (2011YA), (2010 QD2), (2014 YQ34), (2006 BF56), (2003 RW11), (2012 XR134), (2011 YA), (2003 AA83), (2013 AQ63), (2019 BH1). Для потока Южные δ -Канкриды (SCC) отождествлены астероиды (2017 YO4), (2019 AQ), (1991 AQ), (2015 PU228), (2010 QD2), (2014 YQ34), 2212 Nephaisos (1978 SB), (2011 SR12), (2014 RS17), (2001YB5), (2001 BO61), (2003 RW11), (2006 AM8), (2006 BF56), (2010 XC11), (2002 RT129), (2017 BT93), (2016 SN2), (2005 RC), (2014 RD11), (2004 BF85), (2014 BX2), (2015 PC), (2018 RB), (2012 XR134), (2016 AM66), (1990 SM).

С потоком k -Цигниды связаны выделенные астероиды Аполлоны - (2014 UN210), (2002 LV), (2001 MG1), (2017 NW5), (2008 ED69), (2004 LA12), и астероиды Амуры (2002 GJ8), и, возможно, (2010 QA5).

С потоком h -Виргиниды связаны АСЗ – (2014 HD198), (2001 SZ269), (2014 HU2), (2010 RL43), (2010 TP55), (2014 JH15), и астероид группы Амуры (2014 JF57).

К потоку Андромедиды можно отнести (2020 SR7), (2021 FD), (2009 WJ1), (2009 ST103), (2021 EN4), (2003 UQ25), (2009 TA1), (2004 GB2), (2016 UP36), (2016 FC14), (2021 SX3), (2012 EL5).

С потоком ρ -Геминиды можно связать астероиды (2006 WP127), (2011 OX17), (2007 VW137), (2010 AG30), (2005 YX128), (2000 WK63), (2009 YG), (2011 YA), (2008 OO), (2016 PZ39), (2019 AQ), (2014 OU344), (2017 NN6), (2019 AN12), (2014 XJ3), (2008 BC15), (2000 OM), (2003 AA83).

Впервые для δ -Канкрид за длительный период наблюдений 17 лет изучена структура потока, характер изменения функции светимости метеоров вдоль орбиты Земли, определена величина среднегодовой максимальной активности, момент ее наступления. Для δ -Канкрид положение максимальной активности наблюдается на долготе Солнца в интервале 298.5° и совпадает с протяженным минимумом параметра S распределения метеороидов по массам в потоке. Сделан вывод, что родительское тело δ -Канкрид в период образования роя могло иметь орбиту с долготой узла, близкой значению 298.5 . На основе телевизионных наблюдений изучена структура радиантов ветвей потока, построены зависимости большой полуоси от массы $a(m)$ и эксцентриситета от массы $e(m)$ и произведен их анализ. Анализируя влияния негравитационного эффекта Пойнтинга-Робертсона (П-Р) на метеороидные частицы оценен возраст потока δ -Канкриды.

На основе телевизионных наблюдений получены координаты радиантов ветвей потоков, хорошо согласующиеся с имеющимися немногочисленными данными других авторов. Уточнены значения суточного смещения радиантов, получены значения площади радиации. Анализ распределений орбитальных элементов северной NCC и южной SCC ветвей δ -Канкрид (DCA) впервые позволил сделать вывод о том, что для диапазона звездных величин от -5^m до $+3^m$ имеет место уменьшение больших полуосей и эксцентриситетов орбит в зависимости от яркости метеоров.

В **заключении** приводятся основные полученные результаты в данной диссертационной работе, указано практическое применение полученных результатов, показаны перспективы дальнейших исследований с использованием полученных в работе результатов. Подчеркнута актуальность применения синтетического метода к анализу генетических связей среди МНТ к анализу других метеорных ассоциаций.

В **приложении** приведен дополнительный поясняющий материал к диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Основные результаты, полученные в работе, можно сформулировать в виде следующих выводов.

