ВСПЫШКИ СВЕТИМОСТИ В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ: ТРЕХФАЗНАЯ АСТРОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

© 2022 г. Е. В. Борщева^{1, *}, Д. З. Вибе^{1, **}

¹Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия *E-mail: kath@inasan.ru **E-mail: dwiebe@inasan.ru Поступила в редакцию 02.10.2021 г.

После доработки 01.11.2021 г. Принята к публикации 01.11.2021 г.

Рассмотрено влияние многослойной структуры ледяных мантий космических пылинок на химические процессы, происходящие в них до, во время и после вспышек в протопланетных дисках. Показано, что на стадии, предшествующей формированию диска, рассмотрение различий между поверхностью и толщей мантии не столь важно, однако после образования диска учет особенностей химических процессов в различных слоях мантии становится более существенным. В частности, в трехфазной модели (газ, поверхность мантии, толща мантии) по сравнению с двухфазной моделью увеличивается количество потенциальных индикаторов вспышки, сохраняющих "нетипичные" содержания на протяжении сотен лет после окончания вспышки. Единственным соединением, которое чувствительно к вспышке в двухфазной модели и нечувствительно к ней в трехфазной модели, оказывается адсорбированный формамид (gNH₂CHO).

Ключевые слова: протопланетные диски, вспышки светимости, FU Ori **DOI:** 10.31857/S0004629922060019

1. ВВЕДЕНИЕ

На ранних эволюционных стадиях большин-

ство молодых звезд раз в $(2-5) \times 10^4$ лет или чаще испытывают вспышки различной амплитуды, возможно, связанные с возрастанием темпа аккреции [1]. Рост светимости достигает 1-2 порядков величины [2, 3]. Подобные вспышки, вероятно, являются неотъемлемой частью эволюции планетных систем, однако количество известных объектов, находящихся в стадии вспышки (звезд типа FU Ориона, или фуоров), не превышает двух десятков. Как для уточнения статистики, так и для выявления механизма (механизмов) роста светимости этот список важно расширить, включив в него протозвезды, в которых вспышка завершилась в недавнем прошлом. Индикатором вспышки, произошедшей несколько сотен лет назад, могут быть изменения химического состава окружающего звезду протопланетного диска. Одно из наиболее очевидных следствий вспышки состоит в том, что компоненты, находившиеся в ледяных мантиях космических пылинок, во время вспышки возгоняются в газовую фазу, и их наблюдения предоставляют возможность проверки предположений о поверхностных химических процессах, которые происходили во время спокойной (довспышечной) стадии эволюции протопланетного диска. В частности, вспышка позволяет наблюдать сложную органику, образующуюся на поверхности пыли (метанол, ацетон, ацетонитрил, ацетальдегид, метилформиат [4]).

Однако химия вспышки не ограничивается испарением ледяных мантий. Появление испарившихся молекул в газовой фазе инициирует новые цепочки химических процессов. Например, одно из наиболее изученных следствий вспышки - испарение льда CO – приводит к разрушению $N_2 H^+$ в процессе формирования НСО⁺ [5, 6]. Результаты реализации этих цепочек могут наблюдаться и после завершения вспышки. В работах [7, 8] было проведено моделирование вспышек светимости фуоров с целью выявления возможных индикаторов вспышечной активности, длительное время после вспышки сохраняющих содержания, нетипичные для спокойной фазы. В работе [7] в качестве подобных индикаторов были предложены органические соединения, в частности, НСООСН₃, СН₃СN, СН₂СО, адсорбированный гидроксиламин gNH₂OH, а также СО и СО₂ в отдаленных областях диска (здесь и далее префиксом "g" обозначены адсорбированные компоненты). Нетипичное поведение также было обнаружено у бензолового льда: в отличие от многих других льдов, которые испарялись во время вспышки и достаточно быстро восстанавливались после нее, бензоловый лед аккумулировался в мантиях пылинок во время и после вспышки, отчего его содержание после вспышки превышало довспышечный уровень на порядки величины. В работе [8] в качестве индикатора прошлой вспышки, долго сохраняющего аномальные поствспышечные содержания, был, в частности, предложен формальдегид H₂CO.

Химические процессы во время вспышки и после нее существенно зависят от реакций, протекающих в ледяных мантиях пылинок, и реалистичность предсказаний может существенно зависеть от того, насколько детально мы рассматриваем эти реакции. В работах [7, 8] использован так называемый двухфазный подход, в котором твердая фаза рассматривается как целое, без учета возможной многослойности ледяных мантий. Однако это представление может оказаться слишком упрощенным, так как значимые реакции в адсорбированном веществе в рамках диффузионного механизма (Лэнгмюра-Хиншельвуда) эффективно происходят только на поверхности мантии, но не в ее толще (за исключением, быть может, реакций с участием атомарного и молекулярного водорода). Пренебрежение этим фактом может привести к перепроизводству ряда молекул в двухфазных моделях.

Это было отмечено в работе [7]: в конце стадии молекулярного облака основным углеродсодержашим компонентом на поверхности пыли оказался метанол. Его доля по отношению к водяному льду составила более 30%, а содержания gCO и gCO_2 по отношению к gH_2O составили 10^{-4} и 10^{-3} соответственно. Это не вполне согласуется с наблюдательными данными. По результатам наблюдений протозвездных объектов [9, 10] содержания адсорбированных gCO и gCO2 по отношению к содержанию льда gH₂O составляют порядка 10-30%, а содержание льда метанола (gCH₃OH) всего 3-4%. Впрочем, в отдельных случаях наблюдаемое содержание льда метанола может составлять менее одного процента по отношению к водяному льду [11] или превышать 10% [10].

В базовой модели из работы [7] температура на стадии молекулярного облака принималась равной 10 K, а длительность этой стадии составляла 10^6 лет. Чтобы приблизить соотношение содержаний к наблюдаемым, рассматривался расчет с более высокой температурой. Благодаря этому вместо метанола адсорбированные молекулы gCO эффективно конвертировались в gCO₂, однако содержание gCO на пыли при этом получалось чрезмерно низким. При уменьшении длительности стадии молекулярного облака адсорбированные молекулы gCO не успевают конвертироваться в метанол, что решает проблему его избытка, но и содержание gCO₂ оказывается недостаточным. Еще одна попытка сократить теоретическое солержание льда метанола была связана с добавлением в астрохимическую сетку реакции абстракции водорода $gCH_3OH + gH \rightarrow gCH_2OH + gH_2$, однако эта реакция имеет высокую энергию активации, и при низких температурах, характерных для молекулярных облаков, не оказывает значимого влияния на содержание метанола. По итогам этих исследований авторами работы [7] было высказано предположение, что снижению эффективности синтеза метанола на пылинках будет способствовать введение многослойности мантии, где gCO может сохраняться, не преврашаясь в метанол, в глубинных слоях.

Различие между поверхностными и глубинными слоями ледяной мантии пыли вводится в так называемых трехфазных астрохимических моделях, где отдельно рассматриваются адсорбированное вещество, непосредственно контактирующее с газовой фазой (поверхностное вещество), и вещество глубинных слоев мантии. Первые подобные модели были описаны в работе [12], а дальнейшее развитие они получили, например, в работах [13–15]. В настоящей работе трехфазная модель, схожая с данными моделями, реализована для исследования химии вспышек светимости в протопланетных дисках.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И РАССМОТРЕННЫЕ ВАРИАНТЫ

Следуя работе [7], мы рассматриваем четыре стадии эволюции протопланетного диска. На первой стадии — стадии молекулярного облака формируется начальный химический состав диска. Параметры и продолжительность этой стадии варьировались; принятые значения обсуждаются в следующем разделе. Затем следуют спокойная стадия эволюции диска длительностью 500 тыс. лет, стадия вспышки длительностью 100 лет и поствспышечная стадия.

В отличие от работы [7], мы рассматриваем только темный диск, без атмосферы. Чтобы отследить основные тенденции в химической эволюции, рассматриваются те же четыре типичных набора параметров, что и в упомянутой работе, с тем изменением, что для стадии молекулярного облака и для экстремально внешней области диска (за исключением времени вспышки) взята температура 16 К (см. ниже). Эти наборы параметров (см. табл. 1) взяты из работы [16] и условно соответствуют внутренней, промежуточной, внешней и экстремально внешней областям типичного протопланетного диска.

Область диска, расстояние до звезды	Фаза	Плотность, см ⁻³	<i>Т</i> , К	χ	ζ, c^{-1}
Внутренняя (I), несколько a.e.	Спокойная	8×10^{11}	100	0	10^{-15}
	Вспышка	8×10^{11}	500	0	10^{-15}
Промежуточная (IM), ≈10 a.e.	Спокойная	2×10^{11}	50	0	10^{-16}
	Вспышка	2×10^{11}	200	0	10^{-16}
Внешняя (О), ≈100 а.е.	Спокойная	4×10^{9}	20	0	10^{-17}
	Вспышка	4×10^{9}	80	0	10^{-17}
Экстремально внешняя (ЕО), ≈250 а.е.	Спокойная	2×10^{7}	16	0	10^{-17}
	Вспышка	2×10^{7}	40	0	10^{-17}

Таблица 1. Физические условия в рассмотренных областях диска

В работе используется одноточечная астрохимическая модель, базирующаяся на сетке астрохимических реакций ALCHEMIC [17], аналогичная той, что применялась в работе [7], где можно увидеть более подробное ее описание. В отличие от [7] мы отдельно рассматриваем химические процессы на пыли, происходящие в толще ледяной мантии, и отдельно процессы, которые происходят в нескольких ближайших к поверхности слоях мантии, находящихся в непосредственном контакте с газовой фазой.

Астрохимические модели предполагают решение уравнений химической кинетики, где численные концентрации газофазных n(i) и адсорбированных $n_{\rm s}(i)$ компонентов подчиняются соотношениям

$$\frac{dn(i)}{dt} = \sum_{j,l} K_{jl}n(j)n(l) - n(i)\sum_{j} K_{ij}n(j) + \sum_{i} K_{j}^{e}n(j) - K_{i}^{e}n(i) - k_{ads}(i)n(i) + k_{des}(i)n_{s}(i),$$
(1)

$$\frac{dn_{s}(i)}{dt} = \sum_{j,l} k_{jl} n_{s}(j) n_{s}(l) - n_{s}(i) \sum_{j} k_{ij} n_{s}(j) + \sum_{j} k_{j}^{e} n_{s}(j) - k_{i}^{e} n_{s}(i) + k_{ads}(i) n(i) - k_{des}(i) n_{s}(i).$$
(2)

Здесь K_{ij} и k_{ij} – коэффициенты скоростей реакций в газов и твердой фазах между компонентами *i* и *j*, K_i^e и k_i^e – коэффициенты скоростей реакций, обусловленных влиянием внешних факторов (космические лучи, УФ-излучение), $k_{ads}(i)$ – коэффициент скорости адсорбции компонента с индексом *i* на космическую пыль, $k_{des}(i)$ – коэффициент скорости десорбции компонента *i* с пыли.

В трехфазных моделях отдельно рассматриваются компоненты на поверхности пыли (наследуя обозначения из уравнения ((2)), обозначим их концентрацию как $n_s(i)$) и компоненты глубин-

ных слоев мантии пыли (с концентрацией $n_m(i)$) [12, 13]. Численные концентрации компонентов на поверхности пыли и в толще мантии подчиняются уравнениям, аналогичным уравнению ((2)), однако в уравнениях для толщи мантии отсутствуют слагаемые для адсорбции и десорбции, поскольку обмен веществом между газовой и твердой фазами происходит только с поверхности пыли. В нашей модели поверхностное вещество составляют верхние пять слоев ледяной мантии. Предполагается, что, как и в поверхностных слоях, движение частиц в толще мантии обусловлено тепловой диффузией. Соотношение энергетического барьера диффузии для компонента і в толще мантии и его энергии десорбции выбрано равным $E_{swap}(i)$: $E_{des}(i) = 0.7$ [14]. Поскольку в нашей модели отношение барьера диффузии компонента і в поверхностных слоях ледяной мантии к его энергии десорбции составляет $E_{\rm b}(i)$: $E_{\rm des}(i) = 0.5$, реакции в толще мантии будут идти замедленно по сравнению с поверхностью.

В результате химических реакций и обмена веществом с газовой фазой происходит обновление поверхностных слоев пыли, поэтому в уравнения необходимо ввести слагаемые, обеспечивающие переопределение того, какие частицы считать находящимися на поверхности, а какие в толще мантии. При увеличении общей концентрации вещества $n_{\rm s} = \sum_i n_{\rm s}(i)$ на поверхности пыли (т.е. в случае, когда $[dn_{\rm s}/dt]_{\rm chem} = \sum_i [dn_{\rm s}(i)/dt]_{\rm chem} > 0)$ концентрация компонента, перераспределяемого с поверхности пыли в толщу мантии [12], задается выражением

$$\frac{dn_{\rm s}(i)}{dt}\Big]_{\rm tran} = \alpha_{\rm ads} \left[\frac{dn_{\rm s}}{dt}\right]_{\rm chem} \frac{n_{\rm s}(i)}{n_{\rm s}}.$$
 (3)

Здесь $[dn_{\rm s}(i)/dt]_{\rm chem}$ — изменение концентрации поверхностного компонента *i* в результате химических реакций и взаимодействия с газовой фа-

зой, $\alpha_{ads} = N_s/N_{site}$ — отношение общего количества молекул на поверхности одной пылинки к среднему числу активных центров для адсорбции на пылинке, поверхностную плотность которых обычно принимают равной ~10¹⁵ см⁻² (в нашей модели она принята равной 4 × 10¹⁴ см⁻²).

В случае уменьшения общей концентрации вещества на поверхности пыли $([dn_s/dt]_{chem} = \sum_i [dn_s(i)/dt]_{chem} < 0)$ перераспределение компонентов между толщей мантии и поверхностью пылинки определяется выражением

$$\left[\frac{dn_{\rm s}(i)}{dt}\right]_{\rm tran} = \alpha_{\rm des} \left[\frac{dn_{\rm s}}{dt}\right]_{\rm chem} \frac{n_{\rm m}(i)}{n_{\rm m}}.$$
 (4)

Здесь $n_{\rm m} = \sum_{i} n_{\rm m}(i)$ — суммарная концентрация вещества в толще мантии, $\alpha_{\rm des} = \min(n_{\rm m}/n_{\rm s},1)$ [13]. Возможны и иные варианты выбора $\alpha_{\rm des}$; так, в работе [12] принято $\alpha_{\rm des} = \alpha_{\rm ads}$. Различие между этими вариантами обсуждается в [13].

