

УДК 550.311 + 532.593

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЯДРА ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗА И ТИТАНА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2023 г. А. Б. Медведев*

РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

*E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Поступила в редакцию 14.05.2023 г.

После доработки 06.09.2023 г.

Принята к публикации 03.10.2023 г.

С применением разработанных ранее уравнений состояния железа и титана рассчитана плотность ядра Земли при массовом содержании титана в смеси с железом ~20%. Это значение концентрации принято по данным для высокотитанистых НТ-базальтов, образование которых в крупных изверженных (магматических) провинциях гипотетически связано со всплытием в мантии от ядра к поверхности тепловых плюмов. Расчетные зависимости плотности во внешнем жидком и внутреннем твердом ядре удовлетворительно согласуются с данными геофизической модели PREM.

DOI: 10.31857/S0040364423060108

ВВЕДЕНИЕ

По современным представлениям основным компонентом ядра Земли является Fe (см. [1] и ссылки в этом обзоре). При характерных для ядра значениях давления $P \approx 135\text{--}360$ ГПа и температуры $T \approx 4000\text{--}6000$ К плотность ρ железа больше на $\approx 5\text{--}10\%$ плотности материала ядра, определяемой геофизической моделью PREM [2] (широко используемой при подобном сравнении). Это указывает на наличие в ядре добавочных “легких” компонентов. Обычно предполагается [1], что главными легкими добавками являются Si, S, O, C, H. При выборе добавки принципиально важно соответствие расчетной зависимости $\rho(P)$ рассматриваемой смеси с данными PREM. Применение для перечисленных веществ и Fe реалистичных уравнений состояния (УРС) позволяет достичь этого при определенной концентрации добавки (или их комбинации друг с другом). Вместе с тем в [1] отмечается, что вопрос о легкой добавке к Fe в ядре не является окончательно решенным и открыт для обсуждения.

В качестве значимой “тяжелой” добавки к Fe обычно рассматривается Ni. При его весовом содержании до 10% в (P, T) -условиях ядра плотность смеси Fe + Ni практически совпадает (отличие $\leq 0.5\%$) с плотностью Fe [1]. По этой причине в вопросе о влиянии легкой добавки на плотность рассматриваемой смеси Ni можно не учитывать. Это приближение используется далее.

В настоящей работе в качестве легкой добавки к Fe рассматривается Ti. Гипотеза о наличии Ti в

ядре содержится в [3–5]. Ее основанием являются существование на земной поверхности крупных изверженных (магматических) провинций (КИП), особенности состава их магм (лав) и современная концепция тепловых (термохимических) мантийных плюмов. Под плюмом понимается большая масса (в виде колонны) перегретого по отношению к мантийной среде преимущественно силикатного вещества, которая по причине ее относительно низкой плотности всплывает в мантии. К КИП относятся области Афар (Эфиопия–Йемен), Каро (юг Африки), Парана (Бразилия–Парагвай), Эмейшань (Китай) и др. Их площадь достигает $\sim 10^6$ км². Образование отдельной КИП обычно объясняется всплытием в мантии от ядра к коре (под КИП теплового плюма [1, 6–8]). Важной особенностью КИП является широкомасштабное излияние Fe–Ti-базальтов со значительно повышенным содержанием Ti и Fe. В [3–5] (и других работах авторов) обилие Ti и Fe в КИП связывается с присутствием этих элементов в ядре, откуда они переносятся плюмом к поверхности. Целью настоящей работы является проверка данной гипотезы о наличии Ti в ядре.

Тестирование гипотезы осуществлялось путем сопоставления расчетной зависимости $\rho(P)$ смеси Fe + Ti в ядре с данными PREM. Значение ρ при фиксированном P определялось на основе аддитивного приближения для удельного объема $1/\rho$ смеси Fe + Ti по отношению к удельным объемам Fe и Ti при заданном массовом содержании Ti в этой смеси. Удельные объемы Fe и Ti рассчи-

тывались с применением реалистичных в (P , T)-условиях ядра УРС этих компонентов.

Используемое аддитивное приближение в целом подтверждается экспериментальными данными по ударно-волновому сжатию смесевых веществ (см., например, [9], где приведены данные для 43 сплавов металлов при ударном $P \approx 10\text{--}500$ ГПа) и широко применяется при моделировании их поведения при повышенных значениях P , T [10–13]. Представленные в [1] результаты относительно легких добавок к Fe в ядре получены в этом приближении.

