

ДЕЙТЕРИРОВАННЫЕ ИЗОТОПОЛОГИ ВОДЫ И МЕТАНОЛА В ОБЛАСТЯХ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

© 2020 г. О. В. Кочина^{1*}, Д. З. Вибе¹

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 25.02.2020 г.

После доработки 25.05.2020 г.; принята к публикации 26.05.2020 г.

Рассмотрена эволюция содержания однократно и двукратно дейтерированных изотопологов воды и метанола в типичном протозвездном облаке. Выявлены основные процессы, определяющие их обилие в различных регионах облака. Показано, что содержания дейтерированных изотопологов в ряде случаев могут превышать содержание основных молекул.

Ключевые слова: астрохимия, межзвездные молекулы, молекулярные облака.

DOI: 10.31857/S0320010820060054

ВВЕДЕНИЕ

Развитие наблюдательных технологий позволяет получать молекулярные спектры с высокой детализацией. Так были обнаружены и идентифицированы множество изотопологов, т.е. молекул, в которых один или несколько атомов замещены более редкими изотопами. С обнаружением дейтерия перед астробиологией и астрохимией возникла задача определения отношения D/H и соотношения изотопологов, основного и дейтерированных, особенно в водных льдах на кометах, планетах (Бокеле-Морван и др., 1998; Энкренас и др., 2018) и спутниках (Кларк и др., 2019). Информация о соотношении помогает прояснить эволюцию и прошлое самих объектов.

В поисках ответов на вопросы об эволюции целесообразно заглянуть глубже в прошлое, в регионы, где формировались первые молекулы полутяжелой воды и других дейтерированных компонентов. Первые молекулы появляются в холодных плотных облаках в областях звездообразования. В данной работе были проведены численные расчеты химической эволюции области звездообразования, начиная с изначального атомарного состава и до химического возраста в один миллион лет. Так как значительной части молекул, образующихся на ранних стадиях звездообразования, удается сохраниться в суровых условиях бурных процессов более поздних стадий, принять во внимание начальную стадию эволюции (холодные плотные

ядра) необходимо для изучения эволюции дейтерированных компонентов на поздних стадиях (от протопланетных дисков до планет).

В данной работе представлены результаты для воды и метанола, двух астробиологически важных компонентов. Наблюдения дейтерированных изотопологов метанола интересны как с точки зрения диагностики физических и химических условий в дозвездных и протозвездных ядрах, так и с точки зрения исследования особенностей дальнейшего усложнения структуры органических молекул (Оба и др., 2016; Мурга и др., 2020; Варакин, Мурга, 2020). Еще больший интерес представляют наблюдения дейтерированных аналогов воды — HDO и D₂O. Вода не только представляет собой один из ключевых резервуаров кислорода и важный элемент теплового баланса межзвездного вещества (Таке и др., 2013). Она также является одним из основных ингредиентов жизни. Изучение эволюции дейтерированных молекул воды считается сейчас основным инструментом для определения путей попадания воды на Землю. В связи с этим представляется важным построение все более детальных моделей эволюции этих соединений.

МОДЕЛЬ ПРОТОЗВЕЗДНОГО ОБЪЕКТА

В работе использована модель “Presta”, предназначенная для изучения химической эволюции одномерного молекулярного облака с учетом центрального источника излучения и внешнего УФ-поля (Кочина и др. 2013; Кочина, Вибе, 2014a, 2014b; Кочина, Вибе, 2017). С ее помощью была

*Электронный адрес: okochina@inasan.ru

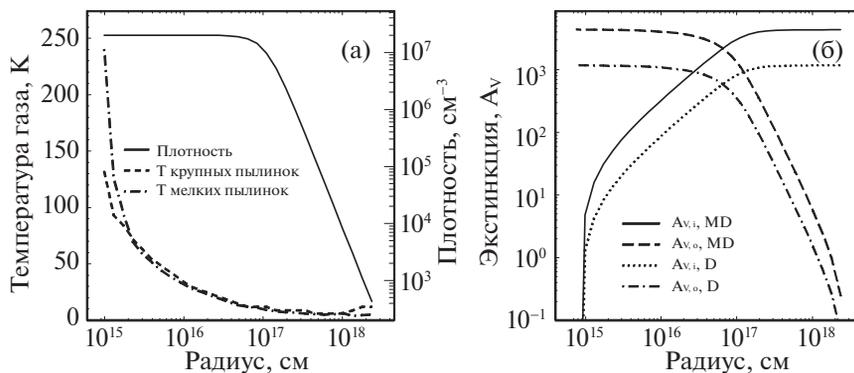


Рис. 1. Модель объекта: (а) профили плотности и температуры, (б) поле излучения (из работы Кочкиной и Вибе, 2004).

рассчитана химическая эволюция плотного молекулярного облака, параметры которого соответствуют объекту из работы Кочкиной и Вибе (2014) и типичны для протозвездных ядер (рис. 1). Данному распределению соответствуют лучевая концентрация $2 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$ и масса $M = 500 M_{\odot}$.

Моделирование дейтерированных соединений имеет долгую историю (см. Браун, Миллар, 1989; Робертс, Миллар, 2000; Каселли и др., 2002; Робертс и др., 2004; Вилласи, 2007; Конг и др., 2015 и многие другие). В нашей модели оно впервые проводится с учетом двух населений пыли — “крупных” и “мелких” пылинок — путем создания аналогов поверхностных компонентов для каждого из них. Физические параметры компонентов пылевой среды для различных населений и профили температуры и плотности представлены на рис. 1а. Температуры населений пыли рассчитывались при помощи модели переноса излучения с учетом стохастического нагрева пылинок различных размеров и химических составов (Павлюченков и др., 2012) при влиянии внешнего и внутреннего полей излучения. Температурные профили для данной работы рассчитаны для внешнего поля с температурой излучения 20 000 К и дилуцией 10^{-16} , что близко к параметрам среднего межзвездного поля. Изнутри облако подсвечено протозвездой с эффективной температурой 10 000 К и радиусом $10 M_{\odot}$. Температура газа считается равной температуре крупных пылинок.