1. Произведен анализ современного состояния по изучению МНТ. Рассмотрены основные задачи и современное состояние в области изучения МНТ. Рассмотрены основные метеорные базы и имеющиеся каталоги метеорных орбит, и база орбит астероидов. На основе имеющихся данных создана собственная база МНТ, где все параметры приведены в единую систему.
2. Произведен анализ реестра метеорных потоков по классификации наблюдаемой активности и орбитальным параметрам. Показано, что большая часть наблюдаемых в настоящее время потоков-сирот относится к малым метеорным потокам. Построено распределение метеорных потоков-сирот по величине большой полуоси, сделан вывод, что в основном потоки имеют размеры средней орбиты потока, меньше, чем 5 а.е., следовательно, возможно проводить для них поиск потенциальных РТ среди астероидов, пересекающих орбиту Земли. Приведены основные данные об исследуемых малых потоках-сиротах δ -Канкриды, обе ветви NCC и SCC, к-Цигниды, h-Виргиниды, ρ -Геминиды, Андромедиды. Для каждого исследуемого метеорного потока приводятся рассчитанные нами средние орбиты по каждому каталогу метеорных орбит.

3. Выполнен анализ реестра базы данных АСЗ как потенциальных кандидатов для поиска РТ метеорных потоков. Произведен анализ физико-химических и орбитальных параметров групп околоземных астероидов Атоны, Аполлоны, Амуры, Атиры как потенциальных кандидатов для поиска РТ метеорных потоков. Сделан вывод, что осуществлять поиск РТ для метеорных потоков нужно в группах астероидов Аполлона и Амура.
4. Выполнен анализ критериев генетической общности и критериев, учитывающих гравитационный и негравитационные факторы. Средние значения D-критериев Саутворта-Хоккинса, Драммонда, Йопека, критериев, основанных на совпадении долготы перигелия π орбит, близости гравитационных параметров μ , ν и величины T параметра Тиссерана и их применимость были получены для потоков кометного Дракониды, Леониды, Лириды, Ориониды, Персеиды, Урсиды и потоков Дельта-Канкриды, Виргиниды, Скорпиды/Саггитариды, Альфа-Каприкониды астероидного происхождения. Получено, что D-критерии отождествления орбит родительского тела и метеороида дают для кометных потоков среднее значение более низкое не превышающее 0.2, в отличие от астероидных потоков, для которых значение выше установленного значения в 0.2. D критерии были проанализированы на устойчивость к геометрии орбит и ошибки методов наблюдения, получено, что D критерий Драммонда более устойчивый к геометрии орбит метеороидов и ошибкам методов наблюдения.
5. Анализ значений квазистационарных параметров μ и ν , и параметра Тиссерана, являющихся следствием решения ограниченной задачи трех тел, показал, что МНТ испытывают тесные сближения с планетами. Сравнение значений параметра Тиссерана, полученных для планета-потока и для планета-родительского тела может подтвердить или опровергнуть их общее генетическое происхождение. Полученные результаты анализа квазистационарных параметров μ и ν , и параметра Тиссерана, показали, что их вместе можно использовать в качестве критериев и признаков при поиске и отождествлении родительского тела к конкретному метеорному потоку. Важно, чтобы эти 3 критерия сохраняли близость своих значений между собой при вычислении их для МНТ.
6. Разработана усовершенствованная методика поиска вероятных связей метеорных потоков-сирот с околоземными объектами (астероидами, потухшими кометами или осколками их разрушения) и создан синтетический метод по нахождению генетических связей МНТ. Синтетический метод по нахождению генетических связей МНТ создан на основе критериев подобия орбит Драммонда, метрики Холшевникова и квазистационарных параметров μ и ν , параметра Тиссерана T, полученных как следствие из ограниченной задачи трех тел, и долготы перигелия π , который сохраняет постоянство при эволюции орбиты. Анализ показал, что для повышения точности определения генетических связей МНТ и достоверности полученных результатов, синтетический метод по нахождению генетических связей МНТ должен включать совокупность критериев:
 - безразмерный D критерий Драммонда;
 - размерная метрика Холшевникова;
 - долгота перигелия π ;
 - параметр Тиссерана T;

- квазистационарные параметры μ и ν , которые являются следствием ограниченной задачи трех тел.