Выбор необходимого для расчетов значения концентрации Ti в ядре осуществлялся, исходя из следующего. Высокотитанистые базальты в подробно изученных КИП делятся на три типа [14]: LT, HT1 и HT2. Первый тип обладает сравнительно низким содержанием Ti и Fe, второй – высоким, третий – наибольшим. Согласно [15, 16], некоторые признаки HT2-базальтов (пространственная приуроченность к центру плюма, повышенное отношение $[^3\text{He}]/[^4\text{He}]$ и др.) указывают на их более тесную связь с материалом плюма по сравнению с HT1- и LT-базальтами, при формировании которых велика роль взаимодействия (теплого и смешения) вещества плюма с вмещающим его веществом мантии и коры (больше – для LT). С учетом этого здесь при расчете $\rho(P)$ значение массовой доли Ti в смеси Fe + Ti в ядре принималось равным массовой доле Ti в смеси Fe + Ti для наиболее высокотитанистых HT2-базальтов. Фактически такой подход предполагает, что плюм “захватывает” рассматриваемые компоненты ядра на границе мантии с ядром и переносит их без значимого изменения процентного отношения $[\text{Ti}]/[\text{Fe}]$ к поверхности, где они участвуют в образовании данного типа базальта (а также HT1- и LT-базальтов при взаимодействии материала плюма с вмещающим веществом). В ряде КИП HT-базальты не подразделялись на первый и второй типы. В этом случае значение α здесь определялось по этим сокращенным HT-данным.

При описании свойств Fe в (P , T)-условиях ядра используются различные подходы (см., например, [17–19]). То же относится к Ti [20, 21]. При-

менявшиеся здесь УРС Fe [22] и Ti [23] характеризуются далее.

Кроме Ti, другие легкие добавки к Fe в ядре в настоящей работе не учитываются.

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ

Массовая доля Ti в смесевой системе, компонентами которой являются Ti и Fe, равна

$$\alpha = \frac{M_{\text{Ti}}}{M_{\text{Fe}} + M_{\text{Ti}}} = \frac{\beta}{1 + \beta}, \quad (1)$$

где M_{Ti} , M_{Fe} – массы Ti и Fe в рассматриваемой системе; $\beta = M_{\text{Ti}}/M_{\text{Fe}}$.

Для базальтов приводятся экспериментальные данные о массовых долях x , y , z (вес. %) окислов TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO в образцах. Если в базальтах рассматривать только Ti и Fe, то на основе x , y , z входящая в (1) величина β рассчитывается по формуле

$$\beta = x \frac{A_{\text{Ti}}}{A_{\text{Fe}}} (A_{\text{Ti}} + 2A_{\text{O}})^{-1} \times [y/(A_{\text{Fe}} + A_{\text{O}}) + 2z/(2A_{\text{Fe}} + 3A_{\text{O}})]^{-1}, \quad (2)$$

где $A_{\text{Ti}} = 47.9$, $A_{\text{Fe}} = 55.85$, $A_{\text{O}} = 16$ – атомные массы Ti, Fe, O.

В таблице представлены средние значения x , y , z и соответствующие им значения α (1), (2) для названных во Введении КИП. В нее также включены данные [27] для КИП о. Гаити (Hispaniola). Согласно таблице, среднее $\alpha \approx 0.2$. В [26] для КИП Эмейшань приведены также данные для Fe–Ti-оксидов (максимальные параметры $x \approx 0.18$, $y \approx 0.65$, $z = 0$) и промежуточных между ними и HT-базальтами образцов. В обоих случаях $\alpha \approx 0.18$.

Далее, с учетом приведенных для КИП данных в качестве основного варианта при расчетах $\rho(P)$ в ядре используется значение $\alpha = 0.20$. Дополнительно рассматриваются случаи $\alpha = 0.15$ и 0.25 .

При расчете плотности для Fe применялось УРС, построенное на основе описанной в [22] модели, для Ti – УРС [23], построено на основе модели [28] (см. эту модель также в [29]).

