

УДК 524.3

## Ионизационная структура протопланетных дисков

*О.В. Кочина, В.В. Акимкин*

Институт астрономии РАН, ул. Пятницкая, 48, Москва, 119017  
*okochina@inasan.ru*

Поступила в редакцию 15 ноября 2017 г.

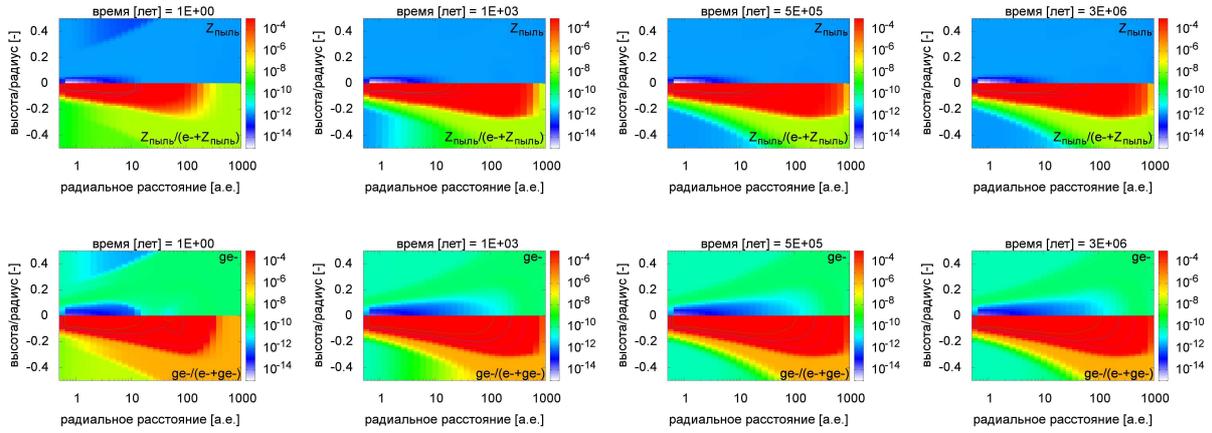
**Аннотация.** В работе представлено исследование ионизационной структуры протопланетных дисков с детальным учетом зарядки пылинок. В работе объединены два подхода к расчету ионизационной структуры дисков. Одна из представленных моделей (Ивлев и др., 2016) позволяет детально рассчитывать степень ионизации среды, где основная рекомбинация происходит на поверхности пылинок. В разреженной атмосфере диска и на его периферии основная рекомбинация происходит в газовой фазе, что определяет необходимость использования системы уравнений химической кинетики (Кочина, Вибе, 2014; Акимкин и др., 2013). Объединение данных подходов позволяет проследить степень ионизации среды по всему объему диска. Главным отличием от уже существующих моделей является отсутствие искусственных априорных предположений о функции распределения пылинок по размерам и зарядам. Описанные методы позволяют исследовать развитие магниторотационной неустойчивости, коагуляцию заряженной пыли и химическую структуру протопланетных дисков. Методы были объединены, исследовано влияние учета кратного заряда пылинок на химическую эволюцию некоторых компонент.

IONIZATION STRUCTURE OF PROTOPLANETARY DISKS, *by O.V. Kochina, V.V. Akimkin.* The study of the ionization structure of protoplanetary disks with a detailed approach to dust charge calculations is presented. Chemical evolution of some astrochemically significant species in the presence of grains of multiple charge is studied.