Последнее получается в том случае, когда тело с бесконечно малой массой движется под влиянием притяжения Солнца и планеты, в данном случае Юпитера. При этом параметр μ представляет собой проекцию кинетического момента движения на нормаль к плоскости эклиптики. Квазистационарный параметр ν применяется для оценки вероятности тесных сближений с планетами. Долгота перигелия π испытывает определенные изменения, с другой стороны, согласно работы Шестаки [25] эти изменения незначительны. В нашей работе мы склонились к мнению Шестаки как к более аргументированному. Обосновано, что применение каждого из параметров повышает достоверность выводов о наличии родственных связей малых тел. Показано, что использование синтетического метода по исследованию генетической связи МНТ позволяет получить более достоверные результаты, которые находятся в хорошем согласии с результатами ведущих мировых ученых.

7. Рассмотрена проблема отсутствия единой методики определения пороговых значений критериев генетической общности МНТ. Как следствие, один и тот же метеорный поток может быть отождествлен с различными МНТ у разных исследователей. В рамках решения данного вопроса, разработан алгоритм определения пороговых значений критериев генетических связей МНТ. Алгоритм основан на определении элементов средней орбиты потока и их дисперсий по индивидуальным орбитам метеороидов, что позволяет учитывать начальные условия выброса метеороидов из РТ и последующую динамику их орбит. В рамках созданного алгоритма производился расчет всех используемых в модели критериев для каждой пары орбит, в которую входили как индивидуальная орбита метеороида из созданной рабочей базы данных, так и средняя орбита потока. Показано, что задания пороговых значений для каждого из всех используемых в синтетическом методе критериев на основе вычисленных индивидуальных значений метеорных орбит и их среднеквадратичных ошибок наиболее обосновано с точки зрения условий формирования МНТ и его эволюции. При вычислении пороговых значений критериев учитывается дисперсия орбит метеороидов в потоке вследствие их эволюции и ошибки наблюдений данных каталогов орбит.
8. Степень достоверности принятия гипотезы о близости двух орбит выполняется на основе фактора P , по аналогии с вероятностным подходом. Для этого разработан независимый способ отбора кандидатов в РТ. При этом сделан вывод, что в рамках синтетического метода, степень выполнения каждого критерия синтетического метода должна оцениваться путем задания фактора P , чем выше этот фактор, тем более вероятна генетическая связь МНТ.
9. Для реализации авторского синтетического метода и выявления принадлежности метеоров к определенному метеорному потоку была написана программа ЭВМ на языке Си++ - автоматизированный программный комплекс анализа МНТ АПКМНТ, который содержит 5 модулей и отражает все этапы исследования:
 - Модуль по нахождению значений согласно критериям D Драммонда, метрики ρ Холшевникова, квазистационарных параметров μ и ν , долготы перигелия π , параметра Тиссерана T между средней орбитой метеорного потока и индивидуальными орбитами метеороидов с помощью синтетического метода.

- Модуль по оценке пороговых значений критериев синтетического метода, с использованием индивидуальных орбит метеороидов и средней орбиты метеорного потока, их дисперсий σ^2 и среднеквадратичных отклонений σ .
- Модуль по определению степени выполнения совокупности критериев.
- Модуль по отбору кандидатов в РТ.
- Модуль по анализу и оценке взаимосвязей динамических параметров выделенных АСЗ согласно независимым критериям Ашера D_{AH} и Саутворта-Хоккинса D_{SH} .

На основе проделанной работы были созданы индивидуальные каталоги метеорных орбит по каждому метеорному потоку с учетом метода наблюдения и без дублирования орбит внутри потока и метода наблюдения, что часто наблюдается при объединении нескольких каталогов орбит.

10. Произведен анализ стохастических связей малых метеорных комплексов δ -Канкриды, κ -Цигниды, h -Виргиниды, Андромедиды и ρ -Геминиды с АСЗ на основе синтетического метода и выполнена оценка взаимосвязей в группах РТ на основе независимых критериев D_{SH} Саутворта-Хоккинса и его модификации - критерия D_{AH} Ашера. Для более надежного анализа и подтверждения достоверных генетических связей были исследованы элементы орбиты АСЗ и определены количественные характеристики пересечения их орбиты с орбитой Земли. Необходимо отметить, что метеорные потоки, связанные с АСЗ должны пересекать орбиту Земли примерно такое же количество раз, как и связанные с ними АСЗ.
11. Проведена проверка генетических связей выделенных АСЗ между собой с помощью использования независимых критериев - D критерия Ашера, который включает в себя значения трех элементов орбиты q , e , i и критерий Саутворта-Хоккинса, содержащий значения пяти элементов орбиты q , e , i , ω , Ω . В результате, получено, что все связанные с метеорными комплексами АСЗ находятся в хорошем согласии взаимных значений критериев Ашера и Саутворта-Хоккинса, следовательно, могут быть вероятными РТ для метеорных потоков.

