

## ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУННОГО ГРУНТА И СОПОСТАВЛЕНИЯ СОСТАВОВ КЛИНОПИРОКСЕНОВ ЛУНЫ И ЗЕМЛИ

## POSSIBILITIES OF STUDYING THE LUNAR SOIL AND COMPARING THE COMPOSITIONS OF LUNAR AND TERRESTRIAL CLINOPYROXENES



**З. Ф. Голицына,**  
Институт геологии и минералогии  
им. В. С. Соболева СО РАН,  
г. Новосибирск  
zoe.zhurko@igm.nsc.ru

**Z. Golitsyna,**  
Sobolev Institute of Geology and  
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk



**А. А. Кирдяшкин,**  
Институт геологии и минералогии  
им. В. С. Соболева СО РАН,  
г. Новосибирск  
aak@igm.nsc.ru

**A. Kirdyashkin,**  
Sobolev Institute of Geology and  
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk

Рассмотрена проблема анализа состава внеземных кристаллических пород при изучении небесных тел. Так как большая часть тел, таких как планеты земной группы и окружающие их объекты, могут в своем составе содержать клинопироксены, возможно изучение P-T условий образования пород на определенных участках по состоянию данных минералов, причем исследования могут проводиться идентично геотермобарометрии земных пород. В статье представлены результаты экспериментальных исследований составов клинопироксенов базовой модельной системы  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  в диапазоне давлений 12...30 кбар и температур 1325...1650 °С, которые могут предполагаться в качестве условий образования и для лунных пород. Нарботка необходимых экспериментальных данных, полученных в земных условиях, поможет в дальнейшем проводить дистанционные исследования Луны и других небесных тел без необходимости доставки грунта на Землю. К обнаруженным клинопироксенам можно будет применить уже имеющиеся геотермометры и геобарометры, предназначенные для разных диапазонов P-T условий. Не исключена возможность создания нового геотермобарометра на основе распределения минералов или катионов в клинопироксене конкретно для лунных пород. Описаны функциональность и возможное приборное оснащение аппарата, предназначенного для исследования лунной поверхности. Исследование разных участков лунной поверхности позволит определить, где наиболее близко к поверхности расположены коренные лунные породы. Анализ их силикатных компонентов позволит приблизиться к решению вопроса об исходном составе мантии Луны и может способствовать дальнейшим исследованиям, посвященным проблемам ее происхождения и эволюции

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования; геотермобарометрия; клинопироксены; минеральная ассоциация; лунные породы; лунный аппарат; Земля; анализ, модельная система; дистанционные исследования

The problem of compositional analysis of extraterrestrial crystalline rocks in the study of celestial bodies is considered. Since most of the bodies, terrestrial planets and their surrounding objects may contain clinopyroxenes, it is possible to study the temperature and pressure of rock formation in certain areas according to the state of these minerals, and the studies can be carried out identically to the geothermobarometry of Earth rocks. The paper presents the results of experimental studies of clinopyroxene compositions of the basic model system  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  in the pressure range of 12...30 kbar and temperatures of 1325...1650 °C, which can be assumed as conditions for the formation of lunar rocks. The development of the necessary experimental data obtained in terrestrial conditions will help in the future to conduct remote studies of the Moon and other celestial bodies without the need to deliver soil to Earth. The revealed clinopyroxenes can be analyzed with existing geothermometers and geobarometers obtained for different ranges of P-T conditions. The possibility of creating a new geothermobarometer based on the distribution of minerals or cations in clinopyroxene specifically for lunar rocks is not excluded. The main features and possible instrumentation of the apparatus intended for the study of

the lunar surface are described. The study of different areas of the lunar surface will determine where the country rocks are located most closely to the surface. Analysis of silicate components of the lunar rocks will make it possible to get closer to the solution to the problem of initial composition of the lunar mantle

**Key words:** *experimental studies; geothermobarometry; clinopyroxenes; mineral association; lunar rocks; lunar apparatus; Earth; analysis; model system; remote studies*

**В**ведение. Статья развивает идеи, представленные на Всероссийском молодежном конкурсе научно-технических работ «Орбита молодежи-2019», проводившемся в 2019 г. Госкорпорацией «Роскосмос» и Балтийским государственным техническим университетом «ВОЕНМЕХ» им Д. Ф. Устинова [2].

В настоящее время все чаще возникает вопрос о добыче полезных ископаемых за пределами планеты Земля. Наибольший интерес из них представляет гелий-3, легкий изотоп гелия, который мог бы в перспективе использоваться в качестве топлива для термоядерных реакторов на Земле. Его использование могло бы оправдать цену полетов и доставки ценного груза, в частности, полезных ископаемых. Помимо полезных ископаемых, важен вопрос добычи воды на Луне для обеспечения стационарной базы, о перспективе постройки которой также периодически сообщается в новостях. Однако ограниченное количество информации о поверхности и внутреннем строении Луны является сдерживающим фактором. Чтобы заниматься разработкой площади, необходимо иметь ее детальное представление: состав, структуру горных пород, слагающих приповерхностные толщи.

Проблема изучения внеземных и, в частности, лунных пород заключается в их недоступности. Лишь отдельные фрагменты, доставленные на поверхность Земли, дают возможность заглянуть в столь удаленные участки. Анализируя подобные им образцы, можно получить некоторые данные и впоследствии использовать их как информативную основу. Образцы, искусственно полученные в лабораторных условиях, создаются с заданным соответствием той или иной лунной породе, поэтому становится возможным для каждой из них описать условия образования и условия равновесия.