При вычислении оптической экстинкции (рис. 1б) учитывалось, что отношение сечения поглощения пылинки к ее геометрическому сечению зависит от размера. Для крупных пылинок принято значение 1, для мелких — 0.1. Скорости поверхностных реакций, а также скорости адсорбции и десорбции рассчитываются индивидуально для каждого населения пыли в каждой точке облака с учетом различия температур пылинок и их массовой доли. Коэффициент прилипания считается одинаковым для обоих населений и равным 0.3 для всех нейтральных компонентов

за исключением Н, для которого коэффициент рассчитывается отдельно, H_2 и He , для которых он принят равным 0. При обсуждении и представлении результатов содержания на обоих населенных пыли суммировались.

В работе использована база химических реакций из работ Альбертссона и др. (2013, 2014). Следует отметить, что в ней рассматриваются только дейтерированные изотопологи метанола CH_2DOH , CHD_2OH и CD_3OH , а реакции с изотопологом CH_3OD (с дейтерированным гидроксильным радикалом) отсутствуют. Из-за немногочисленности экспериментальных данных для подавляющего большинства дейтерированных молекул реакции добавлялись в используемую сетку путем клонирования реакций с обычным водородом — с теми же скоростями и механизмами. В других астрохимических базах данных (Маджумдар и др., 2017) изотополог метанола с дейтерированным гидроксильным радикалом учитывается, но только в газофазных процессах. Включение в модель только газофазных реакций с участием этого изотополога сделало бы его неполноценным участником химической эволюции, поэтому мы решили воздержаться от рассмотрения CH_3OD (наблюдения указывают, что его содержание часто существенно уступает содержанию CH_2DOH , Ратайчак и др., 2011; см., однако, Пенг и др., 2012). Также в модели не учитывались орто- и парамодификации водорода. Соотношение D/H принято равным 1.5×10^{-5} (Лински и др., 1995, 2006). Модель включает в себя 2413 компонентов и 61 935 реакций (с учетом поверхностных процессов). Результаты расчета химической 1D-структуры объекта позволяют получить радиальные профили содержаний и лучевые концентрации молекул.

Для выявления основных факторов, влияющих на эволюцию содержаний того или иного компонента, использовался анализатор скоростей реакций, описанный в работе Кочкиной и Вибе (2014).

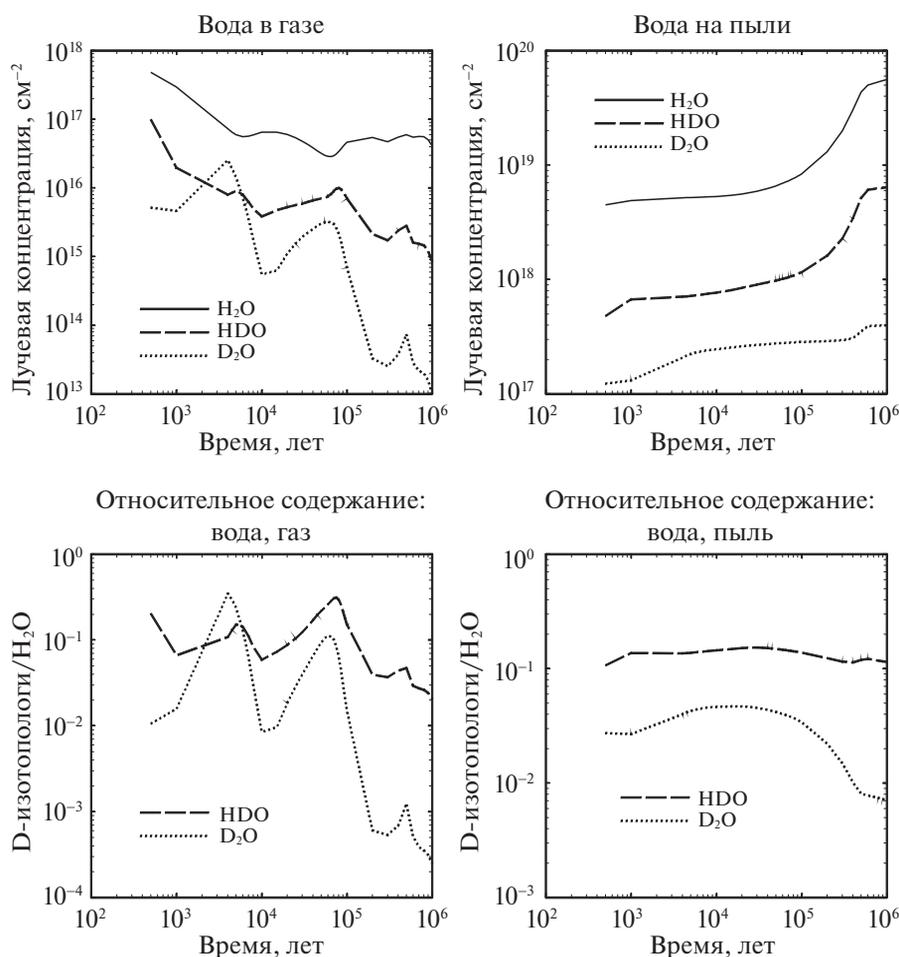


Рис. 2. Изотопологи воды: изменение соотношений и лучевых концентраций в процессе химической эволюции.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках работы были рассмотрены две группы изотопологов, включающих в себя основные и дейтерированные изотопологи воды (H_2O , HDO и D_2O) и метанола (CH_3OH , CH_2DON , CHD_2OH и CD_3OH). Обе группы химических компонентов демонстрируют интересные особенности. Так, в период времени с одной до десяти тысяч лет у большинства исследуемых изотопологов наблюдается рост содержания, впоследствии сменяющийся падением. Возраст около пяти тысяч лет, на который приходится максимальное содержание, в дальнейшем мы будем называть первым дейтерированным пиком. Второй и третий дейтерированные пики (менее ярко выраженные максимумы относительного газофазного содержания дейтерированных изотопологов) приходятся на химические возрасты 60–80 тыс. лет и порядка 500 тыс. лет соответственно.