В результате определено, что связанными с потоком δ -Канкриды (NCC) являются астероиды (1991 AQ), (2017 YO4), (2010 XC11), (2015 PU228), (2001 YB5), 2212 Nephaisstos (1978 SB), (2019 AQ), (2011 YA), (2010 QD2), (2014 YQ34), (2006 BF56), (2003 RW11), (2012 XR134), (2011 YA), (2003 AA83), (2013 AQ63), (2019 BH1).

Для потока δ -Канкриды (SCC) - астероиды (2017 YO4), (2019 AQ), (1991 AQ), (2015 PU228), (2010 QD2), (2014 YQ34), 2212 Nephaisstos (1978 SB), (2011 SR12), (2014 RS17), (2001 YB5), (2001 BO61), (2003 RW11), (2006 AM8), (2006 BF56), (2010 XC11), (2002 RT129), (2017 BT93), (2016 SN2), (2005 RC), (2014 RD11), (2004 BF85), (2014 BX2), (2015 PC), (2018 RB), (2012 XR134), (2016 AM66), (1990 SM).

С потоком κ -Цигниды связаны астероиды Аполлоны - (2014 UN210), (2002 LV), (2001 MG1), (2017 NW5), (2008 ED69), 2004 LA12, и астероиды Амуры (2002 GJ8), и, возможно, (2010 QA5).

С потоком h -Виргиниды связаны АСЗ – (2014 HD198), (2001 SZ269), (2014 HU2), (2010 RL43), (2010 TP55), (2014 JH15), и астероид Амур (2014 JF57).

К потоку Андромедиды можно отнести (2020 SR7), (2021 FD), (2009 WJ1), (2009 ST103), (2021 EN4), (2003 UQ25), (2009 TA1), (2004 GB2), (2016 UP36), (2016 FC14), (2021 SX3), (2012 EL5).