Упростить задачу может исследование клинопироксенов – очень распространенных минералов в составе планет земной группы и

окружающих их небесных тел. Особенность этих минералов в том, что они входят в состав всех указанных космических объектов. Кроме того, это кристаллическое вещество удобно тем, что его анализ позволяет выявить не только генезис отобранной породы, но и определить температуру и давление для магматических образцов.

Обычно минералы подразделяются на минералы-термометры и минералы-барометры. Клинопироксен же можно использовать для определения сразу двух параметров – как давления, так и температуры, поскольку в них возможны изоморфные замещения катионов в нескольких независимых структурных позициях. Это дает возможность уменьшить количество экспериментов, проводимых для анализа образцов.

Именно поэтому исследование клинопироксенов может быть очень полезным при исследовании состава Луны и подробного его описания. Метод оценки ее состава по анализу состояния данных минералов на различной глубине ценен тем, что в перспективе может быть проведен автоматически, без необходимости доставки образцов грунта на Землю.

Однако, прежде чем понять, какие именно данные нужно измерять и как их интерпретировать, необходимо провести ряд экспериментов в лабораторных условиях на аналогичном минерале, доступном на Земле. На данный момент проведено экспериментальное исследование ликвидусных фазовых взаимоотношений в форстеритнормативной области фазовой диаграммы системы  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  в области давления 2,5...3,0 ГПа. Установлено существование двух перитектических реакций плавления. Продемонстрирована достаточность только одной фазы – клинопироксена, для определения температуры и давления образования минералов, входящих в состав породы [4; 7]. Это позволяет при исследовании внутреннего строения космического тела изучать структуру не всего грунта, входящего в со-

став, а только клинопироксена, как наиболее распространенного минерала, что и является предпосылкой к применению одних и тех же методов для изучения строения космических тел автоматизированными средствами, что позволит не готовить совершенно разную материально-техническую базу для различных тел, а использовать универсальное решение.

В статье (в таблицах) использованы следующие обозначения: An – анортит; CaEs – кальций-эсколаит, или кальциевая молекула Эскола ( $\text{Ca}_{0.5}\text{AlSi}_2\text{O}_6$ ); CaTs – кальций-чермакит (минал)  $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$ ; Cor – корунд; Crx – твердые растворы клинопироксенов; Di – диопсид ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ); En – энстатит; Glass – стекло; Gr – твердые растворы граната; Gross – гроссуляр; Pcp – протозенстатит; Pyr – пироп; Orx – ортопироксен.

*Геотермобарометрические исследования.* Земля превышает свой спутник по диаметру в четыре раза и в 80 раз по массе. Поэтому процессы дифференциации вещества совершенно отличны по длительности и по энергиям. Так, Луна, например, не может обладать такими же мощными оболочками, как Земля. Все те же процессы распределения вещества должны были пройти на Луне намного быстрее.

Земная кора жесткая и довольно мощная. Но на нижних ее границах и больших глубинах непрерывно происходят кристаллизационные процессы. Как правило, речь идет о выплавках из мантии, внедрившихся в коровое пространство. В зависимости от глубин кристаллизации образуются разные минеральные ассоциации. Самое значимое влияние на процесс минералообразования оказывают градиенты температур и давлений. Чтобы определить возможную минеральную ассоциацию, необходимо обратиться к схеме фаций, представленной, например, в работе [5]. В выбранных для того или иного случая диапазонах давлений и температур на схеме присутствует поле сосуществования конкретных минералов. Однако этот способ определения работает только для нормальных по щелочности и железистости составов. В иной ситуации, при рассмотрении щелочных или высокожелезистых пород, может понадобиться другая, более узконаправленная схема, где будут образовываться минералы, характерные для данного химического состава.

Исследования мантийного вещества, вынесенного на поверхность Земли, а также

лабораторные модели глубинных процессов позволяют создавать диаграммы описания фазового состояния вещества. На основе анализа кристаллохимических особенностей некоторых минералов, а именно клинопироксенов и гранатов, показано, что для изображения их составов достаточно трех параметров [3], которые в общем случае имеют вид:  $DO = (\text{MgO} + \text{CaO} + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{NiO} + \dots) + 1/4(\text{Na}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3) + 1/4(\text{K}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3)$ ;  $1/2(R_2O_3) = 1/2(\text{Al}_2O_3 + \text{Fe}_2O_3 + \text{Cr}_2O_3 + \dots) - (1/4(\text{Na}_2O + \text{Al}_2O_3) + 1/4(\text{K}_2O + \text{Al}_2O_3))$ ;  $XO_2 = \text{SiO}_2 + \text{TiO}_2$ .

На рис. 1а изображена модельная система CMAS ( $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ) в трехмерном пространстве. В такой системе невозможно рассчитывать составы минералов по компонентам. Однако при помощи суммирования однотипных компонентов составов пород и минералов в молекулярных пропорциях (см. приведенные равенства) становится возможным описать составы минералов с помощью трех названных независимых параметров и выполнить проекцию их составов на плоскость в виде треугольника (рис. 1б). Таким образом, система становится наглядной и позволяет правильно анализировать результаты.

В отношении геотермобарометрии минералы клинопироксены являются наиболее информативной фазой. Они встречаются во всех типах глубинных пород, а также имеют широчайшие вариации состава, что делает их универсальным индикатором физико-химических условий образования. Исследования [4; 7; 8] показали, что клинопироксены можно использовать для определения сразу двух параметров: как давления, так и температуры, поскольку в них возможны изоморфные замещения катионов в нескольких независимых структурных позициях. В системе  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  ассоциация  $\text{Crx+Orx+Gr}$  является дивариантной. Состав пироксенов для заданных значений температуры и давления описывается фиксированной точкой состава. В связи с этим существует вероятность найти способ определения температуры и давления по составу только одной фазы – клинопироксена. В свою очередь, это даст возможность уменьшить количество экспериментов, проводимых для анализа образцов, а также использовать мономинеральный геотермобарометр на регулярной основе.

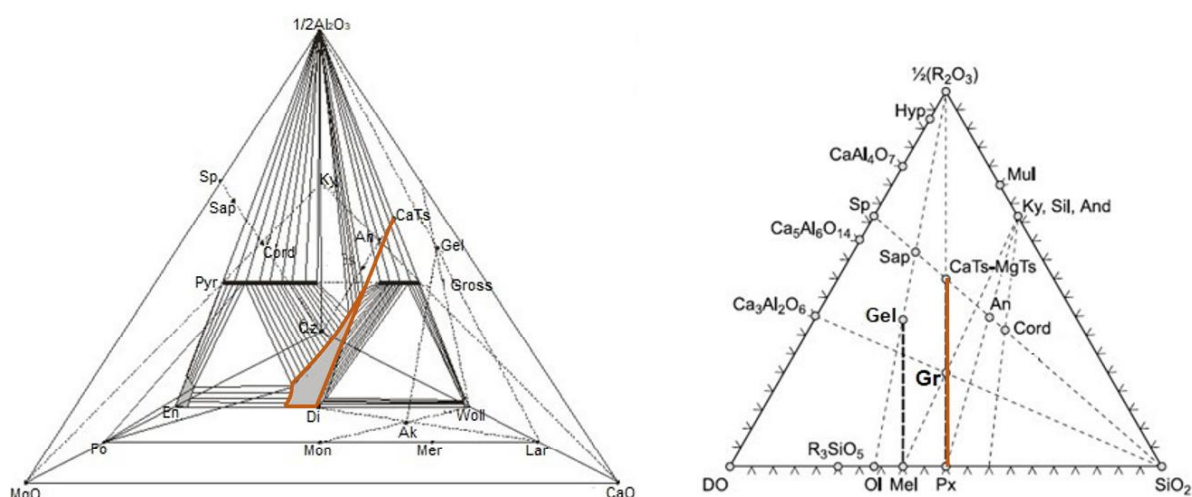


Рис. 1. Фазовые взаимоотношения и их проекция для модельной системы CMAS с использованием данных [3]. Оранжевым цветом показаны область образования клинопироксенов и ее проекция: а – фазовые взаимоотношения в системе  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ; б – проекция составов фаз на треугольник  $(\text{DO}) - 1/2(\text{R}_2\text{O}_3) - (\text{SiO}_2)$ . Ak – акерманит, And – андалузит, Cord – кордиерит, Fo – форстерит, Gel – геленит, Hyp – гиперстен, Ky – кианит, Lar – ларнит, Mel – меллилит, Mer – мервинит, MgTs – магний-чермакит ( $\text{MgAl}_2\text{SiO}_6$ ), Mon – монтичеллит, Mul – муллит, Ol – оливин, Px – пироксен, Qz – кварц, Sap – сапфирина, Sil – силлиманит, Sp – шпинель, Wol – волластонит / Fig. 1. Phase relations and their projection for the CMAS model system with the use of the data [3]. The area of clinopyroxene formation and its projection are shown in orange. а – phase relations in the  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  system; б – projection of phase compositions on the triangle  $(\text{DO}) - 1/2(\text{R}_2\text{O}_3) - (\text{SiO}_2)$ . Ak – ackermanite, And – andalusite, Cord – cordierite, Fo – forsterite, Gel – gehlenite, Hyp – hypersthene, Ky – kyanite, Lar – larnite, Mel – mellilite, Mer – merwinite, MgTs – magnesium-chermakite ( $\text{MgAl}_2\text{SiO}_6$ ), Mon – monticellite, Mul – mullite, Ol – olivine, Px – pyroxene, Qz – quartz, Sap – sapphire, Sil – sillimanite, Sp – spinel, Wol – wollastonite

Геотермометром для гранатовых лерцолитов Северного Лесото выступило соотношение  $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Mg})$  в клинопироксене, прокалиброванное при давлении 30 кбар [13]. В данном соотношении давление не учитывалось. В [14] в качестве геобарометра принята величина содержания глинозема в ортопироксене системы  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ . Однако позже экспериментально установлено, что кальциевый и железистый компоненты значительно снижают растворимость глинозема в ортопироксене, что дает завышенные оценки по давлению [7–9]. Подробный анализ лерцолитовой палеогеотермы проведен с помощью других геотермометров [7; 8], использовалась ассоциация  $\text{Srx}+\text{Orx}+\text{Gr}$ , которая является аналогом целой серии глубинных пород. В данном случае она также по силикатному составу подходит для описания глубинных пород Луны и других тел Солнечной системы.

Изучение распределения редких элементов, данные по температурам плавления. В ИЯФ СО РАН совместно с ИГМ СО РАН проведены анализы лунного грунта [10], доставленного с трех разных участков лун-

ной поверхности аппаратами: «Луной-16» из моря Изобилия, «Луной-20» из материковой области и «Луной-24» из моря Кризисов (рис. 2). Методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА-СИ), а также с помощью инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) изучалось распределение редких элементов – Rb, Sr, Y, Nb, Ba, La, Ce в лунных породах. Приповерхностные породы Луны представлены реголитом. Однако материал, из которого он образовывался, отчасти соответствует породам, слагающим лунную кору. Отобранный материал отражает главным образом воздействие экзогенных факторов, а химический состав является следствием крупномасштабных эндогенных процессов. Поэтому анализировали именно распределение элементов в лунных породах, и в меньшей степени рассматривали присутствующие минералы.

Данные по температурам образования и минералам силикатных компонентов лунного грунта представлены в табл. 1. Клинопироксен присутствует в образцах 1...4.



Рис. 2. Участки, откуда образцы лунного грунта доставлены на Землю /  
Fig. 2. The sites where samples of lunar soil were delivered from to the Earth

Таблица 1 / Table 1

Данные о силикатных компонентах / Silicate component data

Порода / Rock	Температура полного плавления, °С / Temperature of complete melting, °С
Габбро / Gabbro	1235
Анортозитовое габбро / Anorthosite gabbro	1434
Базальт / Basalt	1070
Анортозит – базальт / Anorthosite-basalt	1170
Анортозитовая порода / Anorthosite rock	1316
Моночастица анортита / Anorthite monocrystal	1451
Анортозит кристаллический / Crystal anorthosite	1385
Оливин монозерно / Olivine monocrystal	1342

\*Данные предоставил канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии ИГМ СО РАН В. А. Бобров / The data were provided by V. A. Bobrov, candidate of geology and mineralogy sciences, senior researcher of the Laboratory of Geochemistry of Radioactive Elements and Ecogeochemistry of IGM SB RAS

Можно полагать, что минерал клинопироксен является универсальным индикатором условий образования магматических горных пород как для Земли, так, вероятно, и для других планет земной группы. Дополнительные исследования зависимости состава клинопироксенов от температур и давлений полезны для создания универсальной геотермобарометрической информационной базы, применимой и для исследований лунных пород. В статье проанализированы составы клинопироксенов модельной системы  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  в диапазоне давлений 12...30 кбар и температур 1325...1650 °С. Можно предполагать, что такие  $P$ - $T$  условия

могут быть допустимыми и при образовании коренных лунных пород.

*Методика экспериментальных исследований.* Исходные вещества приготовлены в виде навесок из предварительно прокаленных оксидов ( $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ). Далее были приготовлены смеси, соответствующие стехиометрии  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$  (Di),  $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  (Gr) и  $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$  (CaTs) (табл. 2).

Полученные составы набирали в заданных пропорциях и подвергали плавлению при температурах 1325 ... 1650 °С. Образцы закаливали путем опускания платинового тигля в дистиллированную воду. В конечном итоге были получены прозрачные стекла.

Таблица 2 / Table 2

Условия приготовления и составы исходных веществ /  
Preparation conditions and compositions of the starting materials

Состав, мол. % / Composition, mol. %	Фазовый состав смеси и состав этих фаз, мол. % / Phase composition of the mixture and the composition of these phases, mol. %	Исходные компоненты/ Starting components	Метод приготовления: P, T, t / Preparation method: P, T, t
Di28,9En48,9CaTs22,2	Di+En+Cor	Di; En; Cor	Механическая смесь / Mechanical mixture
Di28,9En48,9CaTs22,2	Cpx+Opx+Gr; Gr=Pyr82,1Gros17,9; Cpx=Di29,2En47,7CaTs23,1	Di; En; Cor	25 кбар, 1500 °С, 5 ч.
Di28,9En48,9CaTs22,2 Di17En48CaTs35	Glass	Di; En; Cor	1 ат, 1600 °С, 1 ч
Di28,9En48,9CaTs22,2	Di+En+Gr; Gr=Pyr86Gros14	Di; En; Gr	Механическая смесь / Mechanical mixture
Di18,3En53,2CaTs28,6	Di+En+Gr; Gr=Pyr84Gros16	Di; En; Gr	Механическая смесь / Mechanical mixture
Di18,3En53,2CaTs28,6	Cpx+Opx+Gr; Gr=Pyr83,7Gros16,3; Cpx=Di52,5En32,5CaTs15,5	Di; En; Cor	25 кбар, 1450 °С, 10 ч
Di17En48CaTs35	Di+En+Gr; Gr=Pyr84Gros16	Di; En; Gr	Механическая смесь / Mechanical mixture
Di16En50CaTs34	Di+En+Cor	Di; En; Cor	Механическая смесь / Mechanical mixture
Di40Pyr60, мас. %	Di+Glass	Di; Glass (Pyr)	Механическая смесь / Mechanical mixture
Di30Pyr70, мас. %	Glass	Di; Glass (Pyr)	1 ат, 1600 °С, 1 ч

Эксперименты при высоком давлении проводили на аппарате высокого давления типа «поршень–цилиндр» методом закалки [1; 4]. Точность измерения температуры оценивается как  $\pm 1$  °С. Точность поддержания давления в ходе экспериментов составляет  $\pm 0,3$  кбар. После проведения эксперимента печь выключали и проводили закалку образцов путём опускания платинового тигля в дистиллированную воду. Вся процедура закалки до комнатной температуры по продолжительности не превышала 3 ... 5 с.

*Методика анализа продуктов эксперимента.* После опыта полученный образец извлекали из ампулы, делали поперечный скол и изготавливали двусторонне полированный шлиф с ориентировкой преимущественно вдоль вертикальной оси образца. Анализ фазовых взаимоотношений проводили изучением шлифа на поляризационном петрографическом микроскопе ПОЛАМ Л–211 и

Olympus BX51 с фотоприставкой. Анализ состава фаз проводили на электронном микроанализаторе “Comebax-Micro” и на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU с помощью спектрометра с энергетической дисперсией (система микроанализа Inca Energy 450 XMax 80 (Oxford Instruments) [6]. Дополнительно диагностику фаз выполняли по КР спектрам, которые были получены с помощью КР-спектрометра фирмы Jobin YVON. Эталоны спектров фаз взяты из базы данных: Database of Raman spectroscopy, X-ray diffraction and chemistry of minerals (<http://rruff.info/>).