Отметим, что выше описан не физический перенос вещества между глубинными слоями льда и поверхностью пыли, а переопределение того, какое вещество считать принадлежащим толще мантии, а какое – поверхностным слоям. Физический обмен веществом между мантией и поверхностью (диффузия), описанный в [14], в данной модели реализован отдельно. Уменьшение концентрации компонента і в толще мантии из-за диффузии на поверхность задается слагаемым $R_{\text{swap,m}}(i) = N_{\text{m}}(i)k_{\text{swap}}(i)\min(N_{\text{s}}/N_{\text{m}},1),$ где $N_{\text{m}} = \sum_{i}N_{\text{m}}(i)$ – общее число молекул в толще мантии одной пылинки, $k_{swap}(i) = v_0(i) \exp(-E_{swap}(i)/T_d)$ коэффициент скорости диффузии (здесь $v_0(i)$ – характеристическая частота гармонического осциллятора, T_d — температура пыли). Чтобы был соблюден баланс между веществом, уходящим из толщи мантии на поверхность и с поверхности в толщу мантии, уменьшение концентрации компонента і в поверхностных слоях из-за диффузии в глубинные слои ледяной мантии пылинки рассчитывается по формуле

$$R_{\text{swap,s}}(i) = N_{\text{s}}(i)/N_{\text{s}}\sum_{j}R_{\text{swap,m}}(j).$$

Итоговые уравнения химической кинетики, описывающие общее изменение численной концентрации компонента *i* на поверхности пыли $[dn_s(i)/dt]_{tot}$ и в толще мантии $[dn_m(i)/dt]_{tot}$ соответственно, выглядят так:

$$\left[\frac{dn_{\rm s}(i)}{dt}\right]_{\rm tot} = \left[\frac{dn_{\rm s}(i)}{dt}\right]_{\rm chem} - \left[\frac{dn_{\rm s}(i)}{dt}\right]_{\rm tran} - R_{\rm swap,s}(i), (5)$$

$$\left[\frac{dn_{\rm m}(i)}{dt}\right]_{\rm tot} = \left[\frac{dn_{\rm m}(i)}{dt}\right]_{\rm chem} + \left[\frac{dn_{\rm s}(i)}{dt}\right]_{\rm tran} - R_{\rm swap,m}(i).$$
(6)

Эти уравнения интегрировались на каждой из рассмотренных стадий, причем конечный набор содержаний на каждой стадии использовался в качестве начального набора на следующей стадии.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Сравнение двух- и трехфазной моделей на стадии облака

Моделирование начинается с фазы молекулярного облака, для которой выбран низкометалличный начальный химический состав [18]. Если произвести расчет при помощи трехфазной модели с теми же параметрами, что и в работе [7], т.е. с температурой 10 К и длительностью стадии молекулярного облака 10^6 лет, мы получим итоговые соотношения содержаний gH₂O : gCO : gCO₂ : gCH₃OH = 100 : 29 : 0.2 : 12 [19]. Относительное содержание gCO и gCH₃OH здесь ближе к наблюдательным данным, чем в двухфазном случае, однако содержание gCO₂ попрежнему крайне низко. Моделируя эволюцию облака в диапазоне температур 10-20 К и на вре-

менах до 10^6 лет, мы обнаружили, что наилучшее согласие с наблюдательными данными в трехфазном случае достигается при температуре 16 К и длительности фазы молекулярного облака 2×10^5 лет. При таких условиях с использованием той же сетки астрохимических реакций, что и в [7], соотношения содержаний равны gH₂O: gCO: gCO₂ : gCH₃OH = 100 : 25 : 22 : 1. Хотя здесь имеется некоторое недопроизводство адсорбированного метанола по сравнению со средними наблюдаемыми значениями, именно эти параметры (температура молекулярного облака 16 К, длительность стадии молекулярного облака 2×10^5 лет) мы выбрали для нашей основной модели.

При выбранной температуре gCO эффективнее конвертируется в gCO₂, чем при 10 K, а уменьшение длительности стадии молекулярного облака обусловливает более низкое содержание адсорбированного метанола. Интересно, что разница температур порядка градуса приводит к существенным различиям в содержаниях адсорбированных соединений. Конкретно, на содержание водяного льда в трехфазной модели изменение температуры оказывает незначительное действие, тогда как на льды gCO, gCO₂ и gCH₃OH влияние температуры более существенно (см. рис. 1). Так, при температуре 15 К через 2×10^5 лет фазы молекулярного облака мы получаем отношения содержаний $gH_2O: gCO: gCO_2: gCH_3OH = 100: 44: 7: 3$, т.е. СО конвертируется в gCO₂ менее эффективно,



Рис. 1. Сравнение содержаний адсорбированных соединений на стадии молекулярного облака для различных температур в трехфазной модели.

чем при 16 К. Основные изменения, обусловливающие различие содержаний gCO и gCO₂ при 15 и 16 К, происходят на временах 10^4-10^5 лет. В этом промежутке увеличение содержания диоксида углерода gCO₂ в толще мантии пыли обеспечивается его переносом с поверхности, а на поверхности самая быстрая реакция образования

 gCO_2 — это $gOH + gCO \rightarrow gCO_2 + gH$. И скорость образования gCO_2 в этой реакции, и скорость его переноса с поверхности в глубинные слои мантии при 16 К выше, чем при 15 К (скорость переноса, в частности, пропорциональна содержанию переносимого вещества). В формулах для вычисления скоростей поверхностных ре-

акций температура пыли стоит в знаменателе показателя экспоненты, и изменение температуры с 15 до 16 К сопоставимо с изменением числителя экспоненты на $15/16 \approx 0.94$, что и может обусловливать столь значимую разницу в содержаниях, которая, однако, для всех представленных на

рис. 1 соединений на момент времени 2×10^5 лет находится в пределах одного порядка. Заметим,

что на временах больше 4×10^5 лет разница содержаний gCO в толще ледяной мантии при 15 и 16 К составляет уже более порядка величины, и именно содержание gCO в толще мантии на этих временах вносит основной вклад в общее содержание gCO на пыли.

Для сравнения нами было проведено моделирование с использованием двухфазной модели, которая применялась в работе [7], при температуре 16 К до времени 2×10^5 лет. Здесь и в следующих разделах мы рассматриваем только компоненты, содержания которых в какой-либо момент времени и хотя бы в одной из моделей превышают 10^{-12} по отношению к числу ядер водорода. Для адсорбированных соединений содержания в двухфазной модели сравниваются с суммой содержаний на поверхности пыли и в толще мантии в трехфазной модели.

Всего в двухфазной модели 652 соединения, в том числе 455 газофазных и 197 адсорбированных. В трехфазной модели число соединений на пыли удваивается за счет добавления соединений из толщи мантии. Содержания 355 компонентов (223 газофазных и 132 адсорбированных) на стадии молекулярного облака хотя бы в одной из моделей превышают 10⁻¹². В табл. 2 представлены компоненты, у которых различие содержаний в двух- и трехфазной моделях превышает порядок величины.

Содержания подавляющего большинства газофазных соединений в двух- и трехфазной моделях согласуются в пределах порядка величины на протяжении всей стадии молекулярного облака. Газофазные компоненты с различием содержаний в двух моделях более чем на порядок (их всего 10) представлены в начале табл. 2. В их число, в частности, входит метанол, основной источник которого – реактивная десорбция в реакции $gH + gCH_2OH \rightarrow gCH_3OH$. Данная реакция в трехфазной модели имеет скорость примерно на порядок выше, чем в двухфазной. Разница содержаний метанола на пыли в обеих моделях также существенна и составляет более порядка.

Различие вычисленных содержаний адсорбированных соединений между двух- и трехфазной моделями встречается чаще. У 77 компонентов (около 60%) это различие превышает порядок величины, причем в некоторых случаях разница может достигать 8–10 порядков. Содержания многих компонентов на пыли в трехфазной модели оказываются существенно выше, чем в двухфазной: при низких температурах вещество с поверхности пыли эффективно поступает в толщу мантии и сохраняется там, реже вовлекаясь в химические реакции.

3.2. Сравнение двухфазной и трехфазной моделей на стадии диска

В этом разлеле мы сопоставим чувствительность к вспышке различных соединений в двух- и трехфазной моделях. В представленных далее таблицах жирным шрифтом выделены соединения, содержания которых в трехфазной модели до и после вспышки отличаются более чем на порядок, не демонстрируя подобного различия в двухфазной модели. Иными словами, это соединения, которые являются индикаторами вспышки в трехфазной модели, но не являются ими в двухфазной модели. Курсивом выделено единственное соединение (адсорбированный формамид gNH₂CHO), содержание которого в двухфазной модели до и после вспышки отличается более чем на порядок, но не демонстрирует подобного различия в трехфазной модели. Иными словами, это соединение является потенциальным индикатором вспышки в двухфазной модели, но не является им в трехфазной модели. Отметим, что в данной работе мы в равной степени называем индикаторами вспышки как газофазные, так и адсорбированные соединения, хотя с точки зрения доступных наблюдений "настоящими" индикаторами являются только молекулы в газовой фазе. Наблюдения молекул в ледяных мантиях возможны для очень ограниченного набора молекул [11] и только при специфической геометрии расположения протопланетного диска [20]. Тем не менее мы описываем все соединения, реагирующие на вспышку, включая адсорбированные, учитывая, например, что они могут стать видимыми в результате испарения мантий при повторной вспышке.

Во внутренней области диска, имеющей наиболее высокую температуру, наблюдается мало различий между содержаниями в двух- и трехфазной моделях, и модели можно считать согласующимися почти идеально. Разница содержаний в порядки величины имеет место только для нескольких адсорбированных соединений — длинных углеродных цепочек и натрия. В табл. 3 представлены компоненты, у которых различие содержаний в двух- и трехфазной моделях превышает порядок величины. Из-за высокой температуры в этой области вещество с поверхности пыли эффективно возгоняется в газовую фазу, поэтому

ВСПЫШКИ СВЕТИМОСТИ В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ

Компонент	2 Ph	3 Ph	Компонент	2 Ph	3 Ph
CH ₃ OH	4.4(-11)	2.9(-9)	gCH ₂ CN	4.7(-16)	8.7(-09)
CH ₃ OH ⁺	1.0(-13)	6.9(-12)	gCH ₂	1.3(-17)	1.1(-10)
C ₂ H ₂ N	4.3(-11)	3.4(-12)	gCH ₂ NH	4.3(-17)	5.3(-09)
C ₄ H ₄	6.7(-12)	2.1(-13)	gCH ₂ NH ₂	2.2(-17)	2.0(-09)
C_7H_4	1.9(-12)	1.4(-13)	gNH ₂	8.4(-14)	1.8(-07)
C_8H_4	1.1(-12)	9.2(-14)	gCH ₂ OH	1.1(-15)	2.7(-08)
CH ₂ NH ₂	1.6(-11)	2.2(-10)	gOH	5.7(-13)	1.6(-06)
CH ₂ OH	6.0(-11)	4.0(-09)	gCH ₃	7.5(-16)	1.3(-08)
CH ₃ NH	1.6(-11)	2.2(-10)	gHCO	2.6(-14)	5.0(-10)
H ₅ C ₃ N	3.1(-11)	1.0(-12)	gCH ₃ NH	2.2(-17)	1.6(-09)
gC ₉	1.6(-20)	1.9(-12)	gCH ₃ OCH ₃	1.4(-14)	5.3(-11)
gC ₂	3.6(-16)	1.3(-08)	gCH ₃ OH	1.4(-08)	6.8(-07)
gC ₂ H	3.8(-16)	1.5(-08)	gCH ₅ N	5.3(-09)	8.0(-08)
gC ₂ H ₃	5.9(-17)	4.3(-10)	gCHNH	5.8(-23)	2.2(-11)
gC_2H_4	1.3(-11)	1.4(-08)	gNH	8.5(-14)	2.6(-07)
gC_2H_5	9.1(-16)	4.8(-09)	gS	2.4(-18)	6.0(-12)
gC_2N	2.9(-16)	8.0(-09)	gFe	1.4(-17)	3.3(-11)
gCN	1.6(-14)	2.1(-07)	gH ₂ O ₂	7.4(-11)	5.7(-09)
gO	6.9(-13)	1.0(-06)	gHS	1.6(-14)	4.7(-10)
gCS	5.3(-11)	4.0(-09)	gHC ₃ N	5.4(-10)	9.5(-08)
gC ₃	4.2(-15)	9.0(-09)	gHC ₃ O	2.0(-16)	1.1(-12)
gC ₃ H	4.0(-15)	3.2(-08)	gHC ₅ N	1.9(-12)	1.7(-09)
gC_3H_2	4.9(-09)	8.4(-08)	gHC ₇ N	1.5(-13)	1.4(-10)
gC_3H_3	8.1(-15)	4.5(-08)	gHC ₉ N	2.5(-15)	1.9(-11)
gC_3H_3N	2.8(-11)	2.7(-09)	gHCCN	3.0(-16)	1.6(-09)
gC_3N	2.2(-16)	6.4(-10)	gSi	3.3(-17)	7.0(-12)
gC_4	3.2(-17)	1.3(-09)	gMgH	5.4(-17)	3.3(-10)
gC ₄ H	6.2(-17)	3.5(-09)	gMg	4.0(-17)	7.4(-12)
gC_4H_2	8.9(-10)	3.1(-08)	gN_2H_2	1.1(-10)	2.5(-09)
gC ₅	5.1(-18)	1.1(-10)	gNO	8.9(-13)	3.2(-07)
gC ₅ H	6.0(-18)	6.4(-10)	gNa	1.2(-17)	1.8(-11)
gC_5H_2	1.7(-10)	8.0(-09)	gNS	1.4(-14)	2.9(-11)
gC_5N	1.2(-18)	7.5(-12)	gO ₂	8.0(-13)	1.1(-11)
gC_6	1.1(-19)	3.6(-11)	gO ₂ H	1.7(-18)	6.7(-11)
gC ₆ H	3.5(-19)	2.1(-10)	gO ₃	5.7(-11)	3.9(-08)
gC_6H_2	4.6(-11)	2.3(-09)	gOCN	2.9(-15)	2.4(-09)
gC_7	6.1(-20)	9.6(-12)	gOCS	1.3(-15)	1.1(-09)
gC ₇ H	9.6(-20)	5.4(-11)	gSiH	3.2(-17)	1.1(-11)
gC_7H_2	1.2(-11)	6.2(-10)	gSiH ₂	3.9(-17)	1.7(-10)
gC_8	2.8(-21)	3.7(-12)	gSiH ₃	3.8(-17)	2.6(-11)
gC ₈ H	1.5(-20)	2.0(-11)	gSO	2.2(-15)	6.7(-10)
gC_8H_2	3.8(-12)	2.0(-10)	gSO ₂	3.7(-19)	4.3(-12)
gC9H	1.9(-20)	7.7(-12)	gC ₂ H ₅ OH	4.3(-14)	5.3(-11)
gC_9H_2	1.5(-12)	8.2(-11)			

Таблица 2. Содержания компонентов в конце стадии молекулярного облака

	P					
Variation	Перед вс	спышкой	500 лет	спустя	Отношение после/до	
KOMHOHEHT	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph
gC ₉	4.0(-24)	2.8(-12)	3.8(-24)	1.4(-13)	1.0	0.1
gC_6H_4	2.8(-09)	2.7(-10)	2.9(-09)	2.9(-10)	1.0	1.1
gC_7H_4	5.1(-10)	1.7(-13)	5.7(-10)	1.9(-13)	1.1	1.1
gC ₈ H	2.1(-17)	1.0(-11)	2.0(-17)	6.1(-12)	1.0	0.6
gC_8H_4	1.6(-10)	4.5(-16)	2.5(-10)	3.9(-15)	1.5	8.7
gC ₉ H	8.8(-18)	9.3(-12)	7.4(-18)	3.8(-12)	0.9	0.4
gC_9H_4	6.9(-11)	2.1(-17)	9.7(-11)	1.6(-15)	1.4	77

7.7(-17)

Таблица 3. Внутренняя область диска

наличие двух фаз на пыли вместо одной не оказывает существенного влияния на результат моделирования.

