

УДК 52.43,551.12,550.4.02,550.4.07

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ПРОДУКТОВ ДЕГАЗАЦИИ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК (LL5)

© 2019 г. А. В. Стенников^а*, С. А. Воропаев^а, В. С. Федулов^а, Н. В. Душенко^а, С. Г. Наимушин^а

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского
Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), Москва, Россия

*e-mail: ya_email@mail.ru

Поступила в редакцию 14.11.2018 г.

После доработки 06.12.2018 г.

Принята к публикации 21.12.2018 г.

Образец метеорита Челябинск типа LL5 был подвержен прокаливанию в специально сконструированном приборе в диапазоне температур от 200 до 800°C с шагом в 100°C. Состав полученных летучих компонентов исследовался на хроматографе. Были обнаружены: CO₂, H₂O, N₂ в концентрациях 5–40 мкг/г образца; также H₂, CO, CH₄ и H₂S в концентрациях 0.1–2.0 мкг/г. По наблюдению за изменением концентраций выделенных компонентов во времени (до 90 мин), был сделан вывод о протекании химических реакций в системе между летучими компонентами непосредственно во время дегазации.

Ключевые слова: метеорит, дегазация, ранняя атмосфера, газовая хроматография

DOI: 10.1134/S0320930X19030058

ВВЕДЕНИЕ

Происхождение атмосферы планет земной группы представляет большой интерес для понимания процессов образования и эволюции внешних оболочек небесных тел. В соответствии с общепринятыми представлениями, первичная атмосфера состояла из водорода и гелия, захваченного из звездной туманности во время планетарной аккреции (Masol и др., 2016). В ходе формирования Земли произошла потеря первичной атмосферы за счет ее диссипации. Образование вторичной атмосферы вызвано выделением и накоплением газовых компонентов во время аккреции планетезималей и последующей дегазации расплавленной мантии (Lewis, Prinn, 1984; Abe, 2011; Masol и др., 2016). Также предполагается взаимодействие остатков первичной атмосферы (H₂) с летучими компонентами (см., Tian и др., 2005). Немалая роль в образовании вторичной атмосферы отводится выделившимся продуктам дегазации в результате падения крупных метеоритов на уже образованную планету (Bukvic, 1976; Lange, Ahrens, 1982; Abe, Matsui, 1985; Matsui, Abe, 1986; Hashimoto и др., 2007; Shaefer, Fegley (Jr.), 2007; Marchia и др., 2016). Каждый из приведенных этапов имеет весьма объемное теоретическое описание благодаря применению моделирования химических и термодинамических равновесий.

Несмотря на обилие расчетных моделей, непосредственно экспериментальных попыток вос-

произвести дегазацию метеоритного вещества при нагреве проводилось не так много. В частности, это, конечно, связано с труднодоступностью метеоритного вещества для деструктивных экспериментов и методов анализа. Из подобных исследований можно выделить работу (Gooding, Muepnow, 1977), в которой производился нагрев образца метеорита Холбрук типа L6, с выделением CO₂, H₂O, CO, Ar, He, N₂, S₂ и низкомолекулярных углеводородов (C_{6–7}). Нагрев до 1300°C проводился в ячейке Кнудсена при разреженном давлении при постоянном мониторинге состава летучих компонентов на масс-спектрометре. Также в работе (Muepnow и др., 1995) были нагреты несколько образцов обыкновенных хондритов (L3, LL3 и H3) до температуры 1300°C тем же образом, что и в предыдущей работе. Среди выделившихся летучих компонентов были установлены H₂, H₂O, CH₄, CO, CO₂ и др.

В данной работе исследуется состав газовых компонентов, выделившихся при прокаливании образца метеорита Челябинск в диапазоне температур 200–800°C. Падение этого метеорита произошло 15 февраля 2013 г. недалеко от города Челябинск. Сформированная в ГЕОХИ РАН экспедиция была отправлена 19 февраля на место падения космического тела для сбора и анализа образцов метеоритного вещества (Galimov и др., 2013). По результатам анализа собранных в экспедиции образцов было установлено, что данный

метеорит относится к типу обыкновенных хондритов LL5 со стадией ударного метаморфизма S4. В составе исследованного метеорита выделяются два типа пород: светлый хондритовый материал и темная брекчия импактного расплава, которые характеризуются сходным минеральным составом: оливин, ортопироксен, авгит, клинобронзит, альбит, троилит, хромит, FeNi-сплав и др. Характеристика Sm—Nd изотопной системы позволяет предположить, что данное космическое тело претерпело крупное ударное событие примерно 290 млн лет назад, которое привело к частичной гомогенизации изотопного состава Nd (Galimov и др., 2013).

Образцы данного метеорита были переданы нам для проведения экспериментов по моделированию дегазации планетезималий при протопланетной аккреции и поздних импактных событиях. В ходе исследования изменения концентраций газовых продуктов во времени было показано наличие химических преобразований между выделяемыми летучими.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения экспериментов по нагреванию образцов метеорита и детектированию выделяемых газов в ГЕОХИ РАН был сконструирован специальный прибор. Внешний вид и схема устройства изображены на рис. 1.

Подготовка и принцип работы прибора

Прибор разработан для прокаливания небольшого объема вещества в цельном реакторе из кварцевого стекла (рис. 1, 10). Для создания инертной атмосферы используется гелий, который также используется как газ-носитель на хроматографе. Перед проведением эксперимента реактор предварительно продувается гелием. Измельченный образец метеорита в кварцевой лодочке (4) объемом 3 мл, помещается в реактор в центр нагревателя (2), затем система запирается вакуумной пробкой из резины (5), которые позволяют без нарушения герметичности втыкать иглу газоплотного шприца (14). Закрытая система затем продувается гелием и нагревается до температуры 100°C до достижения отсутствия следов атмосферных газов, что периодически проверяется с помощью хроматографа при потоковом подключении и занимает около трех часов. Подача гелия на вакуумный натекаль (13) из баллона осуществляется через редуктор и регулируется таким образом, чтобы давление внутри системы примерно равнялось атмосферному (1.1 ± 0.1 бар), что регистрируется с помощью манометра (11). После того, как реактор очищен от атмосферных газов и установлен фон, система отключается от хроматографа, затем осуществляется нагрев об-

разца до необходимой температуры. Скорость нагрева регулируется с помощью блока управления (1) и составляет 4.5°C в 1 с; температура внутри системы определяется термопарой из устойчивого к окислению при высоких температурах сплава Microbell D (6), находящейся в непосредственной близости рядом с кварцевой лодочкой. Благодаря высокой скорости нагрева, система доводилась до требуемой температуры не более чем за 5 мин. После установления требуемого температурного режима к системе подсоединяется игла газоплотного шприца и происходит отбор газов (500 мкл) через каждый 15 мин в течение 60 или 90 мин. Интервалы между отборами газов обусловлены скоростью работы хроматографа: 9 мин занимает время анализа и 6 мин — очистка хроматографа и подготовка к следующему анализу. В итоге после каждого эксперимента было получено пять или семь точек (для 60 и 90 мин соответственно) со значениями концентраций газов. Несмотря на то, что в реакторе создавалась атмосфера гелия без примесей, отбор газов через газоплотный шприц все же привносит некоторое загрязнение, так как атмосферный воздух в небольшом количестве находится в самой игле, что, однако, было учтено во время градуировки хроматографа и при обработке результатов.

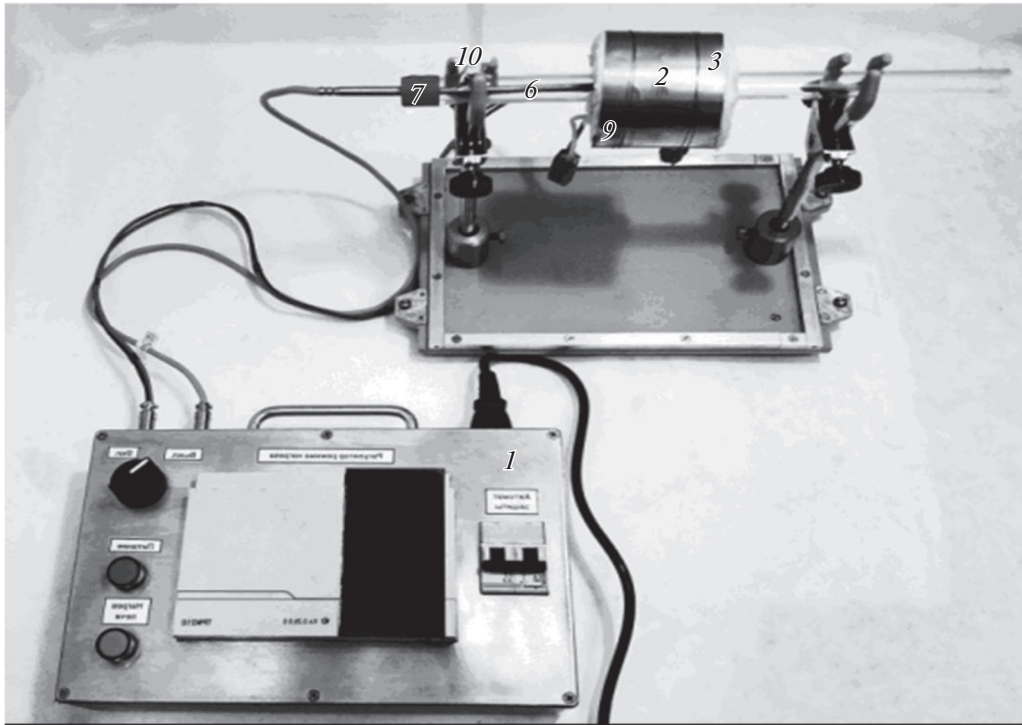
Режим проведения анализа

Определение летучих компонентов происходило на газовом хроматографе “КристалЛюкс-4000М” (Йошкар-Ола, Россия), который позволяет определять содержание веществ с точностью до миллионных долей (ppm) при установленной градуировке прибора с капиллярной колонкой HP-PLOT/Q (30 м × 0.537 мм × 40.0 мкм) и колонкой CaA, молекулярные сита (2 м × 3 мм × 0.25–0.177 мм). Поток газа-носителя гелия марки 6.0 составлял 20 мл/мин, давление на входе в колонку составляло 1 атм, температура термостата 110°C. В качестве детекторов использовали: ПФД при анализе серосодержащих газов, ДТП-1 при анализе H₂, N₂, CH₄, и CO, ДТП-2 при анализе CO₂ и H₂O.

Описание экспериментов

Были проведены две серии экспериментов. В первой серии использовался раздробленный в керамической ступке (2–3 мм) и перетертый в шаровой мельнице (~10 мкм) образец, отобранный из светлой (~70%) и темной (~30%) разновидностей метеоритного вещества. Две навески (~0.750 г) нагревались до 800°C, отбор газов для анализа на хроматографе осуществлялся пять раз в течение часа. Сравнивались концентрации газов для перетертой и раздробленной разновидности образца.

(a)



(б)

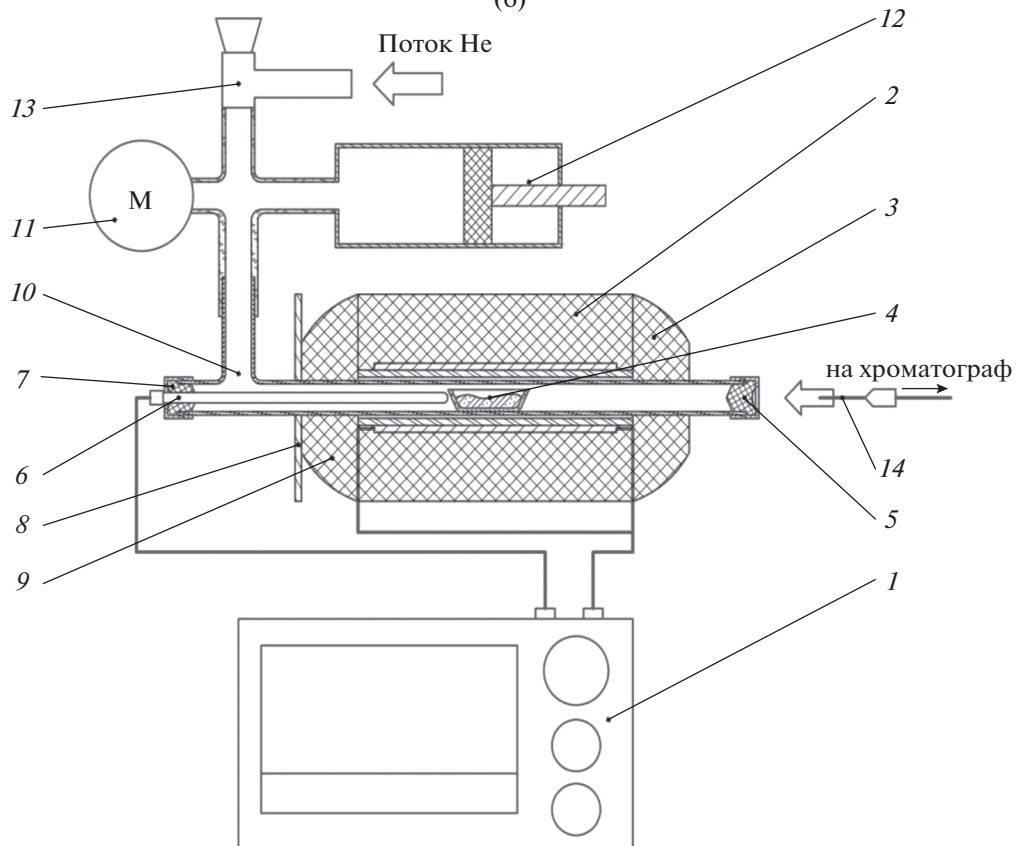


Рис. 1. Общий вид прибора (а) и принципиальная схема работы (б). 1 – электронный блок управления; 2 – индукционный нагреватель (печь); 3, 9 – защитный диск из теплоизоляционной ваты МКРР; 4 – кварцевая лодочка с загружаемым образцом; 5, 7 – вакуумная пробка из резины со стопором для отбора газа; 6 – термопара; 8 – теплоотражающий экран; 10 – основное тело кварцевого реактора; 11 – манометр; 12 – резервуар для выравнивания давления в замкнутом контуре с поршнем; 13 – вакуумный натекатель; 14 – игла газоплотного шприца.

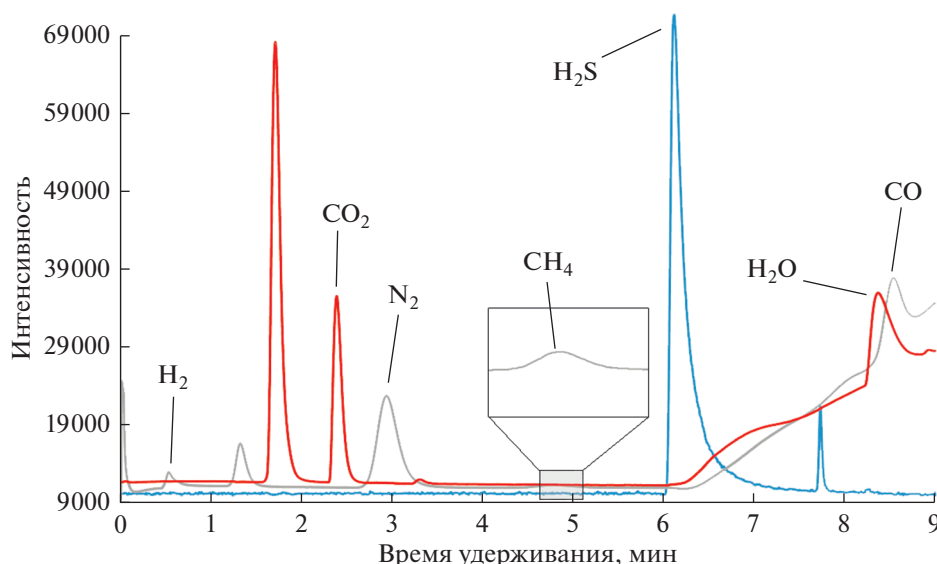


Рис. 2. Хроматограмма продуктов дегазации образца Челябинского метеорита. Цвет линий обозначает детектор: серая – ДТП-1, красная – ДТП-2, синяя – ПФД. Пик метана показан во внесштабной врезке.

Во второй серии экспериментов использовалась перетертая на шаровой мельнице навеска той же массы, только из светлой разновидности метеоритного вещества. Нагрев варьировался от 200 до 800°C с шагом в 100°C – суммарно было проведено семь экспериментов, отбор газа для анализа осуществлялся в течение 1.5 ч (семь раз). Восьмая навеска при 900°C начала спекаться с термическим разложением составных минеральных компонентов, что привело к нарушению представительности пробы, поэтому эксперимент был прекращен. Сравнивались изменения концентраций газов во времени при разных температурах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первая серия

В ходе проведения двух экспериментов при 800°C были определены следующие летучие компоненты: H₂O, N₂, CO₂, CO, CH₄, H₂ и H₂S. Типичный вид полученной хроматограммы представлен на рис. 2. Значения концентраций приведены в табл. 1.

Полученные в ходе дегазации вещества можно условно поделить на макро- и микрокомпоненты. К первым относятся H₂O, N₂, CO₂, их концентрация находится в диапазоне 5–40 мкг/г образца; ко вторым – все остальные (концентрация изменя-

Таблица 1. Значения концентраций летучих компонентов в зависимости от времени удерживания и степени измельченности пробы (Д – дробленый, П – перетертый образец)

Летучий компонент	Время отбора пробы, мин									
	0		15		30		45		60	
	Д	П	Д	П	Д	П	Д	П	Д	П
H ₂ O	28.61	25.82	37.86	34.15	23.42	22.56	35.14	32.44	38.59	37.25
N ₂	0.60	0.75	0.83	1.22	1.60	2.46	5.23	7.32	19.37	21.04
CO ₂	5.51	10.03	5.30	5.99	5.29	5.97	5.32	6.46	5.33	6.77
CO	0.20	0.60	0.32	1.13	0.33	1.15	0.29	0.98	0.24	0.81
CH ₄	0.11	0.32	0.17	0.54	0.15	0.50	0.11	0.43	0.08	0.39
H ₂	0.34	1.86	0.27	1.56	0.18	1.22	0.14	1.05	0.12	0.98
H ₂ S	0.01	0.03	0.03	71.98	0.02	55.64	0.02	38.22	0.02	39.23

Концентрация, мкг/г образца

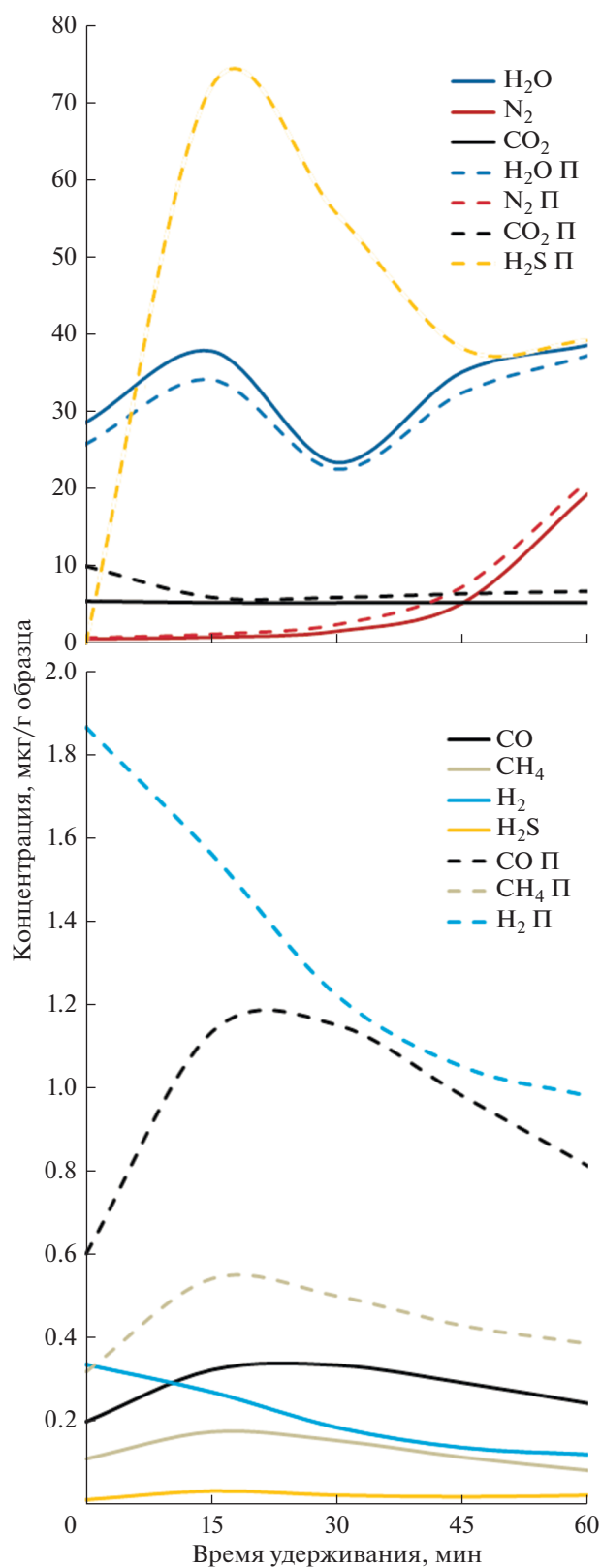


Рис. 3. Концентрации летучих компонентов от времени удерживания при 800°C прокалке. Прямая линия обозначает дробленый, пунктир — перетертый (П) образец.

ется в пределах 0.1–2.0 мкг/г), за исключением H₂S, который является продуктом восстановления железа из троилита (рис. 3).

Для всех газообразных продуктов наблюдаемая при прокаливании концентрация выше для перетертого образца, чем для дробленного (за исключением воды), так как для перетертого образца площадь поверхности больше, и выделение газов происходит активнее. Характерной особенностью изменения концентраций летучих компонентов в зависимости от степени измельченности метеорита является их полная синфазность. Практически для всех летучих компонентов типично увеличение концентрации в первые 15 мин прокалывания, что, очевидно, связано с процессом выделения газов из минеральной матрицы. Исключения составляют H₂ и CO₂, так как выделение этих газов началось в процессе нагрева образца. Концентрация азота плавно повышается в течение всего времени прокалывания, что может быть вызвано десорбцией из минеральных фаз, в которые он был захвачен.

Если бы выделяющиеся вещества не вступали в химическое взаимодействие между собой, то наблюдаемое изменение концентрации летучих компонентов во времени имело бы вид прямой после установления максимума концентрации. Однако наблюдаемая картина отличается: при наступлении максимума концентрация летучих компонентов начинает падать (за исключением N₂).

Образование H₂S, по-видимому, связано с восстановлением водородом железа из троилита (основного серосодержащего компонента, согласно Galimov и др., 2013)). Заметная разница в концентрациях при прокалывании дробленного и перетертого образцов связана с тем, что водород не может прореагировать за неимением областей контакта с заключенным в минеральном массиве троилитом. При перетирании зерна FeS оказываются “обнаженными”, из-за чего и происходит наблюдаемый резкий рост концентрации.

Изменение концентрации воды образует любопытную картину “качелей”, при которой содержание паров воды то увеличивается, то уменьшается в ходе прокалывания. Наблюдаемое изменение концентрации связано с участием воды как основного окислителя в нескольких конкурирующих реакциях.

Относительно низкая концентрация метана и монооксида углерода свидетельствует о том, что большая часть углерода переходит в CO₂, а CO и CH₄ являются преимущественно продуктами восстановления диоксида в ходе дегазации. Последние при этом начинают дополнительно участвовать в других реакциях, вследствие чего их концентрация во времени уменьшается.

Следует подчеркнуть, что описываемый состав выделившихся и образованных летучих компонентов далеко не полон, так как способность хроматографа определять исследуемые вещества связана с задействованными колонками. То есть такие типичные продукты дегазации, как Ar, Ne и прочие не обнаружены нами не по причине их отсутствия, а потому, что на эти газы не было возможности выполнить калибровку. При этом обнаруженные пики кислорода являются примесью атмосферного воздуха, захваченные во время транспортировки смеси газов из реактора в хроматограф. В самой системе кислород не выделяется, поскольку является продуктом термического разложения минералов, и требуемые для этого температуры в наших реакциях не были задействованы.

Вторая серия

В ходе проведения семи экспериментов по прокаливанию перетертого метеоритного вещества при температуре от 200 до 800°C (с шагом в 100°C) была изучена зависимость концентрации получаемых летучих компонентов от времени и температуры. В системе с многочисленными газовыми компонентами лимитирующим фактором возможности протекания какого-либо химического процесса является энергия активации, находящаяся в экспоненциальной зависимости от температуры. Пошагово изменяя температуру системы и наблюдая за изменениями концентраций компонентов, можно дать некоторые общие оценки о границах протекания тех или иных реакций. Результаты экспериментов представлены на рис. 4. Каждый график составлен из семи профилей при разной температуре; изолинии изменения концентрации построены в результате экстраполяции полученных данных.

Углекислый газ (рис. 4а) присутствует на всех точках измерения. Его концентрация постепенно увеличивается от 1 до 13 мкг/г с шагом 2.0–2.5 мкг/г. По достижению определенного уровня (в среднем от 30 мин), концентрация CO₂ становится относительно стабильной, что говорит о неактивной химической роли данного компонента в получаемой газовой смеси.

Водород отмечается уже при температуре 200°C в небольшом количестве (~0.01 мкг/г), затем его количество линейно возрастает с максимумом в 0.48 мкг/г (рис. 4в). Как активный восстановитель, он сразу начинает участвовать в различных реакциях, в следствие чего его концентрация после пика сразу начинает падать. Причем с увеличением температуры положение пика смещается с 30 мин для 400°C до 0 мин для 600°C и выше.

Концентрации CO и CH₄ напрямую зависят от количества H₂ (рис. 4б, 4г). При температуре

200°C монооксид не появляется, и на отрезке от 300 до 600°C его концентрация меняется на 0.012 мкг/г каждые 100°C. От 600°C и выше прирост CO резко увеличивается на порядок и становится 0.185 мкг/г на 100°C, что говорит об увеличении скорости восстановления монооксида из диоксида при данной температуре. Максимум образования CO наблюдается в точке 15 мин, после чего его концентрация начинает постепенно уменьшаться.

Метан отсутствует в продуктах реакции при 200°C, имеет единичную точку обнаружения на 30 мин для 300°C. Начиная с 400°C метан стабильно появляется среди летучих компонентов, его концентрация линейно увеличивается с 0.026 мкг/г и имеет пиковое значение 0.313 мкг/г. Положение максимума концентрации при 400°C находится на 30 мин, для температур выше – на 15 мин. После прохождения точки максимума количество CH₄ резко уменьшается и приходит почти к тем же значениям, что и в точке 0 мин, затем стабилизируется (400–600°C) или продолжает убывать (700–800°C). Из этого следует, что зона метастабильного нахождения метана приходится на интервал температур от 400 до 600°C, и при повышении температуры он начинает участвовать в других процессах.

Содержание азота (рис. 4д) постепенно повышается при прокаливании, со временем переходя из линейной зависимости в степенную (характерно для образцов, нагретых до 200–400 и 800°C, для остальных зависимость остается линейной). Отмечается большой разброс конечных значений концентраций среди образцов: 49–83 мкг/г для образцов при температурах 200, 500 и 800°C; 5–11 мкг/г для остальных. При этом начальная концентрация в точке 0 мин для образцов примерно одинаковая (<1 мкг/г), кроме образцов на 500 и 800°C. Все эти особенности указывают, по-видимому, на загрязнение атмосферным азотом проб во время их подготовки. Тем не менее азот является собственным продуктом дегазации метеорита в результате десорбции с увеличением температуры. Стабильное повышение концентрации указывает на его инертный характер в системе выделенных летучих компонентов.

Сероводород не обнаруживается при прокаливании образца до 200–400°C (рис. 4е). Минимальные значения концентраций начинают проследиваться только с 500°C, и составляют 0.001–0.015 мкг/г, с максимальным выходом в точке 60 мин, затем исчезают. При 600 и 700°C пик выхода H₂S приходится на точку 15 мин (0.018–0.035 мкг/г), затем концентрация начинает постепенно снижаться. При температуре 800°C наблюдается резкий скачок до 0.242 мкг/г, но затем концентрация сероводорода возвращается к значению 0.040 мкг/г. Наблюдаемый скачок, скорее

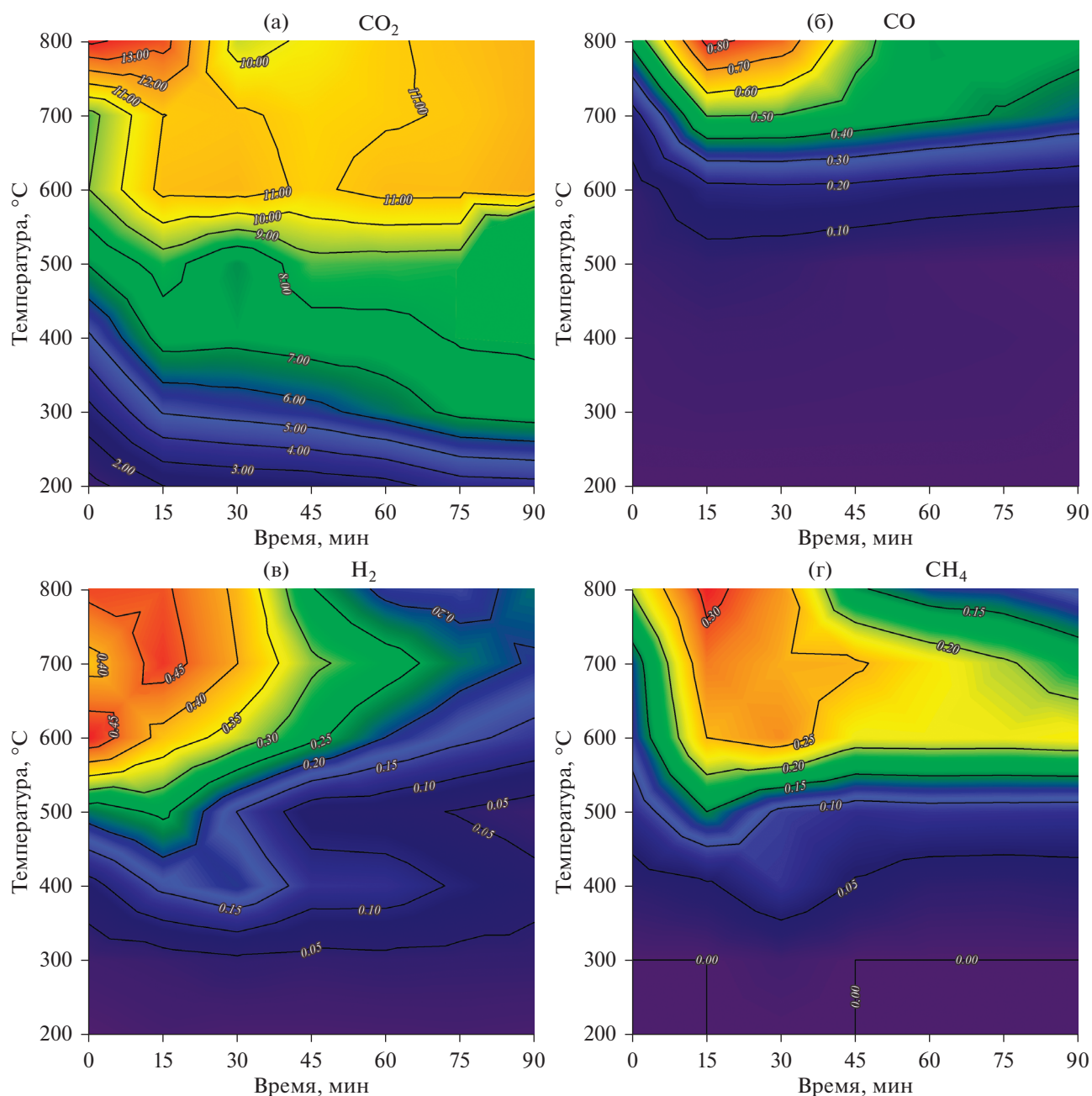


Рис. 4. Тепловые контуры концентраций компонентов в зависимости от температуры прокаливания и времени удержания нагрева. (а) – CO_2 , (б) – CO , (в) – H_2 , (г) – CH_4 , (д) – N_2 , (е) – H_2S , (ж) – H_2O . Цветовые обозначения используются для наглядности и не имеют фиксированной привязки по значениям концентраций. Количество компонента указано на изолиниях, размерность: мкг/г образца.

всего, является следствием протекания реакции восстановления железа из троилита, которая при более низких температурах не происходит, либо происходит заметно медленнее.

Картина изменения концентрации воды (рис. 4ж), как и в предыдущем эксперименте, демонстрирует переменное повышение и понижение. Максимальное содержание паров воды наблюдается при температуре 300°C до 73 мкг/г, для остальных

температур значение варьируется от 20 до 40 мкг/г. Также можно отметить два температурных профиля – 300 и 500°C – для которых характерно относительно стабильное значение концентрации, что может быть обусловлено установлением режима сверхкритического флюида. При остальных температурах концентрация воды постоянно меняется, образуя на графике синусоидоподобную картину. Такая картина является

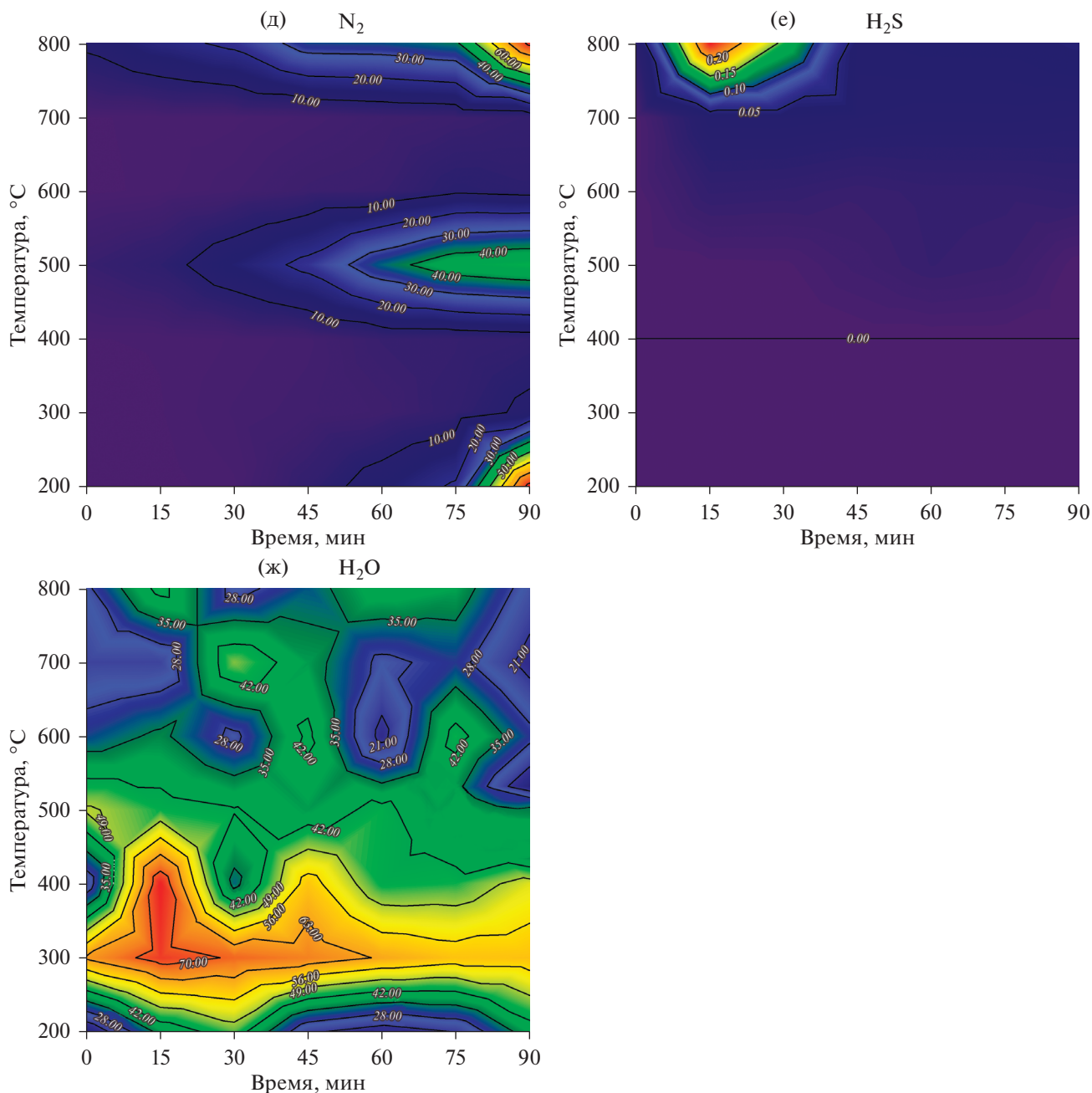


Рис. 4. Окончание.

следствием либо участия паров воды в разнообразных конкурирующих реакциях, протекающих одновременно (где вода участвует в качестве прекурсора и продукта реакции), либо неравновесных химических процессов.

По результатам второй серии экспериментов можно сделать следующие выводы: основными продуктами термической дегазации метеорита являются CO₂, N₂ и H₂O, причем первые два ведут себя достаточно инертно. Однако при повышении температуры и содержания H₂ начинают так-

же образовываться продукты восстановительных реакций, такие как CO, CH₄ и H₂S. Несмотря на то, что в условиях нашего эксперимента концентрации восстановительных компонентов меньше в сотни раз концентрации окисляющих, в условиях ранней аккреции первичная атмосфера, по некоторым оценкам (Tian и др., 2005), могла диссипировать с меньшей скоростью, чем обычно принято считать. При избытке водорода количества редуцированных компонентов могут быть гораздо выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе аккреции планетезималей и образования протопланеты, за счет высвобождения гравитационных сил происходила дегазация и плавление метеоритного вещества, вследствие чего образовалась вторичная атмосфера Земли. Также высвобождение летучих и вхождение их в атмосферу происходило при соударениях крупных метеоритов со сформировавшейся планетой во время последней метеоритной бомбардировки (Late Heavy Bombardment).

Образовавшаяся в результате ранняя атмосфера планеты оказывала большое влияние на формирование коры, так как состав и термодинамический режим (T -, P -условия) газовой оболочки имеют большое влияние на скорость остывания расплавленного вещества, выступая тепловым буфером, и задают скорость магматической дифференциации при понижении температуры.

В ходе нашего эксперимента по прокаливанию хондритового вещества метеорита Челябинск (LL5) были получены количественные и качественные данные о составе выделившихся летучих компонентов, существующих в температурном интервале 200–800°C. Так, кроме классического состава CO_2 , H_2O , N_2 , было показано присутствие редуцированных соединений (H_2 , CO , CH_4 , H_2S), концентрация которых повышается с увеличением температуры. Образованию подобных веществ также мог поспособствовать избыток водорода, оставшийся от первичной атмосферы. Протекаемые окислительно-восстановительные реакции лимитируются наличием водорода и воды, как главных химических активаторов процессов. Дioxid углерода и азот при этом проявляют себя достаточно инертно.

Как показал эксперимент, метан входит в состав продуктов дегазации и при высоких температурах. Согласно нашим расчетам, его образование путем восстановлением ди- и монооксида углерода протекает со смещением равновесия в сторону продуктов реакции при понижении температуры ниже 600°C. Вопрос образования метана при повышенной температуре пока остается открытым.

CO_2 и CH_4 относятся к парниковым газам, которые вместе с H_2O вызывают “эффект покрывала” (blanketing effect) вторичной атмосферы, который, как считается (Matsui, Abe, 1986), является дополнительной причиной образования и поддержания магматического расплава, так как он препятствует быстрому излучению тепловой энергии.

В условиях магматического океана, кроме дегазации также параллельно идет процесс ингазации (захвата газов в расплав) (Abe, 1993). Исходя из растворимости летучих компонентов в магма-

тических расплавах (Граменицкий, 2000), можно утверждать, что вода будет в больших объемах входить в расплав, чем остальные газовые компоненты. Поэтому существенную долю газов вторичной атмосферы будут составлять N_2 , CO_2 , CO и разныe углеводороды.

Результаты нашего эксперимента качественно согласуются с расчетами, выполненными в работах (Bukvic, 1976) и (Shaefer, Fegley, 2007), не смотря на то, что там использовались метеориты других составов (типа L, H и CI). Однако существуют расхождения по части количественной оценки содержания газов. Также в приведенных работах не было учтено взаимодействие летучих компонентов между собой, что, как мы считаем, существенно влияет на конечный состав системы.

Подробное сравнение результатов теоретических работ с нашими экспериментами, а также расчеты протекающих реакций будут проделаны в следующей работе. Также планируется провести аналогичный эксперимент с метеоритами других типов (L, H, CI).

Авторы выражают глубокую благодарность Олегу Ивановичу Яковлеву за предоставленный образец метеорита Челябинск, а также за конструктивные замечания при написании данной работы.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 17-17-01279).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Граменицкий Е.Н., Котельников А.Р., Батанова А.М., Щекина Т.И., Плечов П.Ю. Экспериментальная и техническая петрология. М.: Научный мир, 2000. 416 с.
- Abe Y. Physical state of the very early Earth // *Lithos*. 1993. № 30. P. 223–235.
- Abe Y. Protoatmospheres and Surface Environment of Protoplanets // *Earth, Moon, and Planets*. 2011. V. 108. № 1. P. 9–14.
- Abe Y., Matsui T. The formation of an impact-generated H_2O atmosphere and its implications for the early thermal history of the Earth // *J. Geophys. Res.* 1985. № 90 (Suppl.). P. 545–559.
- Bukvic D.S. Outgassing of chondritic planets. M.S. thesis. 1976. MIT. 80 p.
- Galimov E.M., Kolotov V.P., Nazarov M.A., Kostitsyn Yu.A., Kubrakova I.V., Kononkova N.N., Roshchina I.A., Alexeev V.A., Kashkarov L.L., Badyukov D.D., Sevast'yanov V.S. Analytical results for the material of the Chelyabinsk meteorite // *Geochem. Int.* 2013. V. 51. № 7. P. 522–539.
- Gooding J.L., Muenow D.W. Experimental vaporization of the Holbrook chondrite // *Meteoritics*. 1977. № 12. P. 401–408.
- Hashimoto G.L., Abe Y., Sugita S. The chemical composition of the early terrestrial atmosphere: Formation of a

- reducing atmosphere from CI-like material // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. E05010. 12 p.
- Lange M.A., Ahrens T.J.* The evolution of an impact-generated atmosphere // *Icarus*. 1982. № 51. P. 96–120.
- Lewis J.S., Prinn R.G.* Planets and Their Atmospheres: Origin and Evolution. New York: Acad. Press, 1984. 470 p.
- Marchia S., Black B.A., Elkins-Tanton L.T., Bottke W.F.* Massive impact-induced release of carbon and sulfur gases in the early Earth's atmosphere // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2016. № 449. P. 96–104.
- Massol H., Hamano K., Tian F., Ikoma M., Abe Y., Chassefière E., Davaille A., Genda H., Güdel M., Hori Y., Leblanc F., Marcq E., Sarda P., Shematovich V.I., Stökl A., Lammer H.* Formation and evolution of protoatmospheres // *Space Sci. Rev.* 2016. № 205. P. 153–211.
- Matsui T., Abe Y.* Impact-induced atmospheres and oceans on Earth and Venus // *Nature*. 1986. V. 322(6079). P. 526–528.
- Miller S.L.* A production of amino-acids under possible primitive Earth conditions // *Science*. 1953. V. 9. № 1. P. 528–529.
- Muenow D., Keil K., McCoy T.J.* Volatiles in unequilibrated ordinary chondrites: Abundances, sources and implications for explosive volcanism on differentiated asteroids // *Meteoritics*. 1995. № 30. P. 639–645.
- Russel M.J.* The alkaline solution to the emergence of life: Energy, entropy and early evolution // *Acta Biotheoretica*. 2007. V. 55. № 2. P. 133–179.
- Schaefer L., Fegley B.Jr.* Outgassing of ordinary chondritic material and some of its implications for the chemistry of asteroids, planets, and satellites // *Icarus*. 2007. № 186. P. 462–483.
- Tian F., Toon O., Pavlov A., De Sterck H.* A hydrogen-rich early Earth atmosphere // *Science*. 2005. № 308. P. 1014–1017.