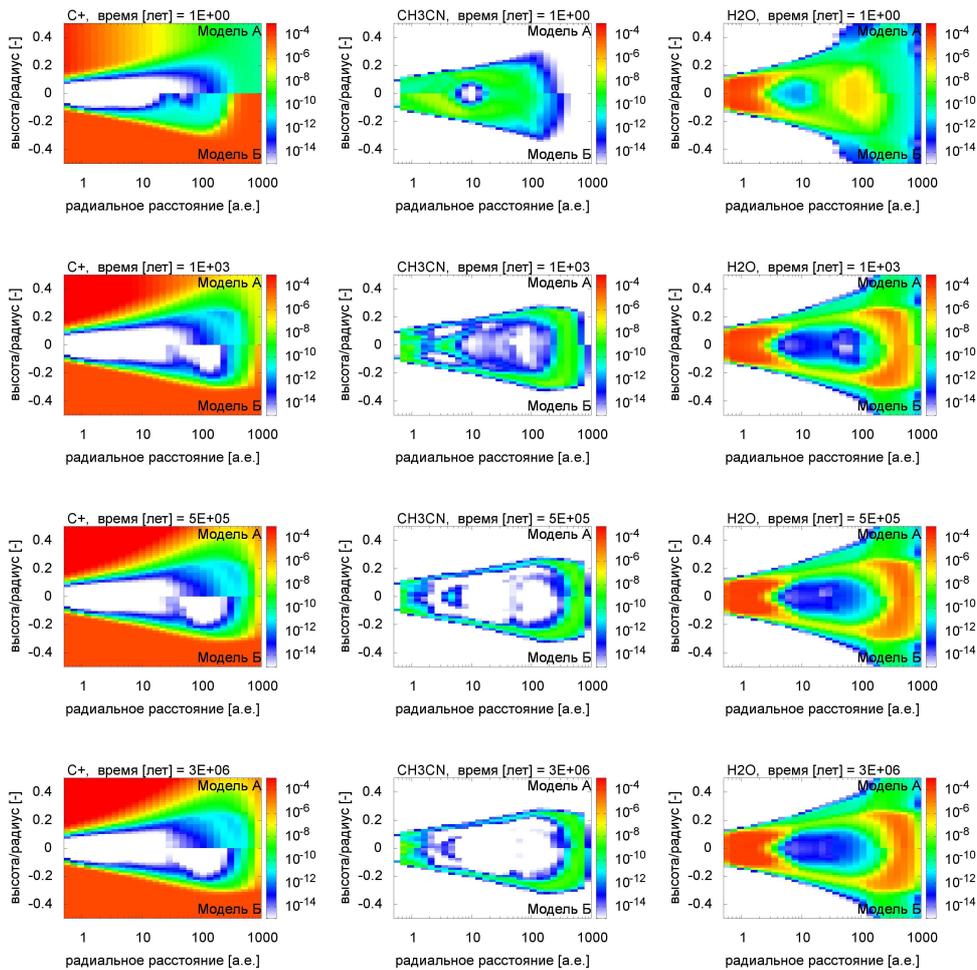
**Ключевые слова:** протопланетные диски, астрохимия

---

Баланс между ионизацией и рекомбинацией в условиях протопланетных дисков является ключевым фактором для ряда физических процессов, таких как химические реакции, зарядка пылинок, взаимодействие пыли и газа с магнитным полем, развитием неустойчивостей. Ранее в работе (Ивлев и др., 2016) мы определили критическую плотность газа, выше которой рекомбинация электронов и ионов с участием пылинок доминирует над газовой рекомбинацией. Для данного режима в работе (Ивлев и др., 2016) была представлена самосогласованная аналитическая модель, позволяющая рассчитывать содержание заряженных компонентов (ионов, электронов, спектр зарядов пылинок) и ряд ее приложений. В частности, показана неприменимость предположения о низких зарядовых числах пылинок в условиях протопланетных дисков и исследовано влияние коагуляции пыли на зарядовую структуру и развитие магниторотационной неустойчивости. Определение зарядовой структуры диска в работе (Ивлев и др., 2016) основано на решении балансных уравнений зарядки пылинок. При этом спектр размеров и зарядовых чисел считается произвольным и не ограничивается малыми зарядовыми числами, как это часто предполагается при трактовке заряда пыли в астрохимических сетках реакций.