1.4(-10)

8.7(-17)

Для более отдаленных областей протопланетного диска характерна следующая картина: как в спокойной фазе, так и после вспышки содержания многих адсорбированных соединений в трехфазной модели на порядки величины выше, чем в двухфазной. Вещество на пыли эффективно сохраняется в толще мантии, где оно медленнее вступает в реакции по сравнению с веществом поверхностных слоев. Исключение составляют углеродные цепочки вида gC_xH_4 , которых в двухфазном случае больше, чем в трехфазном. Разница в содержаниях возникает уже во время спокойной стадии протопланетного диска и сохраняется на протяжении дальнейшей эволюции. Как в двухфазной, так и в трехфазной модели молекулы вида $gC_{x}H_{4}$ на пыли эффективно разрушаются фотонами космических лучей, но в двухфазном случае их количество восполняется в реакциях гидрирования, а в трехфазном, поскольку основная часть адсорбированного вещества сосредоточена в толще ледяной мантии, реакции гидрирования идут менее эффективно, и содержание рассматриваемых молекул падает. Отметим, что с удалением от звезды различие содержаний в двухи трехфазном случаях более чем на порядок величины наблюдается только для самых длинных углеродных цепочек – gC_8H_4 и gC_9H_4 во внешнем диске и gC_9H_4 в экстремально внешнем диске.

В табл. 4—6 приведен список всех газофазных и избранных адсорбированных компонентов (длинные углеродные цепочки gC_xH_4 и соединения, подробно рассмотренные в [7]), содержания которых в двух- и трехфазной моделях отличаются более, чем на порядок, для промежуточной, внешней и экстремально внешней областей диска соответственно. Полный список адсорбированных компонентов, обладающих указанными свойствами, можно найти в Приложении.

0.9

1.0

1.4(-10)

В промежуточной и внешней областях протопланетного диска трехфазная модель предлагает некоторое количество новых потенциальных индикаторов вспышечной активности по сравнению с двухфазной моделью, в том числе около десятка газофазных компонентов в каждой из областей (табл. 4, 5). В экстремально внешней области число новых газофазных индикаторов достигает 30 (табл. 6). В частности, индикатором вспышки всюду, кроме внутренней области диска, может служить газофазный молекулярный кислород. В [7] молекулярный кислород входил в число предполагаемых индикаторов вспышечной активности только в экстремально внешней области темного диска, где его содержание после вспышки превышало довспышечное на три порядка. В нашей работе всюду, кроме внутренней области протопланетного диска, в трехфазном случае O2 демонстрирует различие до- и поствспышечных содержаний на 3-4 порядка. Его содержание быстро растет в начале вспышки благодаря десорбции с поверхности пыли и реактивной десорбции в реакции $gH + gO_3 \rightarrow gO_2 + gOH$. После вспышки содержание О2 в газовой фазе медленно снижается в основном за счет диссоциации и ионизации молекул кислорода фотонами космических лучей, а также адсорбции на пыль (рис. 2). В двухфазной модели различия содержаний О₂ до и спустя 500 лет после вспышки находятся в пределах порядка, а во внешней и экстремально внешней областях эти содержания и вовсе

оказываются ниже установленного порога 10^{-12} . Во внутренней области O₂ в обеих моделях сосредоточен в основном в газовой фазе и на вспышку почти не реагирует, сохраняя газофазные содержания порядка 10^{-5} .

gNa

Konnonant	Перед вс	пышкой	500 лет	спустя	Отношение после/до	
KOMIIOHCHI	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph
Н	9.3(-05)	6.2(-06)	9.2(-05)	7.5(-06)	1.0	1.2
CN	1.9(-13)	3.0(-12)	1.4(-12)	4.4(-12)	7.2	1.4
NO	3.8(-13)	1.2(-10)	4.2(-13)	1.2(-11)	1.1	0.1
CS	4.9(-14)	2.4(-12)	5.4(-14)	1.1(-14)	1.1	5.0(-3)
CH ₃	1.6(-11)	1.5(-12)	1.2(-11)	2.9(-11)	0.8	18.9
HNO	3.9(-13)	5.1(-09)	4.8(-13)	4.8(-13)	1.2	9.4(-5)
O_2	1.7(-12)	5.7(-14)	1.9(-12)	3.0(-10)	1.1	5256
NS	2.4(-16)	1.5(-12)	3.3(-16)	4.3(-16)	1.4	2.9(-4)
N_2H^+	2.7(-14)	1.1(-12)	2.7(-14)	1.1(-12)	1.0	0.9
H_2NO^+	3.8(-16)	2.7(-12)	4.3(-16)	3.6(-16)	1.2	1.3(-4)
gC ₄ H ₄	7.6(-08)	9.4(-12)	1.0(-07)	2.2(-08)	1.4	2366
gC_5H_4	1.4(-08)	7.4(-12)	2.8(-08)	6.1(-11)	1.9	8.3
gC_6H_4	3.6(-09)	2.0(-12)	3.1(-08)	5.7(-10)	8.6	282
gC_7H_4	9.1(-10)	4.8(-13)	2.6(-09)	6.7(-12)	2.9	14.0
gC_8H_4	2.9(-10)	1.6(-13)	1.4(-09)	5.5(-12)	4.8	34.2
gC_9H_4	1.2(-10)	6.2(-14)	1.2(-09)	4.2(-12)	10.0	67
gCH ₃ OH	2.9(-08)	7.9(-11)	2.9(-08)	5.9(-10)	1.0	7.6
gNH ₂ OH	1.3(-14)	2.0(-06)	1.3(-14)	2.0(-06)	1.0	1.0

Таблица 4. Промежуточная область диска

Таблица 5. Внешняя область диска

Vourouaut	Перед вс	спышкой	500 лет	спустя	Отношени	е после/до
KOMIIOHEHT	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph
СО	1.1(-11)	7.5(-13)	1.1(-11)	1.6(-12)	1.0	2.1
Ν	1.9(-12)	6.7(-14)	1.9(-12)	2.9(-12)	1.0	42.6
NO	1.3(-12)	6.8(-13)	1.2(-12)	6.7(-14)	1.0	0.1
HNO	1.3(-12)	6.9(-13)	1.3(-12)	7.0(-14)	1.0	0.1
\mathbf{NH}_{2}	1.4(-12)	5.3(-14)	1.4(-12)	2.2(-12)	1.0	42.1
O ₂	5.4(-16)	1.1(-11)	4.1(-15)	4.3(-08)	7.5	3904
NH	2.9(-12)	1.1(-13)	2.9(-12)	3.6(-12)	1.0	32.8
H_2O_2	5.9(-19)	5.5(-15)	5.9(-19)	1.3(-12)	1.0	240
N_2	3.2(-07)	2.4(-09)	3.2(-07)	1.3(-06)	1.0	542
O ₂ H	6.2(-19)	5.4(-15)	7.1(-19)	1.4(-12)	1.2	252
N_2H^+	1.3(-11)	6.9(-13)	1.4(-11)	1.5(-11)	1.0	22.5
gCO	1.3(-05)	8.9(-07)	1.3(-05)	1.9(-06)	1.0	2.1
gC_6H_6	2.1(-12)	1.5(-12)	2.1(-12)	2.4(-09)	1.0	1591
gC_8H_4	2.8(-10)	2.8(-11)	2.8(-10)	2.8(-11)	1.0	1.0
gC_9H_4	1.2(-10)	1.1(-11)	1.2(-10)	1.1(-11)	1.0	1.0
gCH ₃ OH	2.0(-07)	4.0(-06)	2.0(-07)	4.0(-06)	1.0	1.0
gNH ₂ OH	4.3(-28)	1.8(-26)	1.1(-15)	9.9(-08)	2.5(12)	5.5(18)

Таблица 6. Экстремально внешняя область диска

Variation	Перед вс	пышкой	500 лет	спустя	Отношение после/до	
компонент	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph
СО	2.6(-09)	4.0(-10)	9.3(-07)	8.9(-08)	358	225
S	9.5(-12)	2.6(-11)	1.3(-11)	2.1(-10)	1.4	8.3
CN	1.3(-12)	6.7(-14)	1.6(-09)	8.7(-10)	1235	1.3(4)
NO	4.0(-10)	2.2(-10)	4.7(-09)	6.0(-08)	11.7	274
SO	3.9(-15)	3.9(-15)	2.3(-13)	1.2(-11)	58.4	3199
CS	1.4(-13)	3.5(-14)	1.9(-12)	8.6(-11)	14.1	2441
C ₃ H ₄	3.0(-12)	2.7(-13)	3.8(-12)	3.6(-12)	1.3	13.3
C_4H_2	7.2(-14)	1.5(-14)	2.4(-13)	6.8(-12)	3.3	460
CH ₂ CO	6.5(-18)	8.4(-18)	7.1(-13)	8.1(-12)	1.1(5)	9.6(5)
CH ₃ OH	7.7(-13)	2.0(-11)	4.8(-13)	1.1(-12)	0.6	0.1
НСООН	2.4(-17)	6.9(-18)	1.2(-13)	1.3(-10)	5202	1.8(7)
HCS	5.5(-14)	2.8(-15)	7.8(-14)	1.3(-12)	1.4	467
\mathbf{HNO}^+	4.8(-13)	3.2(-13)	4.9(-13)	1.8(-11)	1.0	57.2
O_2	1.7(-15)	1.9(-13)	6.7(-13)	4.6(-09)	392	2.5(4)
OCS	9.2(-13)	3.2(-13)	2.2(-12)	5.2(-11)	2.4	161
C_2N	5.6(-15)	8.4(-16)	4.5(-13)	5.8(-12)	79.6	6968
C ₂ O	1.1(-17)	1.8(-17)	6.7(-14)	1.9(-12)	5841	1.1(5)
C_2S	5.7(-18)	1.8(-17)	3.6(-15)	2.2(-12)	633	1.2(5)
C_3H_3N	3.3(-15)	5.4(-14)	2.5(-12)	2.8(-11)	768	512
C ₄	3.8(-15)	9.0(-16)	5.1(-14)	1.2(-12)	13.4	1365
C ₄ H	1.8(-14)	4.6(-15)	1.3(-13)	4.0(-12)	7.4	864
C_4H_3	2.3(-13)	1.9(-14)	2.5(-13)	8.2(-12)	1.1	433
C_5H_2	3.5(-15)	1.2(-15)	3.8(-14)	2.8(-12)	10.9	2246
HCN	2.8(-12)	1.2(-13)	4.4(-09)	1.6(-09)	1617	1.3(4)
CH ₂ OH	7.8(-13)	1.9(-11)	6.2(-13)	3.1(-13)	0.8	2(-2)
H ₂ CO	6.9(-12)	4.9(-11)	8.6(-12)	9.5(-11)	1.3	1.9
CO ₂	4.5(-11)	4.2(-14)	6.9(-11)	4.1(-10)	1.51	9534
H ₂ CS	9.5(-14)	7.7(-15)	1.9(-13)	1.2(-11)	2.0	1602
H_2O_2	2.2(-16)	9.5(-14)	1.5(-16)	7.6(-12)	0.7	80
HC ₂ O	1.2(-19)	3.2(-18)	1.8(-15)	1.1(-11)	1.6(4)	3.6(6)
HC ₃ O	7.0(-18)	1.2(-16)	1.6(-14)	2.2(-12)	2363	1.8(4)
HCCN	3.4(-14)	8.5(-15)	2.8(-13)	6.1(-12)	8.4	719
HNCO	1.6(-13)	6.5(-15)	9.3(-13)	6.7(-11)	5.8	1.0(4)
N ₂ O	1.8(-13)	4.0(-14)	2.2(-13)	1.4(-11)	1.3	353
NS	8.2(-13)	1.4(-13)	1.9(-12)	6.2(-11)	2.3	443
O ₂ H	1.9(-16)	7.9(-14)	1.8(-16)	1.6(-11)	0.95	201
O_3	2.6(-16)	3.3(-14)	2.3(-14)	5.4(-08)	88.4	1.6(6)
OCN	1.9(-13)	4.7(-14)	6.1(-12)	7.2(-10)	32.5	1.5(4)
SO_2	1.1(-18)	4.4(-16)	1.0(-15)	8.6(-12)	917	2.0(4)
gCO	2.2(-05)	6.6(-06)	2.1(-05)	2.0(-06)	1.0	0.3
gC_9H_4	1.1(-10)	1.1(-11)	1.1(-10)	1.1(-11)	1.0	1.0
gCH ₃ OH	1.4(-07)	8.1(-06)	1.4(-07)	8.2(-06)	1.0	1.0



Рис. 2. Молекулярный кислород как возможный индикатор вспышечной активности. Здесь и далее на рисунках за нулевой момент времени принимается начало вспышки.

Из хорошо наблюдаемых [21] молекул индикаторами вспышечной активности могут оказаться, к примеру, CS, CN, HCN в экстремально внешней области протопланетного диска. Их содержания спустя 500 лет после вспышки заметно выше довспышечных, и данный эффект более ярко проявляется в трехфазной модели. Также в трехфазной модели индикаторами оказываются CS в промежуточной области диска (после вспышки его концентрация в этой области падает на несколько порядков и через 500 лет после вспышки все еще остается ниже порога 10^{-12}) и N₂H⁺ во внешней области диска (здесь его концентрация спустя 500 лет после вспышки более чем на порядок величины выше по сравнению с довспышечной).

В работе [22] упоминались наблюдения изото-

пологов HCO⁺ как неявных трейсеров снеговой линии воды в протопланетных дисках, поскольку присутствие большого количества молекул воды в газовой фазе уменьшает содержание изотополо-гов HCO⁺. Действительно, при использовании трехфазной модели во внутренней области протопланетного диска на спокойной стадии содержание HCO⁺ достигает порядка 10^{-12} , с началом вспышки резко падает до 10^{-15} , в процессе вспышки практически не меняется, а после вспышки быстро возвращается к довспышечным значениям. Соответствующее понижение содер-

жания изотопологов HCO⁺ может быть выявлено в наблюдениях. Отметим, что в нашей модели изотопологи не рассматриваются, и в наборе химических соединений присутствует только обоб-

щенная молекула HCO⁺.

Далее мы рассмотрим некоторые компоненты, отмеченные как интересные в работе [7].

Адсорбированный бензол gC₆H₆. В [7] было упомянуто, что бензольный лед, в отличие от многих других адсорбированных соединений, аккумулируется на пыли во время и после вспышки. Здесь мы наблюдаем аналогичные процессы как в двухфазной, так и в трехфазной моделях (рис. 3). Во время и после вспышки бензол производится в газовой фазе. Во время вспышки основными его источниками являются реакции $C_6H_7^+ + NH_3 \rightarrow C_6H_6 + NH_4^+$ и $C_2H_4 + C_4H_3 \rightarrow$ $\rightarrow H + C_6H_6$, а после вспышки – диссоциативная рекомбинация иона $C_6H_7^+$. В трехфазной модели в промежуточной и внешней областях бензол начинает аккумулироваться на пыли во время вспышки, а во внутренней области – уже после вспышки. В результате содержание адсорбированного бензола после вспышки во внутренней, промежуточной и внешней областях на порядки величины превышает довспышечное. В экстремально внешней области содержание бензола в толще ледяной мантии не претерпевает существенных изменений из-за вспышки и сохраняется на уровне порядка 10⁻¹². Некоторые изменения в поверхностных слоях и в газовой фазе имеют место, однако содержания там на порядки ниже, чем в толше мантии. В двухфазной модели сушественные изменения содержания адсорбированного бензола в результате вспышки характерны для внутренней и промежуточной областей протопланетного диска и не затрагивают внешнюю и экстремально внешнюю области.

Метанол. В двухфазном случае в экстремально внешней области протопланетного диска содержание газофазного метанола находится ниже за-



Рис. 3. Содержания адсорбированного бензола в двухфазной и трехфазной моделях в различных областях протопланетного диска.



Рис. 4. Содержания метанола в двухфазной и трехфазной моделях в различных областях протопланетного диска.

ланного предела (10⁻¹²) на всем времени моделирования стадии протопланетного диска (рис. 4). В трехфазном случае довспышечное содержание метанола в этой области превышает 10⁻¹¹. В начале вспышки оно повышается приблизительно на порядок, а затем медленно падает в процессе и после вспышки. Возрастание содержания в начале вспышки в основном обусловлено реактивной десорбцией в реакции $gH + gCH_2OH \rightarrow gCH_3OH$ в поверхностных слоях. После вспышки скорость данной реакции падает на несколько порядков, что наряду с разрушением СН₃ОН фотонами космических лучей и при отсутствии других значимых источников метанола способствует возвращению его содержания к прежним значениям и даже падению ниже них. В отличие от работы [7], где содержание метанола в экстремально внешней области через 200 лет после вспышки в 50 раз превышает довспышечное, в трехфазном случае через 200 лет после вспышки содержание метанола уже несколько ниже довспышечного, а через 500 лет после вспышки оно падает более чем на порядок величины по сравнению с довспышечным. Это означает, что метанол, тем не менее, может служить индикатором вспышечной активности в экстремально внешней области диска. Стоит отметить, что в данной области вспышка практически не затрагивает глубинные слои ледяной мантии, в которых содержание льда мета-

нола держится на уровне 10⁻⁶ на протяжении всего времени моделирования стадии протопланетного диска. В более близких к звезде областях протопланетного диска изменение содержания адсорбированного метанола во время и после



Рис. 5. Содержания СО в двухфазной и трехфазной моделях в различных областях протопланетного диска.



Рис. 6. Содержания СО₂ в двухфазной и трехфазной моделях в различных областях протопланетного диска.

вспышки в основном определяется процессами адсорбции и десорбции.

СО, СО₂. В [7] отмечалось, что СО и СО₂ являются индикаторами произошедшей вспышки только в экстремально внешней области протопланетного диска. В нашей работе во внутренней и промежуточной областях протопланетного диска как в двухфазном, так и в трехфазном случаях почти весь СО находится в газовой фазе, поэтому вспышка не оказывает ощутимого влияния на его содержание (рис. 5). Во внешней области в обоих случаях изменение содержания СО во время и после вспышки обусловлено его десорбцией и последующей адсорбцией, которая происходит достаточно быстро. В экстремально внешней области в обоих случаях из-за низкой плотности адсорбция происходит медленно, вследствие чего монооксид углерода сохраняет высокие газофазные содержания на протяжении столетий после вспышки.

Во внутренней области протопланетного диска как в двухфазной, так и в трехфазной модели содержание СО₂ в газовой фазе падает во время вспышки (в основном из-за возрастания скорости реакции $H_2 + CO_2 \rightarrow CO + H_2O$, которая не была сколь-нибудь значимой до вспышки) и затем медленно возвращается к прежним значениям, оставаясь при этом через 500 лет после вспышки более чем на порядок ниже довспышечной (рис. 6). В промежуточной и внешней областях протопланетного диска в обеих моделях изменение содержания СО2 из-за вспышки в основном обусловлено его десорбцией с поверхности пыли и последующей адсорбцией. В экстремально внешней области в двухфазной модели содержания газофазного и адсорбированного диоксида



Рис. 7. Содержание адсорбированного гидроксиламина в двухфазной и трехфазной моделях в различных областях протопланетного диска.

углерода в процессе вспышки практически не ме-

няются, сохраняя значения порядка 10⁻¹¹ и 10⁻⁵ соответственно. В трехфазной модели содержание СО₂ в этой области возрастает в начале вспышки примерно на пять порядков (в основном за счет реактивной десорбции в реакции $gOH + gCO \rightarrow gCO_2 + gH)$ и затем медленно снижается после вспышки: СО₂ разрушается фотонами космических лучей и медленно оседает на пыль, однако реакция $gOH + gCO \rightarrow gCO_2 + gH$ продолжает быть его источником в газовой фазе и отчасти восполняет его запас. Таким образом, в трехфазной модели подтверждается, что СО₂ во внешней области протопланетных дисков способен быть индикатором вспышек светимости. Отметим, что в этой области подавляющая часть СО₂ хранится в толще ледяной мантии пыли, где его содержание во время вспышки почти не претерпевает изменений, оставаясь на уровне порядка 10^{-5} .

Адсорбированный гидроксиламин. В работе [7] у адсорбированного гидроксиламина gNH₂OH во внешнем диске оказалось наибольшее соотношение ловспышечного и поствспышечного содержаний, которое составило порядка 10¹⁵. В нашем исследовании во внутренней и промежуточной областях диска как в двухфазном, так и в трехфазном случаях изменение содержания гидроксиламина на поверхности пыли и в газовой фазе обусловлено в основном десорбцией из-за повышения температуры во время вспышки и последующей адсорбцией (рис. 7). Во внешней и экстремально внешней областях в трехфазном случае адсорбированный гидроксиламин оказывается индикатором вспышечной активности: в этих областях его содержания в процессе вспышки возрастают на 18 порядков по сравнению с довспышечными и достигают 10^{-7} во внешней области и 10^{-8} в экстремально внешней. Как и в [7], основным механизмом производства гидроксиламина на поверхности пыли оказывается реакция $gOH + gNH_2 \rightarrow gNH_2OH$, которая не была столь эффективной до вспышки из-за наличия достаточного количества атомарного водорода на пыли, использовавшегося в реакции синтеза аммиака $gH + gNH_2 \rightarrow gNH_3$. Из-за вспышки водород как летучее соединение быстро испаряется с пыли, и на пыли начинают доминировать реакции с более тяжелыми соединениями, в том числе указанная выше реакция образования гидроксиламина. Стоит отметить, что в упомянутых здесь случаях, как и в работе [7], довспышечная концентрация гидроксиламина на пыли близка к численной неопределенности, поэтому конкретное отношение до и после вспышечных содержаний физического значения не имеет. Но само обнаружение гидроксиламина на поверхности пыли может свидетельствовать о произошедшей несколько сотен лет назад вспышке. В двухфазном случае во внешней и экстремально внешней областях содержание gNH₂OH также возрастает во время вспышки на порядки величины, однако остается ниже порога 10^{-12} .

По сравнению с двухфазной моделью исчезает только один потенциальный индикатор вспышечной активности — формамид gNH₂CHO на поверхности пыли в промежуточной области диска — и приобретается значительное количество новых индикаторов. В промежуточной и внешней областях это в основном адсорбированные компоненты, в экстремально внешней области количественный перевес у новых газофазных индикаторов. Что касается формамида на поверхности пыли, его довспышечное содержание в двухфазной модели оказывается на два порядка ниже, чем в трехфазной. Основной путь производства формамида в обеих моделях — реакция $gNH_2 + gHCO \rightarrow gNH_2CHO$, и в двухфазной модели до вспышки она идет заметно медленнее, чем в трехфазной, из-за меньшего содержания обоих реагентов.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

При удалении от звезды температура понижается и вещества на пыли оказывается больше, поэтому становится существеннее наличие глубинных слоев мантии как отдельной фазы. Во внутренней области протопланетного диска двух- и трехфазная модели дают практически идентичные результаты, а при продвижении к краю диска разница в результатах этих моделей становится более значимой.

В трехфазном случае потенциальные индикаторы вспышечной активности имеют тенденцию проявляться в большем числе модельных областей, чем в двухфазном. Так, молекулярный кислород в двухфазной модели не является индикатором ни в одной из областей, а в трехфазной он оказывается индикатором во всех областях протопланетного диска, кроме внутренней. Адсорбированный бензол в двухфазной модели является индикатором вспышечной активности во внутренней и промежуточной областях диска, а в трехфазной — во всех областях, за исключением экстремально внешней.

Одна из целей моделирования состояла в том, чтобы получить химический состав молекулярного облака, приближенный к наблюдаемому. Важно отметить, что уже само повышение температуры до 16 К без введения глубинных слоев ледяной мантии как отдельной фазы обусловливает приемлемые содержания gCO и gCO₂, однако получить содержание адсорбированного метанола, близкое к наблюдаемому хотя бы по порядку величины, таким образом не удается. В двухфазной модели при 16 К через 2×10^5 лет после начала стадии молекулярного облака отношения содержаний составляют gH₂O : gCO : gCO₂ : gCH₃OH = = 100 : 30 : 43 : 0.04.

В работе [7] сообщалось о высоких содержаниях некоторых длинных углеродных цепочек на поверхности пыли. В нашей трехфазной модели длинные углеродные цепочки формируются в среднем эффективнее, чем в двухфазной (исключение составляют цепочки вида gC_xH_4 , о которых говорилось в предыдущем разделе). Почти все углеродные цепочки с числом атомов углерода ≥ 3 в трехфазной модели в конце стадии молекулярного облака имеют содержания, превышающие 10^{-12} , а в двухфазной модели это верно только для цепочек вида gC_xH₂ и gC_xH₄.

Некоторые значимые потенциальные индикаторы прошлых вспышек демонстрируют различное поведение в наших моделях и в модели [7] (напомним, что там молекулярное облако моделируется при 10 K на протяжении 10^6 лет). Например, в [7] метанол является индикатором вспышечной активности в экстремально внешней области, поскольку его содержание падает после вспышки достаточно медленно. В нашей работе в двухфазном случае метанол на вспышку почти не реагирует, а в трехфазном его содержание после вспышки, напротив, снижается довольно быстро. Таким образом, в данной работе индикатором вспышки оказывается меньшее содержание метанола по сравнению с его содержанием в спокойном протопланетном диске, а в работе [7] – бо́льшее.

Во внутренней области содержание СО₂ и в двухфазной, и в трехфазной модели демонстрирует поведение, аналогичное тому, которое упоминалось в [7] (только падает в конце стадии вспышки не до 10^{-10} , а до 10^{-9}). После окончания вспышки его содержание повышается, но через 500 лет после вспышки оно все еще более чем на порядок ниже довспышечного. И работа [7], и настоящее исследование показывают, что в близких к звезде областях протопланетного диска говорить о вспышечной активности будет скорее недостаток СО2 по сравнению со значениями для спокойного диска, а в удаленных от звезды областях - его избыток. СО2 оказывается индикатором произошедшей вспышки в экстремально внешней области в [7] и в нашей трехфазной модели, однако в двухфазной модели индикатором в этой области он не является.

Такой значимый индикатор, как CO, и в нашей работе, и в [7] демонстрирует одинаковые свойства: во внутренней и промежуточной областях на вспышку практически не реагирует и служит индикатором вспышечной активности лишь в экстремально внешней области протопланетного диска. Стоит отметить, что в каждой из модельных областей наши двухфазные и трехфазные содержания CO ведут себя схожим образом, хотя могут различаться примерно на порядок.

Как и в [7], в нашей трехфазной модели большинство потенциальных индикаторов вспышки оказываются сосредоточенными в экстремально внешней области протопланетного диска. В некоторых областях трехфазная модель предлагает дополнительные индикаторы по сравнению с [7]: например, в трехфазной модели поверхностный бензол оказывается индикатором не только в



Рис. 8. Содержания H₂CO в двухфазной и трехфазной моделях в различных областях протопланетного диска.

промежуточной и во внутренней областях, как у [7], но и во внешней (а в двухфазной модели — только в промежуточной и во внутренней, как и в [7]). Поверхностный гидроксиламин в трехфазной модели оказывается индикатором не только во внешней области, как у [7], но и в экстремально внешней. Молекулярный кислород в трехфазной модели может служить индикатором всюду, кроме внутренней области (а в нашей двухфазной и в модели [7] — только в экстремально внешней). В нашей двухфазной модели по сравнению с трехфазной и с [7] некоторые индикаторы исчезают, например, метанол, адсорбированный гидроксиламин и CO_2 в экстремально внешней области протопланетного диска.

Формальдегид Н₂СО, упоминавшийся в [7] как индикатор вспышечной активности в экстремально внешней области, не оказывается индикатором ни в двухфазной, ни в трехфазной моделях — его содержания в этой области до вспышки и спустя 500 лет после нее различаются не более чем на порядок. Интересно, что как потенциальный индикатор отмечают формальдегид и [8], однако там речь идет о недавно закончившихся вспышках (30-120 лет назад). В нашей трехфазной модели Н₂СО в экстремально внешней области протопланетного диска на упомянутых временах действительно демонстрирует превышение содержания относительно довспышечного более чем на порядок величины, однако затем его содержание постепенно падает и он прекращает быть индикатором. В двухфазной модели Н₂СО в экстремально внешней области на вспышку практически не реагирует (рис. 8).

Также в [8] отмечается, что гидроксиламин NH₂OH в газовой фазе сохраняет превышение содержания над довспышечным уровнем более чем на три порядка величины в течение тысячеле-

тий после вспышки. В нашей двухфазной модели NH₂OH во внутренней области во время вспыш-

ки достигает содержаний порядка 10^{-7} и затем по окончании вспышки очень быстро оседает на пыль, отчего его содержание в газовой фазе сравнивается с довспышечным, которое было ниже выбранного нами предела 10⁻¹². В других модельных точках протопланетного диска содержание гидроксиламина в газовой фазе не превышает 10⁻¹² до, во время и после вспышки. В трехфазной модели поведение NH₂OH во внутренней области аналогично, а также во время вспышки он достигает содержания порядка 10⁻⁶ в промежуточной области протопланетного диска и после вспышки быстро оседает на пыль. Таким образом, ни в одной из моделей в нашей работе NH₂OH в газовой фазе индикатором ранее произошедших вспышек не оказался. В [7] газофазный гидроксиламин также не упоминается в числе индикаторов в темном диске, однако там он является индикатором в атмосфере во внешней области диска. В нашей работе атмосфера не рассматривалась.

Возможным источником неопределенности в полученных результатах являются энергии активации поверхностных процессов. В частности, в работе [23] сообщается, что поверхностная реакция gC + gH₂ = gCH₂ не имеет барьера активации и поэтому оказывается эффективной при низких температурах, тогда как в нашей модели для этой реакции принят барьер, равный 2500 К. Чтобы проверить влияние наличия барьера на содержания основных компонентов ледяной мантии, мы провели при помощи трехфазной модели расчеты для условий молекулярного облака при температуре 10 К на протяжении 10^6 лет (как в [7]) и при 16 К на протяжении 2×10⁵ лет. Выключение барьера для упомянутой реакции оказало лишь незначительное влияние на содержания воды, моно- и диоксидов углерода, а также метанола в мантии пыли. В первом случае было получено соотношение $gH_2O: gCO: gCO_2: gCH_3OH = 100: 30: 0.1: 14,$ во втором – $gH_2O: gCO: gCO_2: gCH_3OH =$ = 100 : 26 : 21 : 2. Напомним, что в стандартном варианте, использованном в наших расчетах, при температуре 10 К и длительности стадии молекулярного облака 10⁶ лет это соотношение оказалось равно 100 : 29 : 0.2 : 12, а при температуре 16 К и длительности стадии молекулярного облака 2×10^5 лет gH₂O : gCO : gCO₂ : gCH₃OH = = 100 : 25 : 22 : 1. Причина незначительного влияния барьера активации этой реакции, по-видимому, заключена в невысоком содержании реагентов. На стадии молекулярного облака при температуре 16 К максимальное содержание атомарного углерода на пыли в трехфазной модели составляет порядка 10⁻¹³, а молекулярного водорода – порядка 10⁻¹⁹. Углерод поступает на пыль в основном в составе СО, и единственный путь к его возвращению в атомарное состояние – реак-

ция диссоциации СО фотонами космических лучей на поверхности пыли, которая недостаточно эффективна, чтобы обеспечить высокое содержание атомарного углерода.

Более существенную роль может играть отношение барьера диффузии к барьеру десорбции E_b/E_D . В нашей модели для любого поверхностного соединения оно принято равным 0.5, однако существуют исследования, указываюшие, что оно может быть ниже. Например, в работе [24] были получены отношения 0.31 для gCO и 0.39 для gCO₂. Если в нашей трехфазной модели принять E_b/E_D равным 0.3, то уже при температуре 10 К получаем заметно лучшее согласие с наблюдательными данными для стадии молекулярного облака: после 10⁶ лет модельного времени соотношения содержаний составляют $gH_2O: gCO: gCO_2: gCH_3OH = 100: 27: 3: 14, a$ после 2×10^5 лет $gH_2O : gCO : gCO_2 : gCH_3OH =$ = 100:35:11:5.

Если принять $E_b/E_D = 0.3$ в трехфазной модели, задать длительность стадии молекулярного облака равной 2×10^5 лет при температуре 10 K, а затем промоделировать вспышку в упомянутых выше областях протопланетного диска (с тем изменением, что в экстремально внешней области температура будет равна 10 K, как на стадии молекулярного облака и как в [7]), то результаты в целом совпадут с результатами, полученными в на-

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 99 № 5 2022

шей основной трехфазной модели, и для большинства соединений разница содержаний в этих двух моделях на протяжении времени эволюции диска не будет превышать порядка величины. Если разница содержаний для некоторого компонента все же превышает порядок величины (например, для СО в экстремально внешней области протопланетного диска), качественная картина поведения концентраций до, во время и после вспышки обычно сохраняется. Тем не менее более двух десятков соединений, оказавшихся потенциальными индикаторами вспышек светимости в нашей основной модели, не будут таковыми в новой модели; среди них газофазный метанол в экстремально внешней области. Модель с $E_b/E_D = 0.3$ также предлагает более тридцати новых потенциальных индикаторов вспышечной активности. В основном это поверхностные вещества, а из газофазных веществ новыми индикаторами оказались С2H2 во внутренней области диска, C₂H₆, атомарный азот и некоторые его соединения в экстремально внешней области. Экстремально внешняя область наиболее богата на различия между двумя трехфазными моделями, поскольку в данной области в этих моделях существенно различается температура: 16 К в основной модели и 10 К в модели с $E_b/E_D = 0.3$.

Полный список потенциальных индикаторов вспышечной активности, которые в двух рассмотренных трехфазных моделях не совпадают, можно найти в табл. 7. В ней жирным шрифтом отмечены компоненты, которые оказались индикаторами в модели с $E_b/E_D = 0.3$, однако не были индикаторами в основной модели с $E_b/E_D = 0.5$, а курсивом – соединения, которые были индикаторами в основной модели, но не оказались индикаторами в основной модели, но не оказались индикаторами в модели с $E_b/E_D = 0.3$.

Стоит отметить, что и наши модели, и модели, используемые в [7, 8], рассматривают исключительно диффузионную химию на поверхности космической пыли, т.е. химические реакции, происходящие по механизму Ленгмюра–Хиншельвуда. Возможно, значимая диффузия в толще ледяной мантии имеет место только для легких компонентов (H, H₂), и изменение содержаний химических соединений в мантии космической пыли во многом обусловлено недиффузионными механизмами. Некоторые из, вероятно, важных недиффузионных механизмов описаны и промоделированы в [25].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Введение многослойной структуры у ледяных мантий космических пылинок позволяет добиться близких к наблюдаемым концентраций основных углеродсодержащих компонентов ле-

	ичия в потенцие	ывных индикат	рах венышек дл	и предфазных м	оделен е разным	L_b/L_b	
Kontonent	Перед вс	спышкой	500 лет	спустя	Отношени	е после/до	
KOMHOHEHT	$E_b/E_D = 0.5$	$E_b/E_D = 0.3$	$E_b/E_D = 0.5$	$E_b/E_D = 0.3$	$E_b/E_D = 0.5$	$E_b/E_D = 0.3$	
Внутренняя область							
gC ₉ H ₂	4.7(-11)	1.9(-11)	1.5(-10)	2.9(-10)	3.2	15.6	
C_2H_2	2.1(-11)	1.5(-11)	5.6(-11)	1.5(-10)	2.7	10.2	
gC_9	2.8(-12)	2.3(-12)	1.4(-13)	2.8(-13)	0.05	0.1	
gCH ₃ C ₄ H	2.7(-12)	7.2(-13)	1.3(-11)	2.8(-11)	4.8	38.6	
		Про	межуточная обл	асть	ļ		
gH_2CO	1.9(-09)	5.0(-11)	6.1(-11)	4.5(-11)	0.03	0.89	
gH ₂ SiO	4.2(-13)	3.8(-13)	1.7(-12)	5.0(-12)	3.9	13.1	
	•	I	Внешняя област	Ь	•	•	
gH_2O_2	6.6(-08)	3.3(-07)	9.9(-07)	1.6(-06)	14.9	5.0	
gOCN	1.5(-08)	2.7(-08)	9.9(-09)	1.9(-10)	0.64	7.2(-3)	
gC_2N	1.2(-08)	1.2(-08)	4.7(-10)	3.0(-09)	0.04	0.25	
gNH_2CHO	2.8(-09)	1.0(-07)	5.7(-07)	7.1(-07)	206.6	7.1	
gC_2O	1.8(-09)	2.8(-09)	2.6(-08)	1.7(-08)	14.5	6.2	
gC_5	4.7(-10)	4.2(-10)	5.7(-09)	2.7(-09)	12.0	6.4	
gSO_2	2.1(-10)	1.4(-09)	3.9(-09)	7.9(-09)	18.2	5.6	
gHS	1.1(-10)	7.6(-11)	6.2(-10)	8.7(-10)	5.7	11.4	
H_3^+	8.2(-12)	3.1(-12)	5.1(-13)	4.5(-13)	0.06	0.14	
N_2H^+	6.9(-13)	1.0(-11)	1.5(-11)	1.5(-11)	22.5	1.4	
NH	1.1(-13)	2.1(-12)	3.6(-12)	3.7(-12)	32.8	1.8	
N	6.7(-14)	1.3(-12)	2.9(-12)	2.9(-12)	42.6	2.2	
NH_2	5.3(-14)	9.5(-13)	2.2(-12)	2.3(-12)	42.1	2.4	
		Экстрем	ально внешняя	область	•		
gOH	1.0(-05)	1.1(-05)	4.2(-06)	3.2(-07)	0.42	0.03	
gNO	2.0(-06	1.4(-06)	7.9(-07)	4.7(-09)	0.39	3.4(-3)	
gCH ₂ OH	5.2(-07)	6.4(-10)	4.2(-07)	2.7(-07)	0.82	420.7	
N_2	5.5(-08)	1.2(-09)	4.7(-07)	1.6(-07)	8.6	124.7	
gCH ₃	3.6(-08)	1.0(-06)	5.4(-09)	1.1(-09)	0.15	1.1(-3)	
gCH_2NH_2	3.5(-08)	4.1(-10)	3.2(-08)	4.1(-08)	0.91	100.0	
gCH ₃ NH	2.9(-08)	4.1(-10)	2.8(-08)	3.3(-08)	0.95	78.8	
gHCO	2.4(-08)	8.6(-09)	3.2(-09)	2.6(-11)	0.13	3.0(-3)	
gC ₂ N	1.7(-08)	1.0(-08)	1.7(-09)	2.6(-11)	0.10	2.5(-3)	
gOCN	1.2(-08)	6.2(-09)	4.4(-09)	6.3(-11)	0.36	0.01	
gCH ₃ OCH ₃	1.0(-08)	2.0(-12)	1.1(-08)	1.2(-08)	1.03	6238.2	
gC ₂ H ₅ OH	1.0(-08)	6.4(-13)	1.1(-08)	1.2(-08)	1.1	1.9(4)	
gCH ₃ CHO	1.3(-09)	5.1(-12)	1.3(-09)	3.6(-09)	1.0	716.6	
gCH ₃ C ₃ N	4.4(-10)	1.8(-11)	4.5(-10)	2.6(-09)	1.0	147.3	
gC_3O	2.1(-10)	1.1(-09)	1.6(-08)	8.1(-09)	78.2	7.1	
gCHNH	2.0(-10)	9.4(-14)	1.6(-10)	9.4(-10)	0.81	9964.8	
H_2S	1.8(-10)	1.9(-10)	9.7(-12)	2.6(-11)	0.05	0.14	
gSO_2	1.0(-10)	7.5(-10)	5.9(-09)	4.6(-09)	59.1	6.2	
gCH ₂	9.5(-11)	1.4(-06)	4.5(-10)	1.5(-09)	4.7	1.1(-3)	
Ν	8.1(-11)	1.2(-11)	6.1(-10)	5.6(-10)	7.5	48.2	

Таблица 7. Различия в потенциальных индикаторах вспышек для трехфазных моделей с разными E_b/E_D

Vourouaut	Перед вс	пышкой	500 лет	спустя	Отношение после/до	
KOMHOHCHT	$E_b/E_D = 0.5$	$E_b/E_D = 0.3$	$E_b/E_D = 0.5$	$E_b/E_D = 0.3$	$E_b/E_D = 0.5$	$E_b/E_D = 0.3$
gS	3.6(-11)	1.8(-08)	3.2(-11)	4.1(-11)	0.88	2.3(-3)
NH ₃	2.8(-11)	2.8(-12)	9.0(-11)	6.4(-11)	3.2	22.8
CH_3OH	2.0(-11)	4.2(-12)	1.1(-12)	5.4(-12)	0.05	1.3
CH_2OH	1.9(-11)	4.2(-12)	3.1(-13)	2.1(-12)	0.02	0.51
NH ₂	1.3(-11)	1.3(-12)	3.6(-11)	2.5(-11)	2.77	19.4
gO_2	9.1(-12)	2.2(-07)	5.5(-08)	6.1(-07)	6026.4	2.8
gC ₂ O	6.0(-12)	2.0(-11)	3.7(-11)	1.8(-13)	6.1	9.2(-3)
gH ₂ CN	4.7(-12)	6.2(-09)	1.4(-11)	1.0(-13)	2.9	1.6(-5)
gCH ₃ C ₅ N	2.0(-12)	1.4(-13)	2.1(-12)	8.7(-12)	1.0	63.6
gC_2S	1.8(-12)	1.4(-12)	1.8(-11)	6.1(-12)	10.3	4.4
\mathbf{NH}_{4}^{+}	4.2(-13)	2.2(-14)	1.1(-12)	4.2(-13)	2.7	19.1
HNO^+	3.2(-13)	8.7(-13)	1.8(-11)	1.6(-12)	57.2	1.9
gHCS	6.8(-14)	5.2(-14)	3.6(-12)	1.9(-13)	52.7	3.6
C_2H_6	6.3(-14)	5.0(-14)	7.4(-14)	7.5(-12)	1.2	150.2
gCH	9.2(-15)	1.8(-07)	4.1(-12)	4.2(-08)	449.0	0.23
gH ₂	5.5(-15)	3.8(-08)	8.5(-16)	3.8(-12)	0.15	1.0(-4)
gN	1.9(-15)	4.6(-07)	2.5(-16)	3.1(-11)	0.13	6.7(-5)

Таблица 7. Окончание

дяных мантий (gCO, gCO₂, gCH₃OH) на стадии моделирования молекулярного облака. Варьирование параметров двухфазной модели не позволило достичь этого для всех упомянутых компонентов одновременно.

2. Во внутренней области протопланетного диска рассматриваемые двух- и трехфазная модели почти не демонстрируют различий в содержаниях химических соединений на всем времени моделирования. В более удаленных от звезды областях до начала вспышки модели в основном демонстрируют различия в содержаниях компонентов твердой фазы (важное исключение — газофазный метанол, которого в конце стадии молекулярного облака в трехфазной модели почти на два порядка больше, чем в двухфазной).

3. Трехфазная модель предлагает большее (по сравнению с двухфазной) количество потенциальных индикаторов произошедших несколько сотен лет назад вспышек светимости молодой звезды – соединений, которые длительное время после вспышки сохраняют нетипичные для спокойной довспышечной стадии содержания в протопланетном диске. При этом почти все рассмотренные в работе соединения, которые демонстрируют разницу до- и послевспышечных содержаний более порядка величины в какой-либо области диска в двухфазной модели, демонстрируют разницу содержаний более порядка величины в этой же области диска и в трехфазной модели. Единственное исключение — адсорбированный формамид (gNH₂CHO) в промежуточной области диска.

4. Трехфазная модель подтверждает упомянутый в [8] формальдегид H_2CO как потенциальный индикатор недавно произошедших вспышек светимости, однако здесь, в отличие от [7], он является индикатором только до времени порядка 200 лет после окончания вспышки.

5. Важные индикаторы вспышечной активности CO, CO₂, CS, CN, HCN ведут себя схожим образом и в нашей трехфазной модели, и в двухфазной модели [7]. В обеих этих моделях потенциальные индикаторы в основном сосредоточены в экстремально внешней области протопланетного диска. Наша двухфазная модель, аналогичная модели [7], но имеющая отличные от нее параметры (температура 16 К на стадии молекулярного облака и во время спокойной фазы в экстремально внешней области диска, время моделирования молекулярного облака 200 тыс. лет), предлагает меньше индикаторов, чем модель [7] или наша трехфазная модель.

Приложение

В табл. 8—10 представлены адсорбированные компоненты, содержания которых хотя бы в один из указанных моментов времени (непосредственно перед вспышкой или через 500 лет после окон-

Таблица 8. Содержание адсорбированных компонентов в промежуточной области диска

V	Перед вс	спышкой	500 лет	спустя	Отношени	е после/до
компонент	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph
gC ₉	3.0(-24)	3.1(-12)	2.9(-24)	6.5(-14)	0.96	0.02
gC_2H_2	3.7(-12)	6.3(-11)	3.9(-12)	5.5(-11)	1.06	0.87
gC_2H_4	2.0(-12)	4.4(-07)	2.1(-12)	4.3(-07)	1.02	0.98
gC_2H_5	4.0(-17)	2.0(-10)	4.1(-17)	1.2(-11)	1.02	0.06
gCH ₂ CO	3.7(-12)	2.1(-13)	3.0(-12)	2.2(-12)	0.80	10.20
gC_3H	2.7(-20)	1.7(-11)	2.7(-20)	1.2(-11)	0.98	0.67
gC_3H_2	3.0(-12)	9.5(-07)	2.7(-12)	6.4(-07)	0.89	0.67
gC ₃ H ₃	4.5(-17)	3.0(-07)	3.7(-17)	1.2(-08)	0.83	0.04
gC_3H_3N	3.4(-17)	3.9(-10)	1.8(-16)	3.9(-10)	5.37	1.01
gC_4	8.3(-24)	4.3(-13)	8.3(-24)	1.3(-12)	1.00	3.02
gC_4H	4.6(-21)	4.7(-10)	5.1(-21)	1.2(-10)	1.11	0.26
gC_4H_2	1.1(-12)	5.3(-09)	1.5(-12)	2.9(-08)	1.38	5.59
gC ₄ H ₄	7.6(-08)	9.4(-12)	1.0(-07)	2.2(-08)	1.37	2366
gC ₅	2.8(-24)	3.4(-10)	2.7(-24)	7.8(-13)	0.95	0.002
gC ₅ H	8.4(-23)	1.1(-09)	9.7(-23)	2.0(-10)	1.15	0.18
gC_5H_2	2.1(-13)	1.0(-08)	4.0(-13)	7.3(-08)	1.93	7.02
gC_5H_4	1.4(-08)	7.4(-12)	2.8(-08)	6.1(-11)	1.91	8.33
gC_5N	1.4(-23)	1.0(-12)	1.5(-23)	2.0(-15)	1.06	0.002
gC ₆	6.3(-26)	9.5(-11)	6.8(-26)	1.5(-12)	1.07	0.02
gC_6H	2.9(-24)	3.1(-10)	5.4(-23)	3.9(-10)	18.48	1.27
gC_6H_2	5.2(-14)	2.9(-9)	4.5(-13)	1.4(-07)	8.69	50.47
gC_6H_4	3.6(-09)	2.0(-12)	3.1(-08)	5.7(-10)	8.59	282.22
gC ₇	3.8(-27)	2.3(-11)	3.5(-27)	7.9(-14)	0.94	0.003
gC ₇ H	7.7(-26)	7.5(-11)	1.6(-25)	2.0(-11)	2.02	0.27
gC_7H_2	1.3(-14)	7.0(-10)	3.9(-14)	7.4(-09)	2.93	10.59
gC_7H_4	9.1(-10)	4.8(-13)	2.6(-09)	6.7(-12)	2.90	14.00
gC ₈	6.9(-29)	8.1(-12)	8.8(-29)	6.6(-14)	1.27	0.01
gC_8H	1.5(-26)	2.6(-11)	6.5(-26)	1.7(-11)	4.47	0.64
gC_8H_2	4.3(-15)	2.4(-10)	2.1(-14)	6.1(-09)	4.88	25.61
gC_8H_4	2.9(-10)	1.6(-13)	1.4(-09)	5.5(-12)	4.83	34.16
gC ₉ H	3.0(-24)	1.0(-11)	2.9(-24)	1.6(-11)	0.97	1.60
gC_9H_2	1.9(-15)	9.2(-11)	1.9(-14)	5.9(-09)	10.10	63.73

Таблица 8. О	кончание
--------------	----------

V	Перед вс	спышкой	500 лет	спустя	Отношени	е после/до
компонент	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph
gC_9H_4	1.2(-10)	6.2(-14)	1.2(-09)	4.2(-12)	10.00	67.26
gCH ₂ CN	2.1(-21)	2.3(-11)	1.1(-20)	9.1(-13)	5.10	0.04
gCH ₂ NH	8.3(-22)	5.5(-12)	1.4(-21)	4.0(-12)	1.72	0.73
gCH ₂ NH ₂	4.2(-22)	5.5(-12)	7.1(-22)	7.5(-14)	1.72	0.01
gNH ₂	8.2(-17)	9.1(-07)	8.3(-17)	5.3(-08)	1.01	0.06
gOH	1.6(-16)	1.9(-11)	1.6(-16)	2.1(-11)	1.00	1.11
gCH ₃ C ₄ H	3.2(-10)	1.9(-12)	5.8(-10)	7.6(-09)	1.82	3973.33
gCH ₃ C ₆ H	4.0(-14)	1.1(-14)	2.1(-11)	1.7(-12)	525.18	161.78
gH ₂ CO	1.2(-10)	1.9(-09)	1.1(-10)	6.1(-11)	0.90	0.03
gCH ₃ OH	2.9(-08)	7.9(-11)	2.9(-08)	5.9(-10)	0.99	7.55
gFe	4.7(-21)	1.8(-10)	4.8(-21)	5.2(-12)	1.01	0.03
gH_2O_2	6.3(-14)	1.6(-07)	6.1(-14)	4.4(-09)	0.97	0.03
gHC ₃ N	6.5(-16)	8.6(-09)	3.4(-15)	8.6(-09)	5.31	1.00
gHC ₅ N	1.8(-17)	1.5(-10)	2.0(-17)	1.5(-10)	1.12	1.01
gHC ₇ N	1.4(-18)	1.2(-11)	1.5(-18)	1.3(-11)	1.03	1.04
gHC ₉ N	4.8(-26)	1.5(-12)	5.0(-25)	1.6(-12)	10.29	1.02
gMgH	3.3(-20)	1.1(-9)	3.3(-20)	3.7(-11)	1.01	0.03
gMg	3.5(-31)	3.6(-11)	3.3(-31)	1.5(-13)	0.94	0.004
gN_2H_2	5.9(-21)	3.6(-08)	6.1(-21)	3.6(-08)	1.05	0.98
gNa	1.6(-21)	6.2(-11)	1.6(-21)	1.6(-12)	1.01	0.03
gNH ₂ CHO	6.4(-11)	6.0(-09)	8.3(-10)	7.8(-09)	12.90	1.31
gNH ₂ OH	1.3(-14)	2.0(-06)	1.3(-14)	2.0(-06)	1.00	0.99
gO_2H	1.1(-20)	3.5(-12)	1.0(-20)	5.3(-13)	0.97	0.15
gSiH ₂	1.5(-20)	1.0(-10)	1.6(-20)	1.3(-11)	1.01	0.13
gSiH ₃	1.5(-20)	8.5(-11)	1.6(-20)	7.7(-13)	1.01	0.01
gHNO	5.2(-13)	6.6(-09)	6.4(-13)	5.2(-13)	1.22	7.9(-5)

чания вспышки) хотя бы в одной из моделей превышают 10^{-12} и при этом демонстрируют различие в двух- и трехфазной моделях более чем на порядок величины. Жирным шрифтом выделены компоненты, содержания которых в трехфазной модели достигают значений > 10^{-12} , а также до и после вспышки отличаются более чем на порядок, не демонстрируя подобного различия в двухфазной модели. Обычным курсивом выделено единственное соединение, содержание которого в двухфазной модели до и после вспышки отличается более чем на порядок, но не демонстрирует подобного различия в трехфазной модели.

В табл. 11 приведены общие потенциальные индикаторы вспышек светимости для двух- и трехфазной моделей. Во внешней области общие индикаторы отсутствуют.

Перед вспышкой 500 лет спустя Отношение после/до Компонент 2 Ph 3 Ph 2 Ph 3 Ph 2 Ph 3 Ph 1.5(-20)4.9(-12) 1.5(-20) 1.1(-11)1.00 2.17 gCo gC₂ 2.3(-16)4.1(-08)9.1(-16)1.6(-09)4.01 0.04 2.3(-16)3.4(-08)9.2(-16)7.4(-11)3.92 0.002 gC₂H 7.8(-10)8.1(-17)2.2(-09)2.81 2.89 gC_2H_3 2.9(-17)3.6(-08) 1.9(-08) gC_2H_4 4.5(-11)1.1(-10)2.50 0.53 1.7(-15)7.8(-09) 2.9(-15)4.2(-09)0.54 gC_2H_5 1.72 1.1(-16)1.2(-08)1.3(-16)4.7(-10)1.17 0.04 gC_2N 1.8(-14)2.3(-07)1.9(-14)7.5(-10)**gCN** 1.00 0.003 1.8(-09)4.5(-23)2.6(-08)3.91 14.48 gC₂O 1.2(-23)8.9(-07)1.3(-05)1.9(-06)1.00 2.12 gCO 1.3(-05)1.0(-13)4.0(-06)1.0(-13)7.0(-09)0.99 0.002 gO gC₂S 7.0(-23)1.5(-13)2.6(-22)2.2(-09)3.80 1.4(4) 6.3(-09) 9.9(-11) 1.0(-10)4.6(-09)gCS 1.04 0.73 gC₃ 2.2(-19)1.1(-07)6.3(-19)1.5(-10)2.79 0.001 gC₃H 8.4(-18)1.5(-07)3.3(-18)5.5(-10)0.39 0.004 2.1(-07)3.4(-07)0.26 gC_3H_2 4.2(-10)1.1(-10)1.61 1.1(-14)9.5(-08)1.1(-14)5.1(-08)0.98 0.54 gC₃H₃ 2.3(-09)2.3(-09)gC₃H₃N 7.1(-13)3.3(-12)4.58 1.01 2.0(-09)7.7(-12)1.1(-17)1.1(-17)1.01 0.004 gC₃N 9.8(-27)3.6(-26)1.7(-08)3.64 32.92 gC₃O 5.2(-10)1.2(-18)5.0(-09) 1.4(-18)5.8(-12)1.16 0.001 gC₄ 6.2(-18)8.0(-09)7.2(-18)1.8(-10)1.16 0.02 gC₄H 1.1(-09)2.8(-08)1.3(-09)5.3(-08)1.16 1.85 gC_4H_2 1.5(-14)1.6(-08)gC₄H₃ 9.4(-16)1.1(-15)1.16 1.1(6) \mathbf{gC}_5 7.2(-22)4.7(-10)8.3(-22)5.7(-09)1.16 12.04 7.9(-19)1.3(-09)8.1(-19)3.6(-09)1.03 2.80 gC₅H 2.4(-10)8.9(-09)2.4(-10)2.7(-08)1.02 3.04 gC₅H₂ gC_5N 8.4(-19)1.6(-11)8.4(-19)1.8(-11)1.00 1.12 1.8(-24)1.3(-10)1.9(-24)3.5(-10)1.07 2.65 gC_6 gC_6H 2.2(-19)3.7(-10)2.2(-19)8.4(-10)1.03 2.31 gC_6H_2 6.4(-11)2.4(-09)6.5(-11)5.8(-09)1.03 2.43 2.1(-12)1.5(-12)2.1(-12)2.4(-09)1.00 1591.06 gC₆H₆ 7.7(-25)7.4(-25)3.2(-11)2.5(-10)1.04 7.89 gC_7 gC₇H 5.4(-20)8.9(-11)5.6(-20)1.1(-10)1.03 1.26 gC_7H_2 6.1(-10)1.7(-11)6.8(-10)1.6(-11)1.02 1.12 1.4(-12)1.0(-19)1.00 1.0(-19)1.4(-12)1.00 gC_7N 2.2(-25)1.2(-11)2.2(-25)1.4(-11)1.04 1.18 gC_8 1.8(-20)3.2(-11)1.9(-20)4.1(-11)1.03 1.30 gC₈H gC_8H_2 5.3(-12)2.0(-10)5.4(-12)2.3(-10)1.02 1.19 gC₈H₄ 2.8(-10)2.8(-11)2.8(-10)2.8(-11)1.00 1.00 2.2(-20)1.2(-11)2.2(-20)1.3(-11)1.01 1.04 gC₉H 7.9(-11) 8.1(-11)1.03 gC_9H_2 2.2(-12)2.2(-12)1.02 1.2(-10)1.1(-11)1.00 1.00 gC₉H₄ 1.2(-10)1.1(-11)gCH₂CN 2.0(-16)6.9(-09) 2.2(-16)5.2(-09)1.10 0.76 1.3(-08)9.5(-09)gCH₂NH 4.3(-18)4.4(-18)1.02 0.74 2.2(-18)4.6(-09)2.2(-18)5.0(-09)1.02 1.08 gCH₂NH₂ 1.8(-06) gNH₂ 1.1(-13)1.1(-13)3.0(-09)1.01 0.002 gCH₂OH 5.4(-15)7.1(-08)5.3(-15)5.8(-08)0.82 1.00