*Результаты исследования и их обсуждение.* После опытов в образцах продиагностированы следующие фазы: Di, En, CaTs, Gr, Cor, Glass. В области солидуса образцы представлены мелкокристаллическими срастаниями фаз с размером зёрен 1 ... 3 мкм. Результаты экспериментов приведены в табл. 3. Показа-

ны данные только состава клинопироксена, целевого минерала. Приведены лишь самые информативные номера опытов, которые в

дальнейшем были использованы для оценки изменения составов в зависимости от температуры или давления.

Таблица 3 / Table 3

## Результаты экспериментов / Experimental results

Условия экспериментов / Experimental conditions					Состав клинопироксена, мол. % / Composition of clinopyroxene, mol. %			
Номер эксп. / Exp. number	P, кбар / P, kbar	T, °C	t, ч / t, h	Исходный набор фаз / Initial set of phases	Рентген / X-ray		Микроанализатор / Microanalyzer	
					CaTs	En	CaTs	En
1	30	1583	1	Di+Glass			29,0	59,1
2	28	1585	0,5	Glass			46,1	48,2
3	25	1532	2,5	Glass			32,7	55,3
5	25	1500	3	Di+Glass			36,2	46,0
8	25	1459	6	Di+Pen+Cor	34,1(2)	48,0(2)	30,2	45,6
9	25	1465	1	Di+Glass			20,6	42,2
10	20	1457	4	Di+Glass			18,2	44,5
11	20	1432	6	Di+Pen+Cor			22,7	31,2
13	29	1400	8,1	Di+Pen+Gr	14,5(2)	31,5(3)	11,2	31,3
15	29	1400	8,1	Glass	13,8(1)	32,3(2)	11,4	31,3
19	17,9	1400	9	Di+Pen+Gr	23,8(2)	33,5(2)	20,4	31,0
21	17,9	1400	9	Cpx+Opx+Gr	27,0(1)	36,3(1)	22,2	34,7
30	23,9	1300	8	Cpx+Opx+Gr	21,0(3)	24,1(3)	21,2	28,3
57	23	1100	10	Di+Pen+Gr	6,9(7)	12,2(3)	11,6	15,5
60	23	1100	10	Cpx+Opx+Gr	9,1(2)	10,2(6)	10,3	14,0
63	17,9	1100	40	Di+Pen+Gr	9,5(7)	14,3(2)	7,7312	18,0

В табл. 4 приведены результаты исследования составов клинопироксенов в зависимости от давлений и температур на электронном микроанализаторе. Можно наблюдать увеличение содержания энстатитового минала с ростом температуры. Содержание кальций-чермакита увеличивается с температурой и падает с ростом давления. Табл. 4 уже содержит в себе некоторую часть данных, по которым можно найти полином, используемый в качестве геотермобарометра для пород, содержащих клинопироксен и образованных в указанном диапазоне давлений и температур: 12 ... 30 кбар и 1325 ... 1650 °C. Чем больше данных используется при вычислении коэффициентов полинома,

тем точнее он будет давать результаты для давлений и температур. Поэтому не только по нашим лабораторным данным, но и по данным экспериментов других авторов [12; 15; 18] вычислены коэффициенты полинома, с помощью которого можно определить как температуру, так и давление по содержанию двух миналов в клинопироксене. Полином, аппроксимирующий зависимость состава клинопироксенов от давления и температуры, имеет вид:  $F = f_1 + f_2x + f_3y + f_4xy + f_5x^2y + f_6xy^2$ , где  $x$  – мол. %  $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$ ;  $y$  – мол. %  $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ;  $f_1 \dots f_6$  – полиномиальные коэффициенты, рассчитываемые на основе данных экспериментальных исследований клинопироксенов при различных  $P$ - $T$  параметрах.

Таблица 4 / Table 4

Результаты анализа состава клинопироксенов на электронном микроанализаторе (лабораторные данные) / Composition analysis results of clinopyroxenes on an electronic microanalyzer (laboratory data)

Номер эксп./ Exp. number	P, кбар / P, kbar	T, °C	Состав Cpx / composition of Cpx, %						
			мас. / wt.					мол. / mol.	
			CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Сумма	CaTs	En
2	28	1585	13,66	19,33	22,09	43,17	98,25	46,1	48,2
3	25	1532	11,54	22,71	15,35	49,59	99,19	32,7	55,3
5	25	1500	13,96	20,41	17,02	46,68	98,07	36,2	46
8	25	1459	14,18	21,62	14,31	49,65	99,76	30,2	45,6
10	20	1457	14,55	23,78	8,7	51,31	98,34	18,2	44,5
11	20	1432	17,56	19,91	10,52	51,03	99,02	22,7	31,2
19	17,9	1400	17,77	20,46	9,53	53,35	101,11	20,4	31
21	17,9	1400	16,82	20,85	10,38	51,14	99,19	22,2	34,7
30	23,9	1300	18,1	19,43	9,72	51,71	98,96	21,2	28,3
57	23	1100	21,31	18,8	5,3	53,72	99,13	11,6	15,5
60	23	1100	21,48	18,63	4,72	54,04	98,87	10,3	14
63	17,9	1100	20,61	19,96	3,5	54,66	98,73	7,7	18

Способы исследования лунных образцов. С помощью приведенного полинома можно вычислить недостающие данные, будь то давление или температура, или же состав клинопироксенов, к которым он применяется. К клинопироксенам, обнаруженным в лунных породах, можно применить уже имеющиеся геотермометры и геобарометры, предназначенные для разных диапазонов *P-T* условий.

Важным аспектом для реализации расчетов является наличие данных о материалах, в которых присутствует искомый минерал. При наличии возможности дистанционного изучения лунного грунта также возможна работа над интерпретацией данных в лабораторных условиях. Таким образом, можно попытаться исследовать лунные породы без транспортировки их на Землю, что, в любом случае, будет выгодно.

Спускаемый аппарат, изучающий лунную поверхность, должен иметь все те же характеристики, что и любой аппарат, изучающий поверхность внеземных тел. Прообразом такого аппарата может служить ровер, используемый для миссий ExoMars [11]. При этом аппарат, помимо собственно анализа грунта, может решать сразу несколько задач, среди которых:

- 1) исследование геологии приповерхностных областей Луны;
- 2) построение 2D и 3D карты местности;
- 3) каталогизация различных горных пород Луны;

4) отбор образцов горных пород, их дистанционный анализ на микроанализаторе и сканирующем электронном микроскопе;

5) потенциально может быть предусмотрена возможность доставки некоторых отобранных образцов на Землю в конце миссии.

С учетом оснащения аппарата [11] предполагаемое оборудование может быть следующим:

1) панорамная камера PanCam для выполнения цифрового картографирования лунной поверхности;

2) инфракрасный спектрометр (аналогичный спектрометру ISEM на марсоходе) для определения минералогического состава поверхностных объектов;

3) система камер CLUPI для получения цветных изображений, предназначенная для съемки горных пород, обнажений, образцов керн;

4) подповерхностный радиолокатор, аналогичный радиолокатору WISDOM, которым оснащен ExoMars, для определения структуры и происхождения лунного грунта;

5) нейтронный спектрометр ADRON-RM для поиска подземных вод и водосодержащих минералов. Он используется в сочетании с радиолокатором для изучения приповерхностного слоя под аппаратом и поиска подходящих участков для бурения и отбора проб;



6) мультиспектральная камера, аналогичная камере-спектрометру Ma\_MISS, для исследования состава горных пород;

7) спектрометр видимого и инфракрасного диапазонов MicrOmega для минералогических исследований;

8) рамановский спектрометр RLS для установления минералогического состава и определения органических пигментов;

9) анализатор органических молекул (аналогичный MOMA), предназначенный для выявления потенциальных биомаркеров.

Буровая установка предназначена для отбора образцов грунта на глубине не более 2 м. Ее основная функция состоит в том, чтобы пробурить грунт, получить образец керна (стандартным размером 1 см в диаметре × 3 см в длину), извлечь его и доставить во входное отверстие модуля полезной нагрузки аппарата, где образец будет подвергнут

химическому и минералогическому анализу в аналитической лаборатории. В бур встроен миниатюрный ИК-спектрометр (типа Ma\_MISS), предназначенный для исследования скважин.

Необходимое дополнительное оборудование (рис. 3):

1) буровая установка. Максимальная рабочая глубина бура не ограничена, зависит от технических возможностей. Образцы более глубоких пород, отобранные с использованием такой установки, могут оказаться наиболее информативными;

2) аппарат для шлифовки образцов и создания шашек для дальнейших анализов;

3) электронный микроанализатор “Cometax-Micro”;

4) сканирующий электронный микроскоп MIRA 3 LMU.

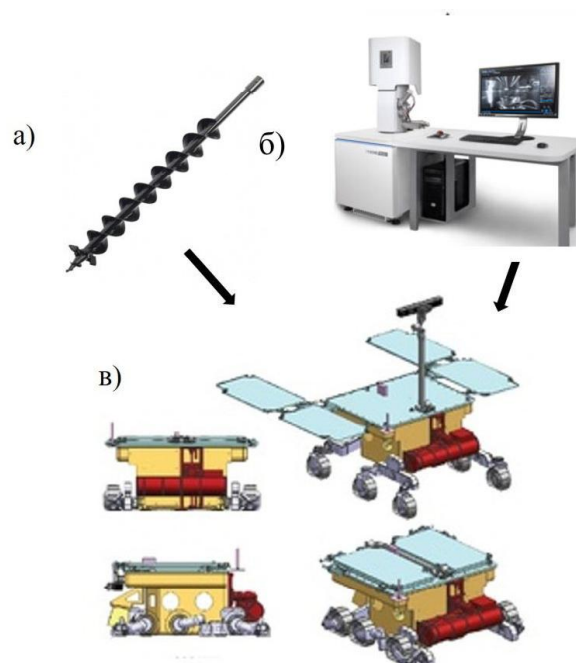


Рис. 3. Дополнительное техническое оснащение лунохода для исследования искоемых силикатных минералов: а – бур; б – сканирующий электронный микроскоп [16]; в – аппарат, передвигающийся по поверхности Луны, типа ExoMars [17] / Fig. 3. Additional technical equipment of the lunar rover for desired silicate minerals study. a – a drill; b – a scanning electron microscope [16]; c – an apparatus moving on the Moon surface – an ExoMars rover-type apparatus [17]

Отбор образцов рекомендуется осуществлять с более глубоких участков пород с целью минимизировать количество захваченного реголита. Дальнейшая обработка подразумевает испытание образца на прочность. Если он соответствует критериям твердости кристаллических пород, то он

должен быть в дальнейшем раздроблен, перетерт и спрессован в шашку. Отполированная поверхность позволит достаточно точно определить состав на встроенном микросонде или сканирующем микроскопе.

Полученные данные могут быть проинтерпретированы специалистами в лабо-

раториях. Таким образом, поверхность Луны может быть закартирована по составу пород. В дальнейшем такое картирование лунной поверхности может быть актуальным для построения стартовых площадок на Луне, стационарных баз или зон спуска аппаратов. Также данные исследований состава могут быть использованы для создания уточненной модели образования спутника Земли. Кроме того, все анализы можно проверять на наличие в образцах полезных ископаемых.

**Заключение.** Для изучения внеземных тел требуется особое техническое оснащение. Описано приблизительное строение аппарата, изучающего лунную поверхность и приповерхностные участки грунта. Аппарат сможет выполнять все поставленные перед ним задачи: оценивать поверхность в качестве фундамента под будущую стационарную лунную базу, исследовать грунт на предмет биомаркеров, искать возможные источники воды, отбирать коренные породы и изучать их состав для дальнейшей интерпретации геологии и генезиса спутника.

Рассмотрена возможность геотермобарометрии лунных магматических парагенезисов. Если в будущем представится возможность добыть глубинный лунный грунт, то для исследования клинопироксенов в лунных породах можно будет применить уже имею-

щиеся геотермометры и геобарометры для разных диапазонов  $P$ - $T$  условий.

Другим вариантом применения геологических методов исследования может быть создание конкретного уникального геотермобарометра на основе распределения миналов или катионов в клинопироксене конкретно для лунных пород. Также исследование разных участков лунной поверхности позволит определить, где наиболее близко к поверхности расположены коренные лунные породы. Анализ их силикатных компонентов поможет приблизиться к решению вопросов об исходном составе мантии Луны, процессах дифференциации вещества и в итоге будет способствовать дальнейшим исследованиям, посвященным проблемам происхождения и эволюции Луны.

Мы представили описание возможных задач, выполняемых лунным аппаратом, его основного и дополнительного оборудования. Технические характеристики лунного аппарата можно менять в зависимости от задачи. В процессе изучения каких-либо объектов лунной поверхности могут потребоваться дополнительные приборы. По мере поступления информации о приповерхностном составе и строении каждый новый лунный аппарат можно конструировать и оснащать дополнительным оборудованием в зависимости от дальнейших исследовательских запросов.

## Список литературы

1. Банушкина С. В., Сурков Н. В., Голицына З. Ф. Особенности плавления фаз в сечении диопсид – кальциевая молекула Эскола в интервале давлений 1 кгс/см<sup>3</sup> – 20 кбар // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25, № 7. С. 6–17.
2. Голицына З. Ф. Сопоставление составов клинопироксенов Луны и Земли для подтверждения сходного происхождения двух тел // Орбита молодежи: материалы Всерос. молодежн. конкурса науч.-техн. работ. Б-ка журн. «Военмех. Вестник БГТУ». 2019. № 60. С. 105–106.
3. Голицына З. Ф., Банушкина С. В., Сурков Н. В. Сопоставление составов кристаллических алюмосиликатных пород и слагающих эти породы минералов на плоской треугольной проекции // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 3. С. 3202–335.
4. Голицына З. Ф., Кирдяшкин А. А., Банушкина С. В. Геотермобарометрия лерцолитов на основе анализа составов клинопироксенов модельной системы CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 2. С. 14–22.
5. Добрецов Н. Л., Ревердатто В. В., Соболев В. С., Соболев Н. В., Хлестов В. В. Фации метаморфизма. М.: Недра, 1970. С. 224.
6. Лаврентьев Ю. Г., Карманов Н. С., Усова Л. В. Электронно-зондовое определение состава минералов: микроанализатор или сканирующий электронный микроскоп // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 8. С. 1473–1482.
7. Сурков Н. В. Лерцолитовая палеогеотерма // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века / под ред. А. Д. Савко, Н. Н. Зинчука. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2003. С. 430–433.

8. Сурков Н. В., Гартвич Ю. Г., Изох О. П. Устойчивость и фазовые взаимоотношения нестехиометрических клинопироксенов в сечении диопсид – “Са–молекула Эскола” при высоких давлениях // *Геохимия*. 2007. № 6. С. 632–642.
9. Сурков Н. В., Кузнецов Г. Н. Экспериментальное исследование устойчивости твердых растворов клинопироксенов в ассоциации  $Srx+Orx+Gr$  системы  $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$  // *Геология и геофизика*. 1996. Т. 37, № 12. С. 18–25.
10. Тарасов Л. С., Кудряшова А. Ф., Ульянов А. А., Бобров В. А., Вертман Е. Г., Барышев В. Б., Золотарев К. В. Совместное использование РФА-СИ и ИНАА методов для геохимической характеристики базальтов восточной окраины Луны // ИЯФ 96–42. Новосибирск: Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 1996. 31 с.
11. Robotic exploration of Mars. URL: <https://exploration.esa.int/web/mars> (дата обращения: 15.04.2021). Текст: электронный.
12. Akella J. Garnet pyroxene equilibria in the system  $CaSiO_3-MgSiO_3-Al_2O_3$  and in a natural mineral mixture // *American Mineralogist*. 1976. Vol. 61, no 7–8. P. 589–598.
13. Boyd F. R. A pyroxene geotherm // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1973. Vol. 37, no 12. P. 2533–2546.
14. MacGregor I. D. The system  $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ : solubility of  $Al_2O_3$  in enstatite for spinel and garnet peridotite compositions // *American Mineralogist*. 1974. Vol. 59, no 1–2. P. 110–119.
15. Perkins D., Newton R. C. The composition of coexisting pyroxene and garnet in the system  $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$  at 900–1100 °C and high pressures // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1980. Vol. 75, no 3. P. 291–300.
16. TESCAN SEM Solutions for Materials Science. URL: <https://www.tescan.com/product-portfolio/sem/sem-for-materials-science/> (дата обращения: 19.04.2021). Текст: электронный.
17. Planète Mars: toutes les missions en cours. URL: <https://spaceomatic.fr/mars-toutes-les-missions-en-cours/> (дата обращения: 15.04.2021). Текст: электронный.
18. Yamada H., Takahashi E. Subsolidus phase relations between coexisting garnet and two pyroxenes at 50 to 100 kbar in the system  $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$  // *Developments in Petrology*. Vol. 11B. Kimberlites II: The mantle and crust–mantle relationships. Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 247–255.

## References

1. Banushkina S. V., Surkov N. V., Golitsyna Z. F. *Vestnik Zabayskogo gosudarstvennogo universiteta* (Transbaikal State University Journal), 2019, vol. 25, no 7, pp. 6–17.
2. Golitsyna Z. F. *Orbita molodezhi* (Orbit of youth). St. Petersburg: Ustinov Baltic State Technical University “VOENMEH”, 2019, pp. 105–106.
3. Golitsyna Z. F., Banushkina S. V., Surkov N. V. *Geologiya i geofizika* (Russian Geology and Geophysics), 2018, vol. 59, no 3, pp. 322–335.
4. Golitsyna Z. F., Kiryashkin A. A., Banushkina S. V. *Vestnik Zabayskogo gosudarstvennogo universiteta* (Transbaikal State University Journal), 2020, vol. 26, no 2, pp. 14–22.
5. Dobretsov N. L., Reverdatto V. V., Sobolev V. S., Sobolev N. V., Khlestov V. V. *Fatsii metamorfizma* (Facies of metamorphism). Moscow: Nedra, 1970. p. 224.
6. Lavrentiev Yu. G., Karmanov N. S., Usova L. V. *Geologiya i geofizika* (Russian Geology and Geophysics), 2015, vol. 56, no 8, pp. 1473–1482.
7. Surkov N. V. *Problemy prognozirovaniya, poiskov i izucheniya mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh na poroge XXI veka* (Problems of forecasting, exploration and study of mineral deposits into the XXI century) / ed. Savko A. D., Zinchuk N. N. Voronezh: Voronezh State University Publishing House, 2003, pp. 430–433.
8. Surkov N. V., Gartvich Yu. G., Izokh O. P. *Geokhimiya* (Geochemistry International), 2007, no 6., pp. 632–642.
9. Surkov N. V., Kuznetsov G. N. *Geologiya i geofizika* (Russian Geology and Geophysics), 1996, vol. 37, no 12, pp. 18–25.
10. Tarasov L. S., Kudryashova A. F., Ulyanov A. A., Bobrov V. A., Vertman E. G., Baryshev V. B., Zolotarev K. V. *Sovmestnoe ispolzovanie RFA-SI i INAA metodov dlya geohimicheskoy karakteristiki bazaltov vostochnoy okrainy Luny* (Combined use of XRF-SI and INAA methods for geochemical characterization of basalts on the eastern edge of the Moon). Novosibirsk: Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, 1996. 31 p.
11. Robotic exploration of Mars. Available at: <https://exploration.esa.int/web/mars> (date of access: 15 April 2021). Text: electronic.
12. Akella J. *American Mineralogist* (American Mineralogist), 1976, vol. 61, no 7–8, pp. 589 – 598.
13. Boyd F. R. *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Geochimica et Cosmochimica Acta), 1973, vol. 37, no 12, pp. 2533–2546.

14. MacGregor I. D. *American Mineralogist* (American Mineralogist), 1974, vol. 59, no 1–2, pp. 110–119.
15. Perkins D., Newton R. C. *Contributions to Mineralogy and Petrology* (Contributions to Mineralogy and Petrology), 1980, vol. 75, no 3, pp. 291–300.
16. TESCAN SEM Solutions for Materials Science. Available at: <https://www.tescan.com/product-portfolio/sem/sem-for-materials-science/> (date of access: 19.04.2021). Text: electronic.
17. Planet Mars: all current missions. [Planète Mars: toutes les missions en cours]. Available at: <https://spaceomatic.fr/mars-toutes-les-missions-en-cours/> (date of access: 15.04.2021). Text: electronic.
18. Yamada H., Takahashi E. *Developments in Petrology. Vol. 11B. Kimberlites II: The mantle and crust–mantle relationships* (Developments in Petrology. Vol. 11B. Kimberlites II: The mantle and crust–mantle relationships). Amsterdam: Elsevier, 1984, pp. 247–255.

*Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при финансовой поддержке  
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации*

### Информация об авторе

*Голицына Зоя Фридриховна*, младший научный сотрудник лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: петрология, минералогия, кристаллография, экспериментальные исследования при высоких давлениях, физико-химический анализ  
zoe.zhurko@igm.nsc.ru

*Кирдяшкин Алексей Анатольевич*, д-р геол.-минерал. наук, профессор РАН, зав. лабораторией физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН; доцент кафедры общей и региональной геологии геолого-геофизического факультета, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: лабораторное и теоретическое моделирование геодинамических процессов, тектонофизика, геотектоника  
aak@igm.nsc.ru

### Information about the author

*Zoya Golitsyna*, research assistant, Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: petrology, mineralogy, crystallography, experimental investigations at high pressures, physico-chemical analysis

*Aleksey Kirdyashkin*, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, Russian Academy of Sciences, chief of the Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, associate professor, General and Regional Geology Section, Geology and Geophysics Department, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: laboratory and theoretical modeling of geodynamic processes, tectonophysics, geotectonics

### Для цитирования

*Голицына З. Ф., Кирдяшкин А. А. Возможности исследования лунного грунта и сопоставления составов клинопироксенов Луны и Земли // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 7. С. 6–17. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-7-6-17.*

*Golitsyna Z., Kirdyashkin A. Possibilities of studying the lunar soil and comparing the compositions of lunar and terrestrial clinopyroxenes // Transbaikal State University Journal, 2021, vol. 27, no. 7, pp. 6–17. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-7-6-17.*

Статья поступила в редакцию: 30.08.2021 г.  
Статья принята к публикации: 06.09.2021 г.