Характеристики ряда КИП

КИП	x	y	z	α
Афар [14], HT2	0.041	0	0.139	0.20
Афар [16], HT2	0.045	0	0.14	0.22
Каро [16], HT2	0.03	0	0.12	0.18
Парана [24], HT	0.046	0.137	0	0.20
Парана [25], HT	0.04	0	0.16	0.18
Эмейшань [26], HT	0.05	0.18	0	0.18
Остров Гаити [27], HT	0.037	0.137	0	0.17

УРС Fe [22] является многофазным. При (P, T) -условиях ядра важны свойства жидкой l - и твердой ϵ -фаз. В [22, 30] показано хорошее (как правило, на уровне погрешности измерений) воспроизведение УРС этих свойств, данные о которых получены в экспериментах по статическому изотермическому и ударно-волновому сжатию Fe и др. Модельная температура плавления ϵ -Fe (приведена далее) в интервале давлений 100–300 ГПа отклоняется от экспериментальной [31] максимально на 200 К (см. сопоставление температур плавления в [30]). На рис. 1 приведены результаты двух дополнительных сопоставлений, касающихся свойств Fe при характерных для ядра давлениях. В [32] получены экспериментальные данные о плотности ϵ -Fe при $T = 298$ К до 350 ГПа. На рис. 1 показаны выполненная в [32] аппроксимация этих данных и модельная изотерма $T = 298$ К, согласно используемому здесь УРС Fe. Результаты практически совпадают в диапазоне $P_1 - P_3$ ($P_1 = 136$ ГПа, $P_3 = 364$ ГПа – давление на границе ядро–мантия и в центре ядра соответственно по модели PREM; $P_2 = 329$ ГПа – давление на границе внешнее–внутреннее ядро по PREM). На рис. 1 также представлены зависимости плотности l -Fe при $T = 5000$ К, согласно [33] и применяемому УРС. Первая является результатом экстраполяции данных о плотности l -Fe, полученных экспериментально [33] в области $P =$

$= 20-120$ ГПа, $T = 2600-4350$ К, до более высоких (P, T) -параметров. Видно согласие между двумя вариантами рассматриваемой изотермы $T = 5000$ К на уровне 2% по плотности.

В применяемом УРС Ti [23] в конденсированном состоянии учитываются жидкая и одна твердая фаза, которая осредненно отражает свойства отдельных твердых фаз. УРС хорошо воспроизводит эксперимент по ударному сжатию Ti. На рис. 1 показано описание УРС экспериментальных данных по плотности γ -, δ - и β -фаз Ti при $T = 298$ К (вертикальным пунктирным линиям на рис. 1 соответствуют давления переходов γ - δ и δ - β согласно [35]). В диапазоне $P = 120-300$ ГПа максимальное (при $P \approx 150$ ГПа) отклонение модельной плотности от экспериментальной составляет $\sim 2.5\%$.

При моделировании поведения вещества ядра зависимости $T(P)$ и $\rho(P)$ в нем обычно рассматриваются как изэнтропические, что соответствует наличию конвекции в ядре. Далее при модельном определении зависимости $\rho(P)$ предполагалось выполнение изэнтропичности для Fe и Ti по отдельности. Тогда в используемом здесь аддитивном приближении для удельного объема смеси Fe + Ti плотность рассчитывается по формуле

$$\rho(P) = \frac{1}{(1 - \alpha)/\rho_{Fe}(P) + \alpha/\rho_{Ti}(P)}, \quad (3)$$

где $\rho_{Fe}(P)$, $\rho_{Ti}(P)$ – плотности Fe и Ti вдоль изэнтроп, определяемые расчетным образом по УРС этих веществ. Эти изэнтропы строились с учетом того, что Fe является главным компонентом ядра и его свойствами преимущественно определяется давление $P_2 = 329$ ГПа на границе жидкое внешнее–твердое внутреннее ядро.