Вода

Результаты расчетов для воды представлены на рис. 2. Отношение изотопологов воды в газе значи-

тельно различается во времени, отклоняясь от классического соотношения изотопов то в большую, то в меньшую сторону, в то время как на пыли оно остается практически неизменным и близким к отношению D/H , принятому в модели. Первый дейтерированный пик для полутяжелой воды выражен неярко.

Анализ скоростей химических реакций показывает, что небольшие пики роста содержания полутяжелой воды связаны с колебаниями баланса между реакциями формирования, прежде всего на поверхности пылинок с последующей реактивной десорбцией продуктов реакции в газовую фазу, и реакциями разрушения, в первую очередь реакциями обмена с ионами H_3^+ , N_2H^+ , H_2D^+ и HCO^+ . Интересно наличие пика на кривой отношения содержаний изотопологов для химического возраста в семьдесят тысяч лет. В этот момент лучевые концентрации изотопологов различаются лишь в три раза. В основном это связано с высоким содержанием изотопологов во внутренних областях облака (см. рис. 3), так как во внешнем и ближайшем к протозвезде регионах молекулы полутяжелой воды

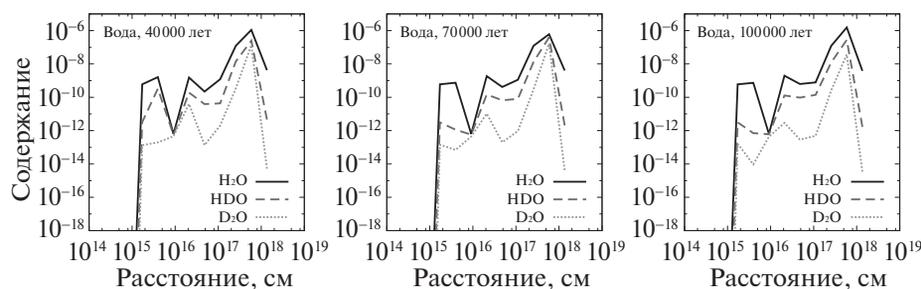


Рис. 3. Радиальные распределения изотопологов воды: второй дейтерированный пик.

эффективно разрушаются излучением. Во внутреннем регионе содержание изотопологов различается лишь на 10%. Сам пик вызван ростом относительного содержания молекул полутяжелой воды в регионах, прилегающих к внешнему, где доминирующая реакция разрушения ионом H_3^+ основного изотополога H_2O оказывается более эффективной, чем аналогичная реакция для HDO , что вызвано общим уменьшением содержания иона и возникновением конкуренции основного и дейтерированного изотополога за ставший редким ион.

Дважды дейтерированный изотополог, тяжелая вода D_2O , проявляет еще бóльшие колебания в содержаниях как в газовой фазе, так и на пылинках. Содержание D_2O изменяется скачкообразно, первый дейтерированный пик выражен очень четко. Отношение содержания тяжелой воды в газе к содержанию основного изотополога достигает 0.24, превосходя даже содержание полутяжелой воды HDO . Связано это с более продуктивной реакцией образования молекулы на пыли с последующей десорбцией в газовую фазу: $\text{D}_{\text{G}2} + \text{D}_2\text{O}_{2\text{G}2} \rightarrow \text{D}_2\text{O} + \text{OD}$. Соответствующая реакция для HDO ($\text{H}_{\text{G}2} + \text{D}_2\text{O}_{2\text{G}2} \rightarrow \text{HDO} + \text{OD}$), также являющаяся основным каналом, идет медленнее, так как требует участия атома водорода, содержание которого на пыли на ранних этапах химической эволюции гораздо меньше, чем содержание атомарного дейтерия. Связано это с менее эффективной десорбцией атомарного дейтерия с пылинок на ранних стадиях химической эволюции: лучевые концентрации дейтерия на пылинках в первые десять тысяч лет значительно превышают лучевые концентрации водорода (см. также Робертс и др., 2003; Липштат и др., 2004).

После ранних этапов химической эволюции содержание свободного атомарного дейтерия на пылинках начинает падать (в результате связывания в молекулах), а водорода — возрастать (в силу его постепенного накопления на поверхности), что приводит к падению содержания D_2O в газе. Второй дейтерированный пик, соответствующий шестидесяти тысячам лет, также связан с накоплением молекул тяжелой воды во внешних областях

облака (рис. 3). Основные реакции разрушения газофазной молекулы — адсорбция на пылинки и реакция с ионом N_2H^+ , содержание которого заметно ниже, чем иона H_3^+ , разрушающего основной и однократно дейтерированный изотопологи (для двукратно дейтерированного изотополога реакции с H_3^+ в списке доминирующих реакций нет). Реакции же образования на пыли с последующей десорбцией в газовую фазу идут заметно интенсивнее реакций разрушения, что объясняет постепенный рост содержания тяжелой воды на пыли и выраженный второй пик содержания в газе, приходящийся на шестьдесят тысяч лет.

Особенности поведения содержания изотопологов на пыли на поздних стадиях эволюции объясняются изменением баланса реакций разрушения и образования во внешних областях. Основными каналами разрушения остаются десорбция и реакции фотодиссоциации на пылинках, в то время как реакции образования идут гораздо более продуктивно. Общий рост содержания на пылинках простых компонентов, в реакции друг с другом приводящим к образованию H_2O и HDO , приводит к росту содержания этих компонентов на пыли. Для H_2O эффективным каналом образования также являются поверхностные реакции фотодиссоциации этанола и его дейтерированных изотопологов. Соответствующие реакции образования D_2O идут медленнее, так как вовлекают только реактанты, содержащие менее обильный атом дейтерия, что и объясняет отсутствие скачка содержания молекул тяжелой воды на пыли на поздних этапах химической эволюции. Для HDO эти реакции доминирующими не являются.

Метанол

Отношения лучевых концентраций изотопологов метанола приведены на рис. 4. Интересно, что лучевые концентрации однократно дейтерированного метанола CH_2DON превосходят либо равняются лучевым концентрациям основного изотополога CH_3OH в течение практически всего расчетного времени химической эволюции. Особен-

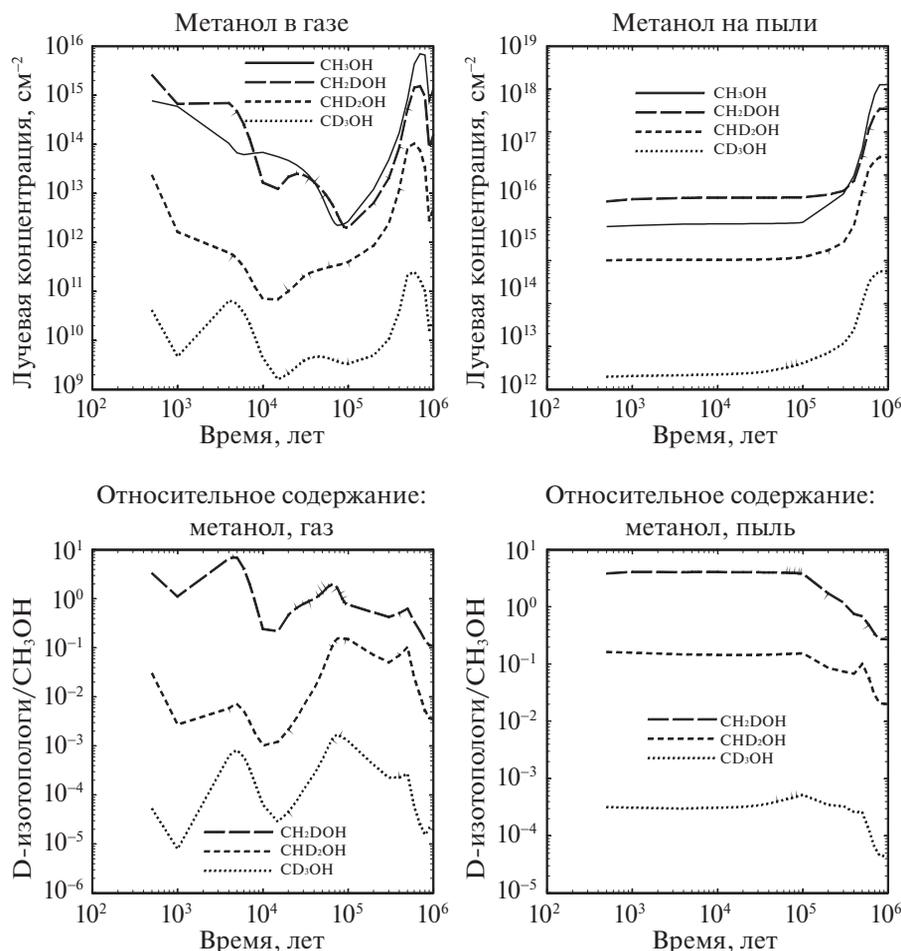


Рис. 4. Изотопологи метанола: изменение соотношений и лучевых концентраций в процессе химической эволюции.

но интересен химический возраст, соответствующий первому дейтерированному пику, для которого газофазное содержание CH_2DOH превосходит CH_3OH в семь раз. Результат кажется парадоксальным, если принять во внимание относительное содержание дейтерия, однако он не противоречит наблюдениям. Так, подобное соотношение изотопологов было описано в литературе для протозвездных объектов L1448N, L1448mm и L1157mm (Паризе и др., 2006). Верхняя граница отношения $\text{CH}_2\text{DOH}/\text{CH}_3\text{OH}$, определенная Паризе и др. (2006) для указанных объектов, равна ≤ 1.8 , ≤ 7.1 и ≤ 5.4 соответственно. Как и в случае с тяжелой водой, различие оказалось существенным за счет более эффективного формирования молекул дейтерированного изотополога по сравнению с основным изотопологом в двух внутренних регионах. На этапе эволюции предшествующему пику в этих регионах наблюдалось интенсивное формирование молекулы CH_2DOH на пылинках в процессе реакции соединения атома дейтерия с молекулой CH_2OH с последующей десорбцией продукта реакции в газовую фазу, что привело к накоплению

в регионах значительного количества CH_2DOH . Аналогичная реакция с атомом водорода идет менее эффективно, чем реакция с дейтерированным изотопологом, хотя и является доминирующей. Последующее падение содержания CH_2DOH связано с исчерпанием свободных атомов дейтерия на пыли и соответственно падением эффективности основного канала образования.