Таблица 9. Содержание адсорбированных компонентов во внешней области диска

Таблица 9. Окончание

Vourouaut	Перед вс	пышкой	500 лет	спустя	Отношение после/до	
KOMHOHEHT	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph
gOH	1.0(-16)	6.7(-06)	1.0(-16)	1.3(-08)	1.00	0.002
gCH ₃	1.7(-19)	6.6(-13)	1.8(-19)	1.6(-12)	1.05	2.46
gCH ₃ C ₄ H	2.9(-13)	2.8(-13)	3.0(-13)	7.5(-12)	1.01	26.31
gCH ₃ C ₅ N	9.0(-14)	5.4(-13)	9.1(-14)	1.1(-12)	1.02	2.05
gCH ₃ CHO	5.8(-12)	2.3(-10)	5.8(-12)	2.4(-10)	1.00	1.05
gHCO	2.8(-14)	8.8(-09)	2.8(-14)	5.5(-10)	1.00	0.06
gCH ₃ NH	2.2(-18)	1.4(-08)	2.2(-18)	9.6(-09)	1.02	0.71
gCH ₃ OCH ₃	1.0(-14)	7.3(-10)	1.1(-14)	1.2(-09)	1.11	1.62
gH ₂ CO	2.6(-06)	3.3(-05)	2.6(-06)	2.9(-05)	1.00	0.89
gCH ₃ OH	2.0(-07)	4.0(-06)	2.0(-07)	4.0(-06)	1.00	1.00
gCH ₅ N	4.4(-09)	1.2(-07)	4.4(-09)	1.2(-07)	1.01	1.06
gCHNH	6.8(-25)	2.3(-10)	2.8(-24)	1.9(-10)	4.12	0.84
gNH	5.7(-14)	9.2(-07)	5.8(-14)	1.6(-09)	1.01	0.002
gFe	5.8(-18)	2.7(-10)	5.9(-18)	1.5(-10)	1.00	0.56
gH_2C_3N	1.2(-17)	1.0(-12)	7.4(-17)	8.9(-13)	6.29	0.85
gH ₂ O ₂	3.6(-11)	6.6(-08)	3.6(-11)	9.9(-07)	0.99	14.88
gHS	3.0(-13)	1.1(-10)	3.0(-13)	6.2(-10)	1.00	5.67
gHC ₂ O	1.2(-23)	4.4(-10)	4.5(-23)	4.8(-09)	3.91	10.84
gHC ₃ N	1.4(-11)	8.9(-08)	8.8(-11)	1.1(-07)	6.29	1.28
gHC ₃ O	1.1(-26)	4.2(-10)	3.6(-26)	1.6(-09)	3.34	3.75
gHC ₅ N	1.1(-12)	1.2(-09)	1.1(-12)	1.5(-09)	1.04	1.23
gHC ₇ N	1.3(-13)	1.0(-10)	1.3(-13)	1.1(-10)	1.03	1.04
gHC ₉ N	1.3(-15)	1.4(-11)	1.7(-15)	1.4(-11)	1.27	1.00
gHCCN	1.1(-16)	3.9(-09)	1.3(-16)	2.3(-09)	1.17	0.60
gHCOOH	1.6(-10)	6.1(-10)	1.8(-10)	1.9(-06)	1.19	3077.37
gSi	4.0(-18)	1.9(-10)	4.0(-18)	3.5(-13)	1.00	0.002
gPO	8.5(-13)	8.3(-13)	8.5(-13)	3.5(-11)	1.00	42.64
gMgH	4.1(-17)	1.6(-09)	4.1(-17)	1.5(-09)	1.00	0.97
gMg	4.1(-26)	6.4(-11)	4.1(-26)	6.0(-11)	1.01	0.93
gN ₂	7.7(-09)	5.7(-11)	7.7(-09)	3.1(-08)	1.00	541.97
gN_2H_2	7.9(-11)	5.5(-08)	9.1(-11)	1.7(-07)	1.15	3.04
gNO	1.1(-12)	6.9(-07)	1.1(-12)	5.8(-07)	1.00	0.85
gNa	1.9(-18)	9.2(-11)	2.0(-18)	8.9(-11)	1.00	0.97
gNH ₂ OH	4.3(-28)	1.8(-26)	1.1(-15)	9.9(-08)	2.5(12)	5.5(18)
gNH ₂ CHO	9.4(-09)	2.8(-09)	1.5(-08)	5.7(-07)	1.57	206.59
gNO_2	1.3(-18)	1.3(-18)	8.1(-18)	6.1(-10)	6.12	4.8(8)
gINS	2.9(-13)	2.0(-09)	2.9(-13)	1.4(-09)	1.00	0.71
gO_2	3.3(-10)	3.4(-11)	2.5(-15)	1.3(-07)	7.50	5906.20
gO ₂ п «О	4.7(-19)	3.2(-08)	4.7(-19)	2.0(-07)	1.00	0.30
gO_3	1.0(-12)	1.0(-00)	1.3(-11)	1.9(-00)	1.00	1.18
gOCN	3.2(-10)	1.3(-08)	3.2(-10)	9.9(-09)	1.00	0.04
gOCS	3.0(-13)	0.7(-10) 2.9(-13)	3.7(-13)	3.3(-10)	1.01	14.44
552 9SiH	2.9(-13) 4.0(-18)	2.9(-13) 1 2(-10)	4.0(-13)	1.2(-12)	1.03	0.94
gSiH.	1.0(-10)	4.2(-10)	1.0(-10)	2.2(-10)	1.00	0.24
gSiH ₂	1.5(-17) 1 5(-17)	7.4(-10) 2 1(-10)	1.5(-17) 1 5(-17)	2.7(-10) 2 4(-10)	1.00	1 18
σSO	6.7(-16)	2.1(-10) 2.3(-08)	6.7(-16)	1.8(-0.8)	0.99	0.80
gSO ₂	3.4(-23)	2.3(-00) 2.1(-10)	2.1(-22)	3.9(-09)	6.22	18 18
gC ₂ H ₅ OH	1.5(-13)	7.4(-10)	1.5(-13)	1.2(-09)	1.01	1.62

Компонент	Перед вспышкой		500 лет спустя		Отношение после/до	
	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph
gC ₉	2.3(-20)	7.1(-12)	3.0(-20)	5.7(-12)	1.33	0.80
gC ₂	4.0(-16)	5.9(-08)	2.2(-14)	3.2(-08)	55.69	0.54
gC ₂ H	4.2(-16)	4.4(-08)	2.4(-14)	2.0(-09)	56.36	0.05
gC_2H_2	2.2(-11)	4.6(-11)	7.9(-10)	1.2(-08)	36.42	259.62
gC_2H_3	3.9(-17)	1.4(-09)	9.9(-16)	1.3(-09)	25.21	0.88
gC_2H_4	6.9(-11)	3.7(-08)	2.6(-10)	4.0(-08)	3.78	1.07
gC_2H_5	2.6(-15)	1.5(-08)	6.6(-15)	1.2(-08)	2.52	0.80
gC_2N	1.6(-16)	1.7(-08)	1.4(-15)	1.7(-09)	9.03	0.10
gCN	2.7(-14)	2.8(-07)	1.7(-13)	4.3(-09)	6.34	0.02
gC ₂ O	5.3(-22)	6.0(-12)	4.4(-18)	3.7(-11)	8204.29	6.09
gCO	2.2(-05)	6.6(-06)	2.1(-05)	2.0(-06)	0.96	0.30
gO	1.9(-13)	5.2(-06)	3.1(-13)	7.3(-09)	1.67	0.001
gC ₂ S	2.8(-19)	1.8(-12)	5.3(-17)	1.8(-11)	187.74	10.33
gCS	1.4(-10)	7.5(-09)	1.4(-10)	3.4(-09)	1.05	0.45
gC ₃	1.2(-18)	1.3(-07)	1.2(-16)	2.8(-10)	99.45	0.002
gC ₃ H	1.9(-17)	1.4(-07)	2.5(-16)	1.7(-07)	12.66	1.26
gC_3H_2	6.0(-10)	1.7(-07)	6.3(-10)	2.4(-07)	1.05	1.43
gC ₃ H ₃	1.5(-14)	1.0(-07)	2.2(-14)	8.0(-08)	1.41	0.80
gC ₃ H ₃ N	1.0(-12)	2.1(-09)	7.4(-12)	2.4(-09)	7.15	1.10
gC ₃ N	1.7(-17)	5.5(-09)	1.1(-16)	4.4(-09)	6.59	0.80
gC ₃ O	1.3(-24)	2.1(-10)	6.3(-18)	1.6(-08)	4.8(6)	78.19
gC ₄	2.7(-18)	7.1(-09)	7.1(-18)	5.7(-09)	2.64	0.80
gC ₄ H	1.4(-17)	9.3(-09)	3.0(-17)	8.6(-09)	2.22	0.92
gC_4H_2	1.6(-09)	2.8(-08)	1.6(-09)	3.1(-08)	1.02	1.10
gC ₄ H ₃	1.4(-15)	1.1(-14)	1.4(-15)	4.3(-11)	1.02	3849.54
gC_5	4.3(-20)	7.2(-10)	2.8(-19)	5.8(-10)	6.57	0.80
gC ₅ H	1.7(-18)	1.5(-09)	3.0(-18)	1.3(-09)	1.72	0.89
gC_5H_2	3.4(-10)	8.5(-09)	3.5(-10)	8.9(-09)	1.02	1.04
gC ₅ N	1.2(-18)	3.2(-11)	1.8(-18)	2.6(-11)	1.50	0.81
gC_6	1.2(-20)	1.9(-10)	3.2(-20)	1.6(-10)	2.72	0.80
gC ₆ H	4.6(-19)	4.3(-10)	7.1(-19)	3.7(-10)	1.53	0.88
gC_6H_2	9.0(-11)	2.3(-09)	9.2(-11)	2.4(-09)	1.02	1.04
gC_7	4.1(-21)	4.8(-11)	2.4(-21)	3.8(-11)	0.60	0.80
gC ₇ H	1.2(-19)	1.0(-10)	1.6(-19)	9.1(-11)	1.38	0.88
gC_7H_2	2.3(-11)	5.8(-10)	2.3(-11)	6.0(-10)	1.02	1.04
gC_7N	1.4(-19)	2.3(-12)	2.0(-19)	1.9(-12)	1.43	0.81
gC_8	1.5(-21)	1.7(-11)	4.8(-22)	1.4(-11)	0.33	0.80
gC ₈ H	3.9(-20)	3.7(-11)	5.4(-20)	3.2(-11)	1.38	0.88
gC_8H_2	7.5(-12)	1.9(-10)	7.6(-12)	1.9(-10)	1.02	1.04
gC9H	3.8(-20)	1.4(-11)	5.0(-20)	1.2(-11)	1.33	0.89
gC_9H_2	3.1(-12)	7.4(-11)	3.1(-12)	7.7(-11)	1.02	1.04
gC_9H_4	1.1(-10)	1.1(-11)	1.1(-10)	1.1(-11)	1.00	1.00
gCH	2.2(-21)	9.2(-15)	3.9(-20)	4.1(-12)	17.80	449.05
gCH ₂ CN	2.9(-16)	1.7(-08)	2.2(-15)	1.8(-08)	7.50	1.06
gCH ₂	2.4(-18)	9.5(-11)	5.2(-18)	4.5(-10)	2.16	4.70
gCH ₂ NH	1.0(-17)	4.5(-08)	1.1(-16)	3.8(-08)	11.41	0.83
gCH_2NH_2	5.0(-18)	3.5(-08)	5.7(-17)	3.2(-08)	11.40	0.91
gNH ₂	7.0(-14)	1.4(-06)	8.7(-14)	3.2(-07)	1.24	0.23
gCH ₂ OH	5.4(-15)	5.2(-07)	5.3(-15)	4.2(-07)	0.98	0.82

Таблица 10. Содержание адсорбированных компонентов в экстремально внешней области диска

Таблица 10. Окончание

Компонент	Перед вспышкой		500 лет спустя		Отношение после/до	
	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph
gOH	1.5(-13)	1.0(-05)	1.9(-13)	4.2(-06)	1.31	0.42
gCH ₃	1.5(-16)	3.6(-08)	5.3(-16)	5.4(-09)	3.43	0.15
gCH ₃ C ₃ N	1.2(-11)	4.4(-10)	1.2(-11)	4.5(-10)	1.00	1.02
gCH ₃ C ₅ N	9.5(-14)	2.0(-12)	9.5(-14)	2.1(-12)	1.00	1.02
gCH ₃ CHO	4.9(-12)	1.3(-09)	4.9(-12)	1.3(-09)	1.00	1.04
gHCO	4.7(-14)	2.4(-08)	4.6(-14)	3.2(-09)	0.98	0.13
gCH ₃ NH	5.0(-18)	2.9(-08)	5.7(-17)	2.8(-08)	11.40	0.95
gCH ₃ OCH ₃	1.9(-14)	1.0(-08)	1.9(-14)	1.1(-08)	1.00	1.03
gH ₂ CO	2.6(-06)	2.7(-05)	2.6(-06)	2.6(-05)	1.00	0.97
gCH ₃ OH	1.4(-07)	8.1(-06)	1.4(-07)	8.2(-06)	1.00	1.01
gCH ₅ N	5.6(-09)	1.5(-07)	5.6(-09)	1.7(-07)	1.00	1.11
gCHNH	9.0(-25)	2.0(-10)	2.6(-23)	1.6(-10)	29.47	0.81
gNH	3.8(-14)	8.2(-07)	4.4(-14)	1.5(-09)	1.18	0.002
gS	1.7(-18)	3.6(-11)	2.9(-18)	3.2(-11)	1.73	0.88
gFe	8.3(-18)	4.0(-10)	1.2(-17)	3.2(-10)	1.41	0.80
gH_2C_3N	1.7(-17)	8.6(-12)	4.9(-17)	6.9(-12)	2.87	0.81
gH ₂ CN	5.3(-19)	4.7(-12)	8.9(-17)	1.4(-11)	168.76	2.89
gH ₂ O ₂	8.5(-11)	6.5(-08)	8.4(-11)	2.5(-07)	0.99	3.81
gHS	3.1(-13)	6.8(-09)	3.1(-13)	6.4(-10)	1.00	0.09
gH_4C_3N	1.7(-17)	7.9(-12)	1.2(-16)	6.4(-12)	7.12	0.81
gHC ₂ O	5.3(-22)	7.1(-12)	4.4(-18)	1.1(-10)	8343.38	15.62
gHC ₃ N	2.0(-11)	1.2(-07)	5.8(-11)	1.2(-07)	2.88	1.01
gHC ₃ O	2.8(-22)	1.5(-09)	7.2(-18)	2.5(-09)	2.5(4)	1.67
gHC ₅ N	1.5(-12)	1.2(-09)	1.6(-12)	1.3(-09)	1.05	1.01
gHC ₇ N	1.8(-13)	1.0(-10)	1.8(-13)	1.0(-10)	1.02	1.00
gHC ₉ N	8.1(-16)	1.4(-11)	9.1(-16)	1.4(-11)	1.12	1.00
gHCCN	1.6(-16)	4.2(-09)	1.4(-15)	1.3(-08)	9.06	3.16
gHCOOH	1.7(-10)	1.7(-10)	4.4(-10)	6.5(-07)	2.59	3817.32
gSi	4.9(-18)	2.2(-10)	6.9(-18)	1.4(-10)	1.42	0.64
gMgH	5.8(-17)	1.9(-09)	8.2(-17)	1.6(-09)	1.41	0.82
gMg	3.0(-23)	2.2(-10)	1.8(-23)	1.8(-10)	0.60	0.80
gN ₂ H ₂	1.9(-11)	5.7(-08)	7.1(-11)	5.9(-08)	3.71	1.02
gNO	1.9(-12)	2.0(-06)	2.4(-12)	7.9(-07)	1.24	0.39
gNa	2.8(-18)	1.5(-10)	3.9(-18)	1.2(-10)	1.41	0.80
gNH ₂ CHO	2.9(-09)	1.4(-08)	3.0(-09)	3.4(-08)	1.02	2.36
gNH ₂ OH	2.8(-28)	8.6(-29)	7.9(-20)	8.3(-09)	2.8(8)	9.5(19)
gNS	2.9(-13)	1.6(-09)	2.7(-13)	7.3(-10)	0.95	0.46
gO ₂	1.1(-16)	9.1(-12)	8.8(-15)	5.5(-08)	79.91	6026.36
gO ₂ H	1.1(-18)	3.8(-11)	1.1(-18)	9.5(-07)	0.99	2.5(4)
gO ₃	5.6(-15)	2.5(-07)	9.9(-13)	5.8(-07)	175.88	2.30
gOCN	/./(-16)	1.2(-08)	4.9(-15)	4.4(-09)	6.35	0.36
gOCS	4.3(-15)	6.4(-09)	1.0(-14)	6.9(-09)	2.34	1.08
gS1H	4.9(-18)	1.7(-10)	6.9(-18)	1.9(-10)	1.42	1.08
gS1H ₂	2.3(-17)	0.4(-10)	5.2(-17)	5.5(-10)	1.41	0.8/
g51H ₃	2.3(-1/)	2.3(-10)	3.2(-1/)	3.0(-10)	1.41	1.2/
gSU	2.1(-16)	2.0(-08)	5.0(-15)	1.9(-08)	1/.23	0.96
$g_{5}U_{2}$	3.1(-23)	1.0(-10)	3.0(-20)	3.9(-09)	1081.33	39.11
$g C_2 H_5 O H$	1.7(-13)	1.0(-08)	1.7(-13)	1.1(-08)	1.00	1.03
gnus	4.2(-10)	0.0(-14)	4.4(-10)	3.0(-12)	1.05	32.13

Компонент	Перед вспышкой		500 лет спустя		Отношение после/до		
	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph	
Внутренняя область							
CO_2	1.1(-05)	1.1(-05)	8.7(-07)	8.7(-07)	0.077	0.077	
gHCOOH	4.6(-08)	4.6(-08)	1.7(-10)	1.7(-10)	3.7(-3)	3.8(-3)	
gH_2O_2	9.2(-09)	1.9(-08)	8.1(-10)	8.4(-10)	0.088	0.045	
N ₂ O	4.2(-09)	4.2(-09)	3.6(-10)	3.6(-10)	0.087	0.087	
gCO ₂	7.2(-10)	7.2(-10)	5.5(-11)	5.6(-11)	0.077	0.077	
gH ₂ SiO	9.0(-11)	9.0(-11)	2.3(-12)	2.3(-12)	0.026	0.026	
H_2C_3O	3.7(-11)	3.8(-11)	5.5(-10)	6.9(-10)	14.6	18.3	
gH_2C_3O	5.7(-12)	5.7(-12)	8.3(-11)	1.0(-10)	14.5	18.3	
gC_4H_4	3.0(-12)	3.1(-12)	8.2(-10)	1.3(-09)	275.9	418.4	
gC_2H_6	2.2(-12)	2.2(-12)	2.4(-11)	2.8(-11)	11.1	12.8	
gC_4H_2	2.1(-12)	2.3(-12)	8.8(-10)	1.4(-09)	412.4	635.8	
gC_6H_6	1.4(-13)	1.6(-13)	2.9(-10)	6.4(-10)	2047.2	4064.8	
C_4H_2	6.8(-14)	7.2(-14)	2.8(-11)	4.6(-11)	412.4	635.7	
	I	Про	межуточная обл	асть	I	I	
gC_6H_6	2.6(-13)	3.2(-14)	2.1(-07)	8.7(-08)	8.1(5)	2.7(6)	
gCH ₃ C ₆ H	4.0(-14)	1.1(-14)	2.1(-11)	1.7(-12)	525.2	161.8	
	I	Экстрем	ально внешняя	область	I	1	
CO	2.6(-09)	4.0(-10)	9.3(-07)	8.9(-08)	358.3	224.9	
NO	4.0(-10)	2.2(-10)	4.7(-09)	6.0(-08)	11.7	274.0	
HNO	3.1(-10)	1.6(-10)	3.1(-08)	2.2(-08)	98.3	133.2	
CH_4	6.7(-11)	1.1(-11)	4.0(-08)	8.5(-08)	587.9	7790.1	
gC_2H_2	2.2(-11)	4.6(-11)	7.9(-10)	1.2(-08)	36.4	259.6	
0	7.9(-12)	4.0(-12)	5.1(-10)	7.5(-10)	64.3	187.3	
CH ₃	5.2(-12)	8.0(-12)	3.9(-10)	1.4(-09)	74.3	176.0	
HCN	2.8(-12)	1.2(-13)	4.4(-09)	1.6(-09)	1616.7	1.3(4)	
H_2NO^+	1.7(-12)	1.1(-12)	7.0(-11)	4.7(-11)	40.1	42.9	
CN	1.3(-12)	6.7(-14)	1.6(-09)	8.7(-10)	1234.7	1.3(4)	
HCO^+	1.3(-12)	2.4(-13)	7.5(-11)	1.6(-11)	57.0	68.9	
HNC	8.8(-13)	4.5(-14)	1.8(-09)	1.0(-09)	2047.3	2.2(4)	
CH ₂	6.0(-13)	1.2(-12)	1.0(-10)	2.3(-10)	168.2	191.6	
C_3H_3	2.7(-13)	1.7(-13)	2.8(-12)	3.2(-12)	10.6	18.5	
С	2.3(-13)	5.3(-14)	1.0(-10)	1.3(-11)	456.7	251.3	
OCN	1.9(-13)	4.7(-14)	6.1(-12)	7.2(-10)	32.5	1.5(4)	
CS	1.4(-13)	3.5(-14)	1.9(-12)	8.6(-11)	14.1	2441.2	
C_2H_2	1.4(-13)	1.2(-13)	5.3(-11)	4.9(-11)	369.3	404.5	
H_2CN^+	9.4(-14)	5.0(-15)	5.9(-11)	3.3(-11)	630.9	6691.7	
C ₂ H	8.5(-14)	5.8(-14)	1.9(-11)	1.7(-11)	226.2	287.5	
C_3H_2	7.1(-14)	1.3(-13)	1.2(-12)	1.1(-11)	17.2	90.4	

Таблица 11. Общие потенциальные индикаторы вспышек для двух- и трехфазной моделей. Во внешней области общие индикаторы отсутствуют

Компонент	Перед вспышкой		500 лет спустя		Отношение после/до	
	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph	2 Ph	3 Ph
Cl	6.9(-14)	1.2(-14)	5.8(-11)	5.8(-11)	831.6	4655.0
CH_5^+	6.9(-14)	7.0(-14)	7.2(-12)	2.3(-11)	105.6	324.9
СН	4.7(-14)	8.9(-14)	4.0(-12)	1.1(-11)	86.3	123.7
NO^+	4.6(-14)	2.5(-14)	1.6(-12)	2.9(-12)	34.5	114.0
CH ₃ CN	4.3(-14)	1.3(-14)	3.6(-12)	2.3(-12)	83.2	184.0
CH ₂ CN	4.1(-14)	1.3(-14)	8.9(-12)	7.0(-12)	218.0	550.9
C_2H_4	3.2(-14)	4.2(-14)	1.8(-11)	1.6(-10)	558.3	3737.9
C_2H_3	1.4(-14)	3.2(-14)	2.8(-12)	1.1(-11)	200.1	340.0
H ₂ CN	9.0(-15)	5.5(-15)	1.1(-12)	7.3(-12)	125.4	1337.3
C^+	7.7(-15)	1.2(-15)	1.8(-12)	2.3(-13)	229.3	191.5
C_3H_3N	3.3(-15)	5.4(-14)	2.5(-12)	2.8(-11)	767.7	511.9
HC_3N	2.5(-15)	1.6(-14)	7.4(-12)	8.9(-12)	2967.1	548.0
C ₂	1.7(-15)	2.0(-15)	3.4(-11)	2.7(-10)	2.0(4)	1.4(5)
C_3N	9.7(-16)	9.4(-15)	1.3(-12)	3.4(-12)	1378.9	366.7
HNC ₃	3.2(-16)	2.4(-15)	1.1(-12)	2.1(-12)	3307.9	862.4
Р	1.6(-16)	1.9(-18)	8.9(-12)	8.9(-12)	5.4(4)	4.6(6)
HCl	9.6(-17)	1.9(-17)	1.7(-12)	1.4(-12)	1.8(4)	7.4(4)

Таблица 11. Окончание

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы признательны правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- M. Audard, P. Ábrahám, M. M. Dunham, J. D. Green, et al., in Protostars and Planets VI, edited by H. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond, and T. Henning (Tucson: University of Arizona Press, 2014), p. 387, arXiv:1401.3368 [astro-ph.SR].
- S. Frimann, J. K. Jorgensen, M. M. Dunham, T. L. Bourke, et al., Astron. and Astrophys. 602, id. A120 (2017), arXiv:1703.10225 [astro-ph.SR].
- 3. J. K. Jorgensen, A. Belloche, and R. T. Garrod, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 58, 727 (2020), arXiv:2006.07071 [astro-ph.SR].
- 4. J.-E. Lee, S. Lee, G. Baek, Y. Aikawa, et al., Nature Astron. 3, 314 (2019), arXiv:1809.00353 [astro-ph.SR].
- 5. *J.-E. Lee*, J. Korean Astron. Soc. **40**, 83 (2007), arXiv:0712.1866 [astro-ph].
- R. Sharma, J. J. Tobin, P. D. Sheehan, S. T. Megeath, W. J. Fischer, J. K. Jorgensen, E. J. Safron, and Z. Nagy, Astrophys. J. 904, id. 78 (2020), arXiv:2010.05939 [astro-ph.SR].
- D. S. Wiebe, T. S. Molyarova, V. V. Akimkin, E. I. Vorobyov, and D. A. Semenov, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 485, 1843 (2019), arXiv:1902.07475 [astro-ph.EP].

- T. Molyarova, V. Akimkin, D. Semenov, P. Ábrahám, T. Henning, Á. Kóspál, E. Vorobyov, and D. Wiebe, Astrophys. J. 866, id. 46 (2018), arXiv:1809.01925 [astroph.EP].
- M. Goto, J. D. Bailey, S. Hocuk, P. Caselli, G. B. Esplugues, S. Cazaux, and M. Spaans, Astron. and Astrophys. 610, id. A9 (2018), arXiv:1710.05926 [astro-ph.GA].
- K. I. Öberg, A. C. A. Boogert, K. M. Pontoppidan, S. van den Broek, E. F. van Dishoeck, S. Bottinelli, G. A. Blake, and N. J. Evans II, Astrophys. J. 740, id. 109 (2011), arXiv:1107.5825 [astro-ph.GA].
- A. C. A. Boogert, P. A. Gerakines, and D. C. B. Whittet, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 53, 541 (2015), arXiv:1501.05317 [astro-ph.GA].
- 12. *T. I. Hasegawa and E. Herbst*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **263**, 589 (1993).
- 13. *R. T. Garrod and T. Pauly*, Astrophys. J. **735**, id. 15 (2011), arXiv:1106.0540 [astro-ph.GA].
- 14. R. T. Garrod, Astrophys. J. 765, id. 60 (2013), arXiv:1302.0688 [astro-ph.GA].
- A. I. Vasyunin, P. Caselli, F. Dulieu, and I. Jiménez-Serra, Astrophys. J. 842, id. 33 (2017), arXiv:1705.04747 [astro-ph.GA].
- T. Molyarova, V. Akimkin, D. Semenov, T. Henning, A. Vasyunin, and D. Wiebe, Astrophys. J. 849, id. 130 (2017), arXiv:1710.02993 [astro-ph.EP].
- D. Semenov and D. Wiebe, Astrophys. J. Suppl. 196, id. 25 (2011), arXiv:1104.4358 [astro-ph.GA].

- H. H. Lee, E. Roueff, G. Pineau des Forets, O. M. Shalabiea, R. Terzieva, and E. Herbst, Astron. and Astrophys. 334, 1047 (1998).
- 19. Е. В. Борщева, в Сборник научных трудов конференции "Астрономия и исследование космического пространства", Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых, посвященная памяти П. Е. Захаровой, Екатеринбург, Россия, 1–5 февраля 2021 г., р. 93 (2021).
- H. Terada, A. T. Tokunaga, N. Kobayashi, N. Takato, Y. Hayano, and H. Takami, Astrophys. J. 667, 303 (2007).

- 21. B. Zuckerman, M. Morris, P. Palmer, and B. E. Turner, Astrophys. J. 173, L125 (1972).
- 22. M. L. R. van't Hoff, D. Harsono, M. L. van Gelder, T.-H. Hsieh, et al., arXiv:2110.08286 [astro-ph.GA] (2021).
- 23. M. Simončič, D. Semenov, S. Krasnokutski, T. Henning, and C. Jäger, Astron. and Astrophys. **637**, id. A72 (2020), arXiv:2003.14129 [astro-ph.GA].
- L. J. Karssemeijer and H. M. Cuppen, Astron. and Astrophys. 569, id. A107 (2014), arXiv:1409.3038 [astro-ph.GA].
- 25. *M. Jin and R. T. Garrod*, Astrophys. J. Suppl. **249**, id. 26 (2020), arXiv:2006.11127 [astro-ph.GA].