В применяемом подходе (как и в [9, 13]) при изменении P значения T компонентов не равны между собой (в отличие, например, от [11, 12]). Однако эта разница незначительна и слабо влияет на $\rho(P)$ (3) смеси. Для демонстрации этого ниже $\rho_{Ti}(P)$ -зависимости рассмотрены в двух отличающихся по T на 200 К вариантах *A* и *B*. Они практически совпадают. При фиксированной зависимости $T(P)$ Fe изменение на 200 К температуры Ti приводит к изменению на то же значение разницы T между Fe и Ti. При этом, поскольку различие зависимостей $\rho_{Ti}(P)$ мало, то малым является также и изменение $\rho(P)$ -зависимости (3). Оно незначительно и при изменении T больше, чем 200 К, так как в (3) α относительно мало (~ 0.2), что ослабляет влияние температуры Ti на $\rho(P)$ (3) по сравнению с ее влиянием на $\rho_{Ti}(P)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Давлению $P_2 = 329$ ГПа на модельной (по УРС) линии плавления Fe, показанной на рис. 2,

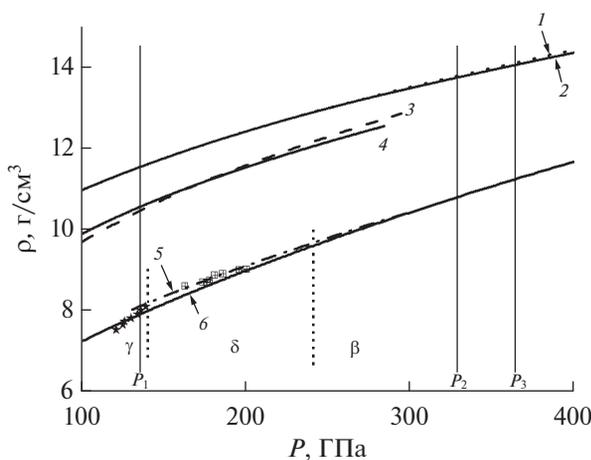


Рис. 1. Зависимости плотности от давления вдоль изотерм для Fe и Ti: ϵ -Fe при $T = 298$ К: 1 – аппроксимация экспериментальных данных [32], 2 – расчет по УРС Fe; l -Fe при $T = 5000$ К: 3 – экстраполяция экспериментальных данных [33], 4 – расчет по УРС Fe; Ti при $T = 298$ К: звездочки и квадраты – эксперимент [34] для γ - и δ -фаз, 5 – аппроксимация [35] экспериментальных данных для δ -фазы (также и данных [35] в интервале $P = 243-290$, где присутствует β -фаза), 6 – расчет по УРС Ti; сплошные вертикальные линии – давления P_1, P_2, P_3 .

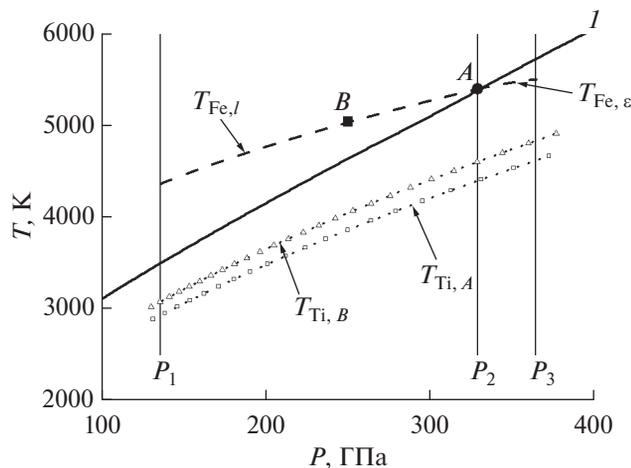


Рис. 2. Модельные зависимости температуры от давления на линии плавления ϵ -Fe (I), вдоль энтроп жидкого $T_{Fe,l}$ и твердого $T_{Fe,e}$ Fe и вдоль энтроп Ti $T_{Ti,A}$ и $T_{Ti,B}$, отвечающих (P, T) -параметрам в точках A и B ; зависимости для Ti сдвинуты по вертикали вниз на 1000 К.

отвечает $T = 5405$ К (точка A). (P, T) -параметрам в состоянии A соответствуют определяемые УРС Fe значение энтропии $S_{Fe,l}$ для l -Fe и значение $S_{Fe,e}$ для ϵ -Fe. Из условий $S_{Fe,l} = \text{const}$ и $S_{Fe,e} = \text{const}$ с помощью УРС Fe рассчитаны две зависимости $T_{Fe,l}(P)$ и $T_{Fe,e}(P)$ температуры Fe вдоль рассматриваемых энтроп (рис. 2). Первая зависимость в интервале $P_1 - P_2$ (внешнее жидкое ядро) отвечает l -Fe, вторая в интервале $P_2 - P_3$ (внутреннее твердое ядