

УДК 523.68

ЗАВИСИМОСТЬ УПРУГИХ СВОЙСТВ Н5-ХОНДРИТОВ (NWA 12370) ОТ ДАВЛЕНИЯ

© 2020 г. С. А. Воропаев^{1,*}, И. И. Нугманов^{2,**}, Н. В. Душенко¹, Я. Джинго^{3,***}

Представлено академиком РАН М.Я. Маровым 30.08.2020 г.

Поступило 01.09.2020 г.

После доработки 01.09.2020 г.

Принято к публикации 08.09.2020 г.

С помощью ультразвуковых волн изучены механические свойства хондрита NWA 12370, петрологический тип Н5, в зависимости от внешнего гидростатического давления. Данный метеорит является фрагментом каменного дождя из обломков внутренней части крупного астероида, размером порядка 200 км. На ранней стадии Солнечной системы такие планетозимали вносили существенный вклад в развитие планет земной группы. Понимание особенностей связи внутренней структуры и упругих свойств хондритов важно как для оценки их вклада в состав коры и верхней мантии Луны и Земли, так и для уточнения механизмов формирования металлического ядра у планет земной группы в целом.

Ключевые слова: планетозимали, деформация, ударная эволюция, упругость, хондриты, астероиды, металлическое ядро

DOI: 10.31857/S2686740020060218

ВВЕДЕНИЕ

Выпадающие на Землю каменные метеориты содержат значительную часть хондритов типа Н (high относится к содержанию восстановленного железа), что указывает на их важную роль в формировании планет земной группы. В настоящее время утвердилась “луковичная” или послойная модель внутренней структуры родительских тел Н-хондритов [1]. В ней, по аналогии со структурой Земли, петрологический тип Н6 соответствует “ядру”, Н5 – “нижней мантии”, Н4 – “верхней мантии” и Н3 – “коре”. Расплавленное ядро в действительности не возникает, и данное разделение помогает только лучше понять особенности хондритов различных типов по составу и степени теплового метаморфизма. Глубина залегания и размер родительского тела определяет скорость охлаждения вещества и максимальную температуру окружающей среды. Численное мо-

делирование позволило достаточно надежно оценить размер родительских тел (радиус до 200 км), время их формирования (первые 10 млн лет) и тепловой режим, обусловленный радиоактивным распадом Al^{26} [2]. Луна и Земля сформировались значительно позднее (первые 100 млн лет) и падение крупных Н планетозималей на их поверхности вызывало существенные изменения состава первичной коры и верхней мантии [3].

Как известно, важным механизмом формирования металлического ядра у планетозималей является проникновение капель расплава, содержащего сидерофильные элементы, через силикатную матрицу [4]. Этот процесс сильно затруднен тем, что капли расплава Fe–Ni и сульфидов для оливин-содержащих пород хондритов являются плохо смачиваемыми жидкостями [5]. Для этих условий теоретические исследования показали, что для преодоления порога перколяции необходимо объемное содержание металлического расплава как минимум 6%. Но недавние эксперименты уточнили, что данный порог существенно понижается при наличии значительных сдвиговых деформаций за счет формирования связанной сети капель расплава [6, 7]. Этот механизм применим и для планет земной группы, хотя формирование их внутренней структуры прошло через фазу развитого магматического океана (МО). На ранней стадии эволюции металлические рас-

¹ Институт геохимии и аналитической химии Российской академии наук, Москва, Россия

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

³ Уханьский университет, Ухань, Китай

*E-mail: voropaev@geokhi.ru

**E-mail: nugmanov@kfu.ru

***E-mail: jgyan@whu.edu.cn



Рис. 1. Внешний вид установки для геомеханических исследований ПИК УЗ УЭС.

плавы опускались на дно МО и двигались дальше к центру планеты через суб-солидусную силикатную мантию. В отличие от планетозималей, где сдвиговые деформации в основном производились столкновениями [8], у планет с МО важную роль играли приливные взаимодействия.

Очевидно, что основные механические свойства Н-хондритов, такие как прочность, модуль Юнга и коэффициент Пуассона, играли при деформации важную роль. В ряде работ были проведены статические исследования физических характеристик хондритов, в основном при стандартных условиях поверхности Земли, давление 1 атм [9]. Динамические условия и повышенное внешнее давление использовались при создании паспорта прочности горных пород и ряда важных материалов, разработаны методики для вземного вещества [10, 11]. Если учесть размеры предполагаемых родительских тел, то малое внешнее давление явно недостаточно для адекватного рассмотрения процессов столкновения и приливных деформаций [12]. Мы исследовали динамическими методами механические свойства хондрита NWA 12370, петрологический тип Н5, в зависимости от внешнего гидростатического давления до 50 МПа. Выявлены существенные вариации основных упругих величин, таких как модуль Юнга и коэффициент Пуассона, и сделаны оценки эффекта для возможных деформаций астероидов S-типа.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Динамические УЗВ физико-механические испытания образцов Н5-хондрита выполнены на установке ПИК-УЗ-УЭП (АО «Геологика», г. Новосибирск). Данная установка предназначена для измерения электрических и упругих свойств породы в условиях, моделирующих пластовые. ПИК УЗ-УЭП может создавать пластовые условия (всестороннее давление до 100 МПа, температура до 150°C) с контролируемым внутривещным давлением насыщающих флюидов в условиях трехосного нагружения образцов для ультразвуковых исследований. Внешний вид установки представлен на рис. 1.

Как известно, скорости распространения продольной и поперечной ультразвуковой волны зависят от плотности и упругих характеристик среды. ПИК УЗ УЭС состоит из двух ультразвуковых датчиков, источника сигнала, осциллографа, измерителя RLC и системы реле. Источник генерирует сигнал частотой 1 МГц. Сигнал поступает на один из датчиков, который возбуждает импульсы S- и P-волн. Волны проходят через образец, установленный в кернодержатель, детектируются вторым ультразвуковым датчиком измерения и поступают на осциллограф. Источник имеет три выходных сигнала: S-волна, P-волна и сигнал синхронизации источника с осциллографом. При проведении физико-механических испытаний керна происходит синхронизированное с осциллографом отображение графиков S- и P-волн в координатах время–амплитуда. С помощью встроенной программы обработки сигналов, исполнитель в интерактивном режиме отмечает время вступления каждой волны и происходит автоматический расчет скорости P- и S-волны (см. рис. 2).

Расчет динамических упругих характеристик (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) проводился по формулам (1) и (2):

$$R = \frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}}, \quad (1)$$

$$E = V_p^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)}, \quad (2)$$

где R – отношение продольных и поперечных волн, V_p – скорость продольных волн, V_s – скорость поперечных волн, μ – динамический коэффициент Пуассона, E – динамический модуль Юнга, ρ – плотность пород.

Исследования выполнены для цикла с увеличением гидростатического (всестороннего обжимного) давления и цикла разгрузки для ступеней давления от атмосферного до 50 МПа (см. табл. 1), плотность образцов Н5 составляла 3.518 г/см³.

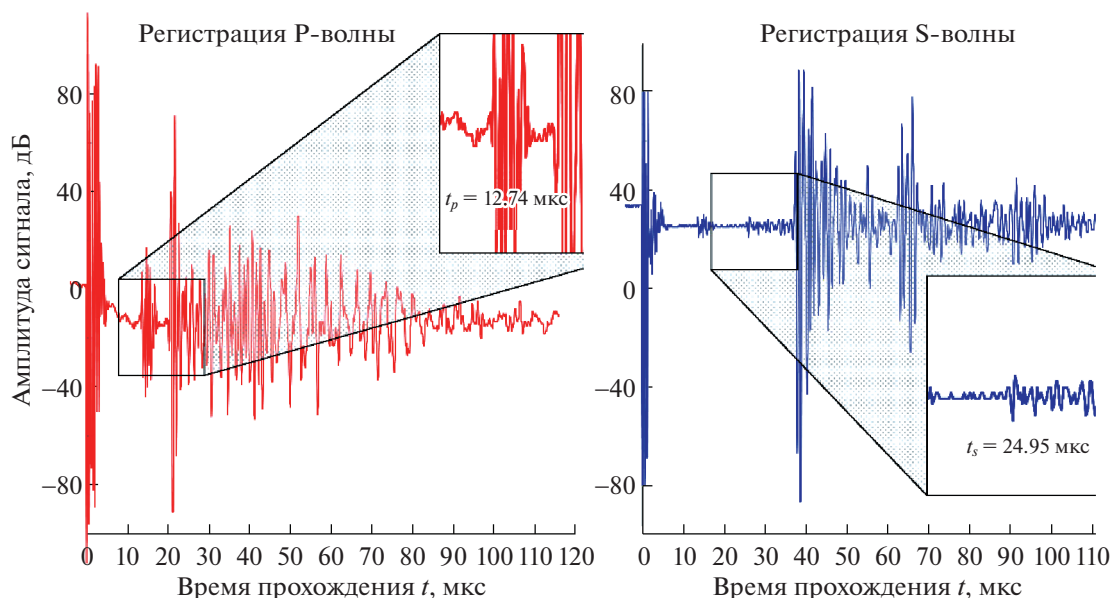


Рис. 2. Регистрация скорости продольной и поперечной волн. Гидростатическое давление 30 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Астероиды S-типа (силикатные) наиболее близки по своим наблюдаемым характеристикам к обыкновенным хондритам [13]. В частности, в их число входят Эрос (миссия Шумейкер, ЕКА) и Итокава (миссия Хаябуса, Япония), детально исследованные межпланетными зондами (АМС). В настоящее время наибольшим по размеруцелевым астероидом S-типа является Эвномия (диаметр 330 км). Расположение представителей данного класса во внутренней зоне пояса астероидов,

между 2.2 и 3 а.е., позволяет предположить их важный вклад в формировании планет земной группы.

Проведенные измерения показали существенную зависимость упругих свойств исследуемого Н5-хондрита, NWA 12370, от внешнего гидростатического давления. При повышении давления от 1 до 50 МПа, модуль Юнга изменяется приблизительно от 96 до 104 ГПа, а коэффициент Пуассона от 0.18 до 0.2. Для средней плотности хондритов 3.5 г/см^3 , планетозимали радиусом от 100 до

Таблица 1. Результаты определения скоростных и динамических упругих параметров образца Н5-хондрита

Длина, мм	Диаметр, мм	Гидростатическое давление, МПа	Скорость поперечной волны, км/с	Скорость продольной волны, км/с	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
41.74	29.55	1	3.413	5.471	95.97	0.1814
		5	3.413	5.773	100.03	0.2314
		10	3.441	5.773	101.12	0.2245
		20	3.47	5.773	102.2	0.2173
		30	3.528	5.773	104.35	0.2019
		40	3.528	5.773	104.35	0.2019
		50	3.528	5.773	104.35	0.2019
		40	3.528	5.773	104.35	0.2019
		30	3.528	5.773	104.35	0.2019
		20	3.528	5.773	104.35	0.2019
		10	3.47	5.773	102.2	0.2173
		5	3.441	5.773	101.12	0.2245
		1	3.413	5.471	95.97	0.1814

250 км (размер Весты) имеют давление в центре от 11 до 64 МПа. Поскольку залегание H5-типа предполагается непосредственно возле “ядра” родительского тела, необходимо учитывать влияние внешнего давления на физические свойства хондритов при изучении их участия в процессах на ранних этапах развития Солнечной системы и в будущих миссиях АМС удаленного зондирования.

Понимание особенностей связи внутренней структуры и упругих свойств хондритов важно как для оценки их вклада в состав коры и верхней мантии Луны и Земли, так и для уточнения механизмов формирования металлического ядра у планет земной группы через усиление перколяции сдвиговыми деформациями.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены по тематике 0137-2019-0013 Госзадания лаборатории геохимии углерода, ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Miyamoto M., Fujii N., Takeda H.* Ordinary chondrite parent body: An internal heating model // *Lunar Planet. Sci.* 1981. V. 12B. P. 1145–1152.
2. *Henke S., Gail H.-P., Trierloff M., Schwarz W. H.* Thermal evolution model for the H chondrite asteroid-instantaneous formation versus protracted accretion // *Icarus*. 2013. V. 226. P. 212–228.
3. *Burkhardt C., Dauphas N., Tang H. et al.* In search of the Earth-forming reservoir: Mineralogical, chemical, and isotopic characterizations of the ungrouped achondrite NWA 5363/NWA 5400 and selected chondrites // *Meteoritics & Planetary Science*. 2017. P. 1–20.
4. *Yoshino T., Walter M.J., Katsura T.* Core formation in planetesimals triggered by permeable flow // *Nature*. 2003. V. 422. P. 126–128.
5. *Ballhaus C., Ellis D.J.* Mobility of core melts during Earth's accretion // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1996. V. 143. P. 137–145.
6. *Bruhn D., Groebner N., Kohlstedt D.L.* An interconnected network of core-forming melts produced by shear deformation // *Nature*. 2000. V. 403. P. 883–886.
7. *Groebner N., Kohlstedt D.L.* Deformation-induced metal melt networks in silicates: Implications for core mantle interactions in planetary bodies // *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. V. 245. P. 571–580.
8. *Tomkins A.G., Weinberg R.F., Sheaffer B.F., Langendam A.* Disequilibrium melting and melt migration driven by impacts: Implications for rapid planetesimal core formation // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2013. V. 100. P. 41–59.
9. *Медведев П.В., Горбачев Ф.Ф., Зоткин И.Т.* Определение физических свойств каменных метеоритов применительно к изучению процессов их разрушения // *Метеоритика*. 1985. Вып. 44. С. 105–110.
10. *Hogan J. D., Kimberley J., Hazeli K., et al.* Dynamic behavior of an ordinary chondrite: The effects of microstructure on strength, failure and fragmentation // *Icarus*. 2015. V. 260. P. 308–319.
11. *Воропаев С.А., Душенко Н.В., Нугманов И.И. и др.* Особенности построения паспорта прочности вземного вещества на примере метеорита Челябинск // *ДАН*. 2017. Т. 476. № 6. С. 635–639.
12. *Воропаев С.А., Джуанго Я., Барриот Ж.-П.* Разрыв вытянутого малого тела приливными силами Земли при подлете: возможные сценарии // *Астрономический вестник*. 2020. Т. 54. № 2. С. 171–182.
13. *De Meo F.E., Binzel R.P., Slivan S.M., Bus S.J.* An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared // *Icarus*. 2009. V. 202. P. 160–180.

DEPENDENCE OF ELASTIC PROPERTIES OF H5-CHONDRITES (NWA 12370) ON PRESSURE

S. A. Voropaev^a, I. I. Nugmanov^b, N. V. Dushenko^a, and Y. Jianguo^c

^a *Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b *Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation*

^c *Wuhan University, Wuhan, China*

Presented by Academician of the RAS M.Ya. Marov

Mechanical properties of NWA 12370 chondrite, petrological type H5, depending on external hydrostatic pressure were studied using ultrasonic waves. This meteorite is a fragment of a rock shower from the debris of the inner part of a large asteroid, about 200 km in size. At an early stage of the Solar system such planetesimals have made a significant contribution to the development of terrestrial planets. Understanding the connection between the internal structure and elastic properties of chondrites is important both for assessing their contribution to the composition of the crust and upper mantle of the moon and Earth, and for clarifying the mechanisms of formation of the metal core of the earth's group of planets as a whole.

Keywords: planetesimals, strain, impact evolution, elasticity, chondrites, asteroids, metal core