Не менее примечательно и общее падение отношения содержаний как в газе, так и на пыли после ста тысяч лет химической эволюции. Оно вызвано более медленным темпом роста содержания CH_2DOH по сравнению с CH_3OH . Изначально начавшееся в газе падение содержания молекулы CH_2OH , вызванное начавшейся активной адсорбцией, привело к резкому росту ее содержания на пыли. Реакция соединения с ней является основным каналом формирования молекул CH_3OH и CH_2DOH на пыли, однако для CH_3OH она идет более эффективно, превосходя по эффективности реакцию десорбции, уменьшающую содержание молекулы на пылинках. Так как молекулы изотопологов метанола формируются в основном на пыли,

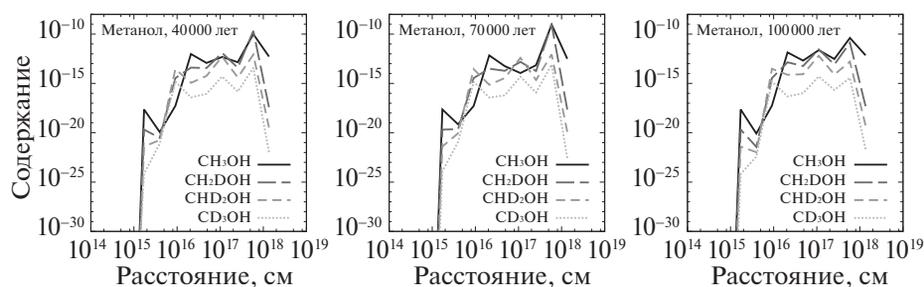


Рис. 5. Радиальные распределения изотопологов метанола: второй дейтерированный пик.

следует пропорциональный отклик в газовой фазе. Однако в случае газофазной молекулы CH_2DOH более резкое падение лучевой концентрации на поздних временах связано со все возрастающей эффективностью реакции с ионом H_3^+ , разрушающей молекулу.

Многokrатно дейтерированные изотопологи метанола в целом повторяют эволюцию однократно дейтерированного компонента — скачкообразное изменение относительного содержания в газе и практически неизменное на пыли. Однако содержания CHD_2OH на пыли тяготеют к соотношению 1 к 100. В газовой фазе компонент также демонстрирует завышенное относительное содержание, достигающее 0.16 для второго дейтерированного пика, соответствующего в случае CHD_2OH восьмидесяти тысячам лет химической эволюции. Возрастание до данного значения с относительного содержания 0.001, соответствующего химическому возрасту десять тысяч лет, весьма примечательно. Реализуется это благодаря росту содержания во внутренних областях (рис. 5), в которых из-за экранирования излучения внешними слоями (преимущественно за счет столкновительных реакций с пылинками) относительно невысоко содержание ионов DCO^+ , HCO^+ и H_3^+ — основных разрушителей молекулы CHD_2OH . Однако постепенно содержание иона H_3^+ начинает расти, и, как и в случае с CH_2DOH , этого оказывается достаточно, чтобы в регионе облака, в котором преобладают реакции разрушения с этим ионом, содержание начало постепенно спадать, образуя очередной минимум. Пик содержания на поздних временах связан с появлением в небольшом внутреннем регионе новой реакции образования $\text{H}_3\text{D}_2\text{C}_2\text{O}_2^+ + \text{GRAIN}_2 \rightarrow \text{CHD}_2\text{OH} + \text{HCO}$, превосходящей по эффективности реакции разрушения с уже упомянутым ионом H_3^+ .

Эволюция содержания трехкратно дейтерированного метанола CD_3OH также интересна. График газофазного содержания молекулы демонстрирует яркий первый дейтерированный пик и

практически полное отсутствие третьего. Относительное содержание компонента в газовой фазе во время первого дейтерированного пика возрастает на два порядка, однако даже в этом случае не достигает ожидаемого. Возрастание содержания к первому дейтерированному пику происходит в основном за счет процессов в срединном регионе, ближайшем к внешнему краю облака. Здесь, кроме основного канала образования молекулы CD_3OH на пылинках $\text{D}_G + \text{CD}_2\text{OH}_G \rightarrow \text{CD}_3\text{OH}$, весьма эффективной является реакция диссоциативной рекомбинации иона CD_3OH_2^+ с электроном или пылинками, в результате которой ион теряет заряд и распадается на нейтральные компоненты CD_3OH и H . На ранних этапах содержание иона значительное, однако впоследствии начинает падать, а с ним и эффективность реакций. На их место выходят поверхностные реакции CHD_2OG с гидроксильными радикалами OH_G и OD_G . Второй дейтерированный пик приходится на химический возраст пятьдесят тысяч лет. Повышение содержания трижды дейтерированного метанола происходит в двух областях: в еще более близкой к внешнему краю и во внутренней, близкой к внутреннему источнику. Если раньше в этих областях преобладающими реакциями образования газофазного изотополога были уже упомянутые диссоциативной рекомбинации с ионами CD_3OH_2^+ и $\text{H}_2\text{D}_3\text{C}_2\text{O}_2^+$, то после 25 тысяч лет химической эволюции основным каналом становится реакция образования на пыли, что приводит к доминированию образования над разрушением и накоплению молекулы в регионе. Третий дейтерированный пик объясняется возникновением новых каналов образования: реакцией диссоциативной рекомбинации с мелкими пылинками экзотических ионов $\text{H}_2\text{D}_3\text{C}_2\text{O}_2^+$ и $\text{HD}_4\text{C}_2\text{O}_2^+$. Содержание же трехкратно дейтерированного метанола на пыли остается практически неизменным в процессе всей химической эволюции и примерно равно $2.5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$, возрастая только на поздних этапах эволюции после ста тысяч лет. Как и в случае с однократно дейтерированным метанолом, связано это со все возрастающей адсорбцией компонента на пылинки и его аккумуляцией там.