**Рис. 1.** Распределение заряда в диске. Сверху: Модель А – астрохимический подход. На верхней части графиков – относительная концентрация заряженных пылинок, на нижней – доля электронов на поверхности пылинок от полной концентрации электронов в газе и на пыли. Снизу: Модель Б – метод балансных уравнений. На верхней части графиков – относительное содержание электронов на пыли, на нижней – доля электронов на пыли относительно общего числа электронов



**Рис. 2.** Газофазные содержания для  $C^+$ ,  $CH_3CN$  и  $H_2O$  в Модели А (сверху) и Модели Б (снизу) для различных моментов времени. Цвет – относительное содержание компонента  $N_i/N_H$

В условиях протопланетных дисков первый метод позволяет хорошо проследить важный процесс – переход плазмы из электрон-ионного состояния в пыль-ионное и пыль-пылевое, где доминантными носителями зарядов становятся пылинки. Другое преимущество первого метода – его применимость и для случая существенно проэволюционировавшей крупной пыли, когда зарядовые числа отдельных пылинок намного больше единицы.

В сетках химических баз данных присутствует множество реакций, в которых компонент вступает во взаимодействие с пылинкой, например, реакции диссоциативной рекомбинации. Однако в реальности компонент взаимодействует не со всей пылинкой, а только с электроном, находящимся на ней. Потому во второй части исследования мы внесли изменения в сетку химических реакций: ввели новый компонент  $ge^-$ , представляющий собой электрон на поверхности пылинки, и заменили им все реакции, где участвовали заряженные пылинки. На рисунках представлены результаты тестирования методики в первом приближении. Модель А – это модель, в которой химическая эволюция рассчитывается с классическим подходом к заряженной пыли, в которой пылинки являются компонентами-носителями поверхностных зарядов и могут быть заряжены положительно, отрицательно или нейтрально. Модель Б – это модель с балансным подходом к зарядке пыли, пылинки могут обладать кратным зарядом, носителем же поверхностных зарядов являются поверхностные электроны  $ge^-$ , участвующие в химических реакциях.

Для оценки влияния балансного подхода на химическую эволюцию были рассмотрены несколько астрохимически значимых компонентов:  $C^+$ ,  $H_2O$  и  $CH_3CN$ . Рассмотрение проводилось в четырех точках, соответствующих основным областям диска: в трех точках в центральной плоскости диска на радиальных расстояниях  $R = 1, 20, 500$  а.е. (далее точки 1, 2 и 3 соответственно) и в верхних слоях диска на расстоянии  $R = 10$  а.е. и высоте  $z = 1$  а.е. (точка 4). Содержания компонентов приведены на графике.

Наибольшие изменения в содержании произошли для иона  $C^+$ . Так, в точке 1 в Модели Б канал образования за счет реакции  $C$  с космическими лучами приобрел большую значимость, его продуктивность достигала 40 %. В точке 2 различие в моделях состоит в том, что в Модели А важное значение имеют реакции с углеродными цепочками, отсутствующие в числе доминирующих реакций в Модели Б. В точке 3 на фоне совпадающих реакций обнаруживается коренное различие, проявляющееся и в эволюции других компонентов: хотя в Модели А реакции с отрицательно заряженными пылинками имеют некую ненулевую, но малую (11 %) продуктивность, то в Модели Б реакции с поверхностными электронами доминируют (в данном случае 90 %). Любопытным эффектом является появление в Модели Б реакций с  $HCN$ . В точке 4 на высоте 1 а.е. значение для образования в Модели Б приобретает реакция фотодиссоциации  $CH^+$ . Для  $H_2O$  и  $CH_3CN$  различия в моделях не настолько очевидны и в большинстве случаев связаны с появлением дополнительных реакций. В целом в Модели Б наблюдается тенденция к все возрастающей значимости реакций с поверхностными электронами, которая приводит в конечном итоге к появлению новых каналов реакций, прежде всего с ионами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-32-00012 мол\_а.

## Литература

- Акимкин и др. (Akimkin V. et al.) // *Astrophys. J.* 2013. V. 766. P. 24.  
Ивлев и др. (Ivlev A.V., Akimkin V.V., Caselli P.) // *Astrophys. J.* 2016. V. 833. P. 92.  
Кочина О.В., Вибе Д.З. // *Астрон. журн.* 2014. Т. 91. № 4. С. 287.