- И с потоком ρ -Геминиды можно связать астероиды (2006 WP127), (2011 OX17), (2007 VW137), (2010 AG30), (2005 YX128), (2000 WK63), (2009 YG), (2011 YA), (2008 OO), (2016 PZ39), (2019 AQ), (2014 OU344), (2017 NN6), (2019 AN12), (2014 XJ3), (2008 BC15), (2000 OM), (2003 AA83).
12. Изучение статистики наблюдательных данных малых метеорных потоков показало, что в отличие главных потоков, малые потоки мало обеспечены фотографическими наблюдениями, дающими более точные орбиты. Каталоги орбит, полученные из телевизионных наблюдений, хотя и имеют меньшую точность определения орбиты метеора, предоставляют орбиты значительно большего числа малых метеорных потоков. Для изучения активности потока и распределения метеороидов по массе полезно привлекать визуальные наблюдения. Это позволяет сделать предположения о стадии эволюции роя и возрасте, характере выбросов частиц из РТ, установить то значения долготы узла Ω РТ, которое было у него в момент образования связанного с ним потока.
 13. Впервые для δ -Канкрид за длительный период наблюдений 17 лет изучена структура потока, характер изменения функции светимости метеоров вдоль орбиты Земли, определена величина среднегодовой максимальной активности, момент ее наступления. Для δ -Канкрид положение максимальной активности наблюдается на долготе Солнца в интервале 298.5° и совпадает с протяженным минимумом параметра S . Сделан вывод, что родственное связанное с потоком δ -Канкрид тело, в момент образования связанного с ним потока, имело долготу узла орбиты $\Omega=298.5^\circ$. Для δ -Канкрид наблюдается низкая активность и широкий максимум, нисходящая и восходящая ветви профиля активности пологие, ширина потока 3.8° , что составляет половину максимальной активности потока. Все вышеперечисленное является характерными особенностями структуры старых потоков. Моделирование профилей активности и интегральной пространственной плотности потока δ -Канкрид для различных масс метеороидов показало, что положение максимумов для мелкой и крупной составляющей частиц потока не совпадает. Смещение по долготе Солнца для более мелких метеороидов наблюдается на 2° - 3° раньше. Пространственная структура потока показывает, что в пространстве в тысячу км располагается только 1 частица больше, чем один грамм по массе, в период максимальной активности это значение уменьшается до 800 км. Эти структурные характеристики сопоставимы, например, с потоком Орионид, в тоже время метеорный комплекс δ -Канкрид мало наблюдается.
 14. По данным SonatoCo и CAMS изучена структура радиантов ветвей потока, построены и проанализированы зависимости большой полуоси от массы и эксцентриситета от массы, оценены возрастные параметры потока δ -Канкрид за счет действия негравитационного эффекта Пойнтинга-Робертсона. По каталогу CAMS радианты прямое восхождение (RA), склонение (DE), их суточные смещения (dRA), (dDe) равны для NCC: RA= $130.4^\circ \pm 3.4^\circ$ DE= $21.7^\circ \pm 1.6^\circ$ dRA= $1.05^\circ \pm 0.00^\circ$ dDe= $-0.12^\circ \pm 0.00^\circ$; для SCC: RA= $128.4^\circ \pm 2.4^\circ$ DE= $13.9^\circ \pm 1.7^\circ$ dRA= $1.11^\circ \pm 0.00^\circ$ dDe= $-0.21^\circ \pm 0.00^\circ$. Субрадианты NCC, SCC в зависимости от массы метеороидов достоверно не выделяются.
 15. Для орбит NCC по каталогу CAMS в диапазоне наблюдаемых звездных величин от -2^m до $+3^m$ получены изменения большой полуоси и эксцентриситета в зависимости от массы. Получено, что большая полуось смещается на $a=0.193$ (a.e.), эксцентриситет $e=0.024$ в меньшую сторону в зависимости от уменьшения массы метеороидов. Таким

образом, сделано предположение, что северная ветвь потока NCC имеет возраст в диапазоне от 24000 до 30000 лет согласно объектам углеродного и кремниевого химсостава. На основе телевизионных наблюдений получены координаты радиантов ветвей потоков, хорошо согласующиеся с имеющимися немногочисленными данными других авторов. Уточнены значения суточного смещения радиантов, получены значения площади радиации. Анализ распределений орбитальных элементов северной NCC и южной SCC ветвей δ -Канкрид (DCA) впервые позволил сделать вывод о том, что большие полуоси и эксцентриситеты смещаются по значениям в меньшую сторону в зависимости от уменьшения массы метеороидов, такое поведение характерно для частиц от -5^m до $+3^m$.

16. Создана система генетических связей пяти малых метеорных потоков δ -Канкриды, к-Цигниды, h-Виргиниды, Андромедида и ρ -Геминиды и их родительских тел с использованием синтетического метода, алгоритма определения пороговых значений и независимого способа отбора родительских тел, и проведен анализ достоверности полученных результатов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор приносит благодарность сотрудникам кафедры астрономии КФУ и Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта при Казанском (Приволжском) федеральном университете, кандидату физико-математических наук, доценту Соколовой Марине Геннадьевне, за помощь при написании данной работы, член-корреспонденту НАНТ, доктору физико-математических наук, Кохировой Гульчехре Исроиловне за содействие при выполнении практических работ по анализу динамических параметров астероидов, доктору физико-математических наук, профессору Рябовой Галине Олеговне, за уделенное время и ценные рекомендации, своему научному руководителю, доктору физико-математических наук, профессору Нефедьеву Юрию Анатольевичу за всестороннюю поддержку и большую помощь в работе.