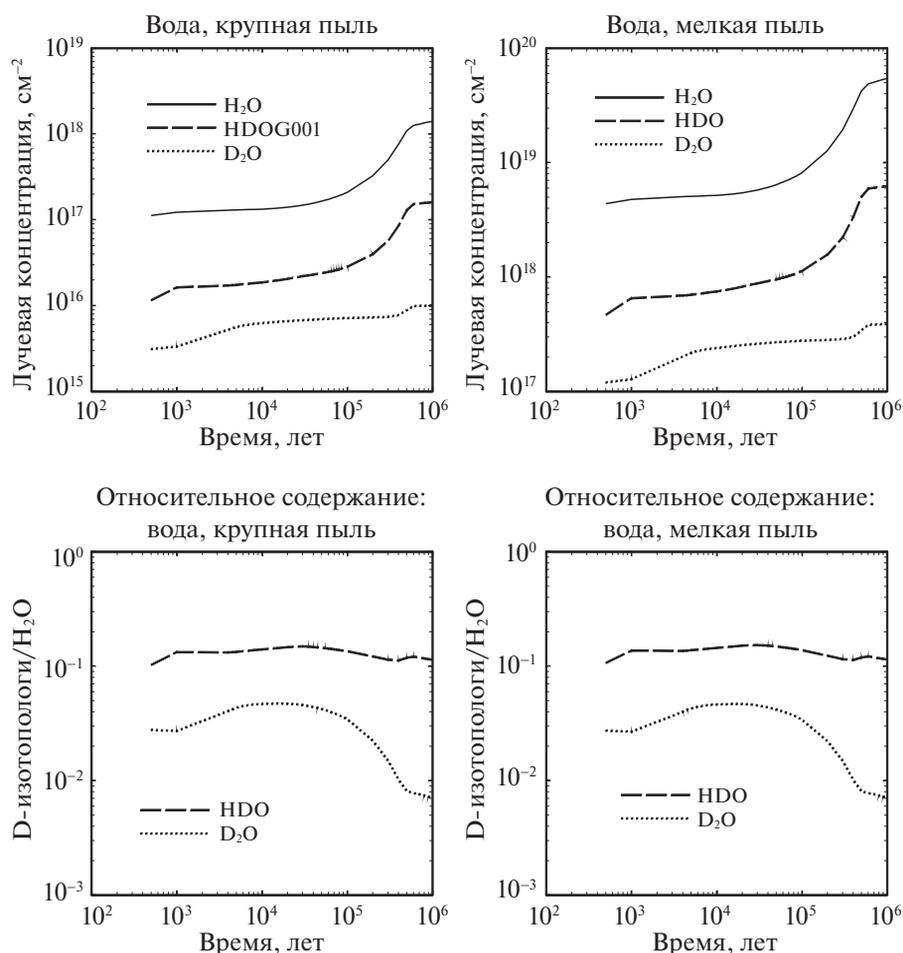


Рис. 6. Вода, распределение на пылинках различных населений: изменение соотношений и лучевых концентраций в процессе химической эволюции.

Особенности распределения изотопологов по пылинкам различных населений в рамках работы детально не рассматривались. Распределения представлены на рис. 6 и 7.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Хорошо известно, что в дозвездных и протозвездных объектах относительные содержания дейтерированных изотопологов сильно отличаются от общего содержания дейтерия относительно водорода. Если суммарное отношение D/H составляет примерно 10^{-5} , то для отдельных молекул наблюдаемые отношения содержаний дейтерированного аналога к “нормальной” молекуле могут составлять от долей процента до десятков процентов (Шах, Вуутен, 2001; Руефф и др., 2005; Сакаи и др., 2012).

Наблюдения дейтерированного метанола в областях звездообразования насчитывают уже не одно десятилетие (Мауэрсбергер и др., 1988), и, как

правило, его содержание относительно обычного метанола составляет примерно несколько процентов (Оспина-Замудио и др., 2019; Таке и др., 2019). Однако в некоторых случаях (Паризе и др., 2002, 2006) содержание CH_2DOH может оказаться сопоставимым с содержанием основного изотополога или даже превысить его. Именно такое поведение демонстрируют наши модели на ранних эволюционных этапах (до $\sim 10^5$ лет), после чего содержание CH_2DOH снижается до 20–30%. Если говорить о пространственном распределении, то повышенное содержание CH_2DOH наблюдается ближе к центральной части облака (рис. 5). Содержание CHD_2OH в наших расчетах достигает 10%, что несколько уступает результатам наблюдений (Паризе и др., 2006; до 25%) и превосходит результаты Оспина-Замудио и др. (2019) (меньше 1%), однако нужно помнить, что неопределенность наблюдательных данных очень высока. Содержание трехкратно дейтерированного метанола, предсказыва-

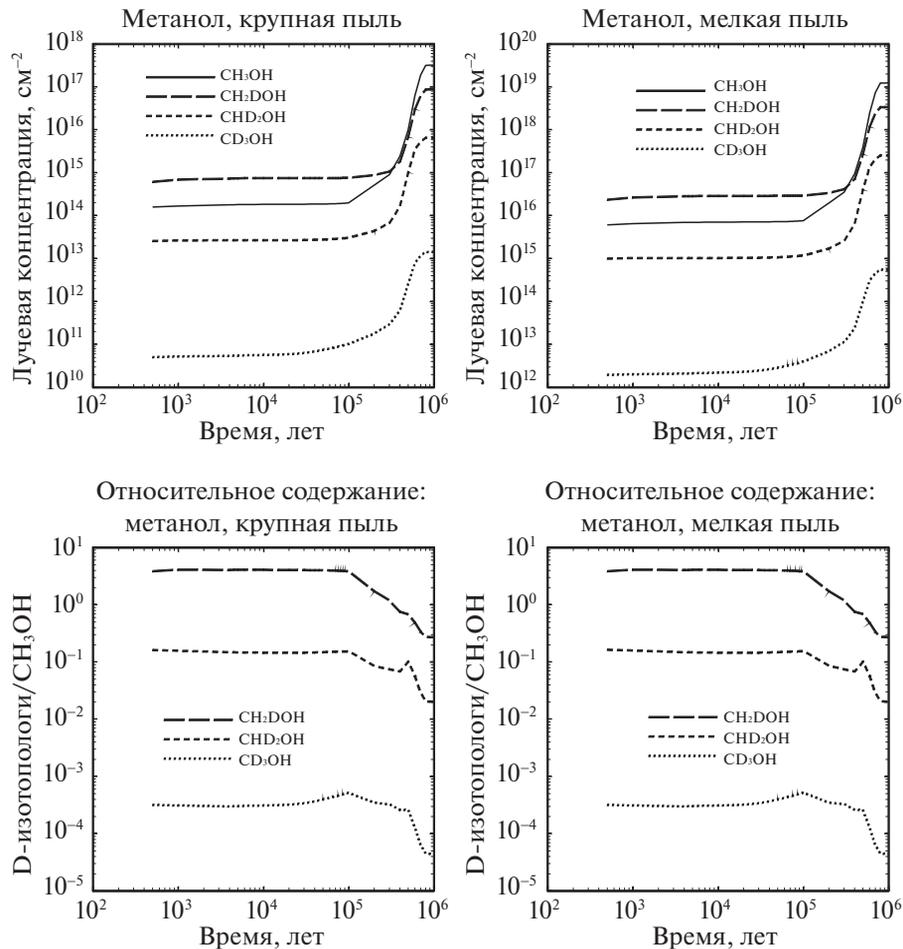


Рис. 7. Метанол, распределение на пылинках различных населений: изменение соотношений и лучевых концентраций в процессе химической эволюции.

емое нашей моделью, оказывается существенно ниже наблюдаемого (Паризи и др., 2004).

Содержание полутяжелой воды остается со временем практически постоянным и составляет примерно 10% от содержания обычной воды. Это несколько выше, чем дают наблюдения (до 5.8%, Кутенс и др., 2012), однако с учетом различных неопределенностей представляется приемлемым.

Реакции дейтерирования идут преимущественно на пыли, так как содержание свободных атомов дейтерия на поверхности мелких пылинок превосходит содержание атомов водорода на протяжении всего периода химической эволюции. На крупной пыли содержание D постепенно исчерпывается, и содержание дейтерия становится ниже содержания водорода. Однако даже такой спад не приводит к доминированию газофазных процессов в объекте. Вклад газофазных реакций в дейтерирование и в целом в процесс образования исследуемых молекул пренебрежительно мал для метанола и достаточно невелик для воды, являясь существенным

только для внешних регионов облака, где скорости реакций образования, относящиеся к газовой фазе, превышают скорость десорбции с пыли на два порядка. Основными газофазными реакциями в этом случае являются $H + OD \rightarrow HDO$ и $D + OH \rightarrow HDO$ для полутяжелой воды, и $D + OD \rightarrow D_2O$ и реакции диссоциативной рекомбинации HD_2O^+ на электронах и отрицательно заряженных пылинках для тяжелой воды.

В целом наше исследование показало, что эволюция содержаний дейтерированной воды и метанола отличается от эволюции содержаний основных изотопологов, а соотношение содержаний изотопологов на каждом из шагов отличается от глобального изотопного отношения. Исследование будет продолжено и расширено включением других астробиологически важных компонентов. Исследование чувствительности к физическим условиям, таким как температура и плотность, также сможет выявить дополнительные факторы, ответственные за различия, и позволит использовать полученные

из наблюдений сведения о соотношении содержащий изотопологов в качестве инструмента диагностики.

Полученные результаты демонстрируют качественное согласие с результатами некоторых наблюдений или, по крайней мере, не противоречат им. Однако во всех случаях речь идет о сравнении с выведенными из наблюдений лучевыми концентрациями. К сожалению, в данный момент затруднительно сопоставить наши результаты непосредственно с имеющимися спектрами, так как необходимые данные для моделирования синтетических спектров дейтерированных соединений существуют только для полутяжелой воды HDO, а для тяжелой воды D₂O и метанола отсутствуют. Однако технически такое сопоставление возможно при помощи разрабатываемого нами пакета PRESTALINE и будет проведено, как только сведения, необходимые для расчетов синтетических спектров, появятся в базах данных, таких как LAMDA.