Автор благодарен Холшевникову К.В. за совместную и продуктивную работу, а также ценные разъяснения.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Шустов Б.М. Рыхлова Л.В. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2010. – 383 с.
2. Limbach M.A. Turner E.L. Exoplanet orbital eccentricity: Multiplicity relation and the Solar System // Accepted to Proc Natl Acad Sci U S A. – 2015. – Vol. 112, Issue 1. – P. 20-24.
3. A'Hearn M.F. Photometry of Comets // Solar System Photometry Handbook. Willmann-Bell. – Richmond. – Virginia. – 1983. – P. 1-3.
4. Ney E.P. Visibility of Comet Nuclei // Science. – 1982. – Vol. 215. P. 397-398.
5. Badescu V. Asteroids. Prospective Energy and Material Resources. – Springer. – 2013. – 689 p.
6. Ловелл Б. Метеорная астрономия. — М.: Физ-Мат. Лит. – 1958. — 490 с.
7. Бабаджанов П.Б. Метеоры и их наблюдение. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1987. – 95 с.
8. Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И., Обрубов Ю.В. Угасшие кометы и астероидно-метеороидные комплексы // Астрономический вестник. – 2015. Т.49. – № 3. – С.182 -189.

9. Чернетенко Ю. А. Разделившиеся кометы и обстоятельства разделения четырех комет // Труды ИПА РАН. – 2019. – № 51. – С. 93-107.
10. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Петрова С.Н., Башакова Е.А., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д., Русов С.А., Иванов А.В., Вершков А.Н., Мартюшева А.А., Барабанов С.И., Ерофеев Д.В., Кохирова Г.И., Хамроев У.Х., Буриев А.М. Базисные наблюдения потенциально опасных астероидов в 2017 году // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2017. – №4. – С. 24-31.
11. Международный астрономический союз (МАС), URL: https://www.iau.org/public/themes/meteors_and_meteorites/
12. Терентьева А.К. Малые метеорные рои // Результ. исслед. по междунар. геофиз. проектам, Исслед. метеоров. – 1966. – № 1. – С. 62-132.
13. Терентьева А.К. Орбиты малых метеорных роев // Астрон. циркуляр АН СССР. – 1967. – № 423. – С. 1-7.
14. Jewitt, D., Hsieh H., Agarwal J. The Active Asteroids // ASTEROIDS IV. The University of Arizona Press. – 2015. – P. 221-241.
15. Weissman P.R., Bottke Jr., W.F., Levison H.F. Evolution of Comets into Asteroids // Asteroids III. University of Arizona Press. Tucson. – 2002. – P. 669-686.
16. Kokhirova G.I., Kholshchevnikov K.V., Babadzhanov P.B., Khamroev U.H., Milanov D.V. Metric approaches to identify a common origin of objects in σ -Capricornids complex // Planetary and Space Science. – 2018. – Vol. 157. – P. 28.
17. Ryabova G.O. The Geminid meteor shower radiant: a mathematical model // MNRAS. – 2021. – Vol. 507. – Issue. 3. – pp. 4481-4486.
18. Kholshchevnikov K.V., Kokhirova G. I., Babadzhanov P. B., Khamroev U. H. Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2016. – Vol. 462. – Issue 2. – P. 2275-2283.
19. Drummond, J.D. A test of comet and meteor shower associations // Icarus. – 1981. – Vol. 45. – P. 545-553.
20. Крамер Е.Н., Шестака И.С. Квазистационарные параметры малых тел Солнечной системы // Астрономический вестник. – 1987. – Т. 21. – №1. – С. 75-83.
21. Tisserand F. Traite de mecanique celeste // Paris: Gouthier-Villar. — Vol. 4. — P. 200.
22. Asher D. J., Clube S.V.M., Napier W.M., Steel D.I. Coherent catastrophism // Vistas in Astronomy. – 1994. – Vol. 38. – P. 1-27.
23. Southworth R.B., Hawkins G.S. Statistics of meteor streams // Smithsonian Contributions to Astrophysics. – 1963. – Vol. 7. – P. 261-285.
24. Sergienko M.V., Sokolova M.G., Kholshchevnikov K.V. Multifactorial method of search for small bodies in close orbits // Astronomy reports. – 2020. – Vol. 64, Issue 12. – P. 1087-1092.
25. Шестака И.С. Комплексы малых тел Солнечной системы // Астрономический вестник. – 1994. – Т. 28. - № 6. – С. 70-82.