Авторы благодарны анонимному рецензенту за замечания и комментарии, которые помогли улучшить качество представления материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбертссон и др. (T. Albertsson, D. Semenov, and T. Henning), *Astrophys. J.* **784**, 39 (2014).
2. Альбертссон и др. (T. Albertsson, D.A. Semenov, A.I. Vasyunin, Th. Henning, and E. Herbst), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **207**, 27 (2013).
3. Бокеле-Морван и др. (D. Bockelée-Morvan, D. Gautier, D.C. Lis, K. Young, J. Keene, T. Phillips, T. Owen, J. Crovisier, et al.), *Icarus* **133**, 147 (1998).
4. Браун, Миллар (P.D. Brown and T.J. Millar), *MNRAS* **237**, 661 (1989).
5. Варакин, Мурга (V.N. Varakin and M.S. Murga), *Astron. Rep.* **64**, 319 (2020).
6. Вилласи (K. Willacy), *Astrophys. J.* **660**, 441 (2007).
7. Каселли и др. (P. Caselli, T. Stantcheva, O. Shalabiea, V.I. Shematovich, and E. Herbst), *Plan. Space Sci.* **50**, 1257 (2002).
8. Кларк и др. (R.N. Clark, R.H. Brown, D.P. Cruikshank, and G.A. Swayze), *Icarus* **321**, 791 (2019).
9. Конг и др. (Sh. Kong, P. Caselli, J.C. Tan, V. Wakelam, and O. Sipilä), *Astrophys. J.* **804**, 98 (2015).
10. Кочина и др. (O.V. Kochina, D.S. Wiebe, S.V. Kalenskii, and A.I. Vasyunin), *Astron. Rep.* **57**, 818 (2013).
11. Кочина, Вибе (O.V. Kochina and D.S. Wiebe), *Astron. Rep.* **58**, 228 (2014a).
12. Кочина, Вибе (O. Kochina and D. Wiebe), *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* **44**, 169 (2014b).
13. Кочина, Вибе (O.V. Kochina and D.S. Wiebe), *Astron. Rep.* **61**, 103 (2017).
14. Кутенс и др. (A. Coutens, C. Vastel, E. Caux, C. Ceccarelli, S. Bottinelli, L. Wiesenfeld, A. Faure, Y. Scribano, and C. Kahane), *Astron. Astrophys.* **539**, A132 (2012).
15. Лински и др. (J.L. Linsky, A. Diplas, B.E. Wood, A. Brown, Th.R. Ayres, and B.D. Savage), *Astrophys. J.* **451**, 335 (1995).
16. Лински и др. (J.L. Linsky, B.T. Draine, H.W. Moos, E.B. Jenkins, B.E. Wood, C. Oliveira, W.P. Blair, S.D. Friedman, et al.), *Astrophys. J.* **647**, 1106 (2006).
17. Липштат и др. (A. Lipshtat, O. Biham, and E. Herbst), *MNRAS* **348**, 1055 (2004).
18. Маджумдар и др. (L. Majumdar, P. Gratier, M. Ruaud, V. Wakelam, C. Vastel, O. Sipilä, F. Hersant, A. Dutrey, and S. Guilloteau), *MNRAS* **466**, 4470 (2017).
19. Мауэрсбергер и др. (R. Mauersberger, C. Henkel, T. Jacq, and C.M. Walmsley), *Astron. Astrophys.* **194**, L1 (1988).
20. Мурга и др. (M.S. Murga, D.S. Wiebe, A.I. Vasyunin, V.N. Varakin, and A.V. Stolyarov), *Russian Chemical Reviews* **89**, 430 (2020).
21. Оба и др. (Y. Oba, Y. Takano, N. Watanabe, and A. Kouchi), *Astrophys. J. Lett.* **827**, L18 (2016).
22. Оспина-Замудио и др. (J. Ospina-Zamudio, C. Favre, M. Kounkel, L.H. Xu, J. Neill, B. Lefloch, A. Faure, E. Bergin, et al.), *Astron. Astrophys.* **627**, A80 (2019).
23. Павлюченков и др. (Y.N. Pavlyuchenkov, D.S. Wiebe, V.V. Akimkin, M.S. Khrantsova, and T. Henning), *MNRAS* **421**, 2430 (2012).
24. Паризе и др. (B. Parise, C. Ceccarelli, A.G.G.M. Tielens, A. Castets, E. Caux, B. Lefloch, and S. Maret), *Astron. Astrophys.* **453**, 949 (2006).
25. Паризе и др. (B. Parise, A. Castets, E. Herbst, E. Caux, C. Ceccarelli, I. Mukhopadhyay, and A.G.G.M. Tielens), *Astron. Astrophys.* **416**, 159 (2004).
26. Паризе и др. (B. Parise, C. Ceccarelli, A.G.G.M. Tielens, E. Herbst, B. Lefloch, E. Caux, A. Castets, I. Mukhopadhyay, et al.), *Astron. Astrophys.* **393**, L49 (2002).
27. Пенг и др. (T.C. Peng, D. Despois, N. Brouillet, B. Parise, and A. Baudry), *Astron. Astrophys.* **543**, A152 (2012).
28. Ратайчак и др. (A. Ratajczak, V. Taquet, C. Kahane, C. Ceccarelli, A. Faure, and E. Quirico), *Astron. Astrophys.* **528**, L13 (2011).
29. Робертс и др. (H. Roberts, E. Herbst, and T.J. Millar), *Astrophys. J. Lett.* **591**, L41 (2003).
30. Робертс и др. (H. Roberts, E. Herbst, and T.J. Millar), *Astron. Astrophys.* **424**, 905 (2004).
31. Робертс, Миллар (H. Roberts and T.J. Millar), *Astron. Astrophys.* **361**, 388 (2000).

32. Руефф и др. (E. Roueff, D.C. Lis, F.F.S. van der Tak, M. Gerin, and P.F. Goldsmith), *Astron. Astrophys.* **438**, 585 (2005).
33. Сакаи и др. (T. Sakai, N. Sakai, K. Furuya, Y. Aikawa, T. Hirota, and S. Yamamoto), *Astrophys. J.* **747**, 140 (2012).
34. Таке и др. (V. Taquet, E. Bianchi, C. Codella, M.V. Persson, C. Ceccarelli, S. Cabrit, J.K. Jørgensen, C. Kahane, et al.), *Astron. Astrophys.* **632**, A19 (2019).
35. Таке и др. (V. Taquet, P.S. Peters, C. Kahane, C. Ceccarelli, A. López-Sepulcre, C. Toubin, D. Duflot, and L. Wiesenfeld), *Astron. Astrophys.* **550**, A127 (2013).
36. Шах, Вуутен (R.Y. Shah and A. Wootten), *Astrophys. J.* **554**, 933 (2001).
37. Энкреназ и др. (T. Encrenaz, C. DeWitt, M.J. Richter, T.K. Greathouse, T. Fouchet, F. Montmessin, F. Lefèvre, B. Bézard, et al.), *Astron. Astrophys.* **612**, A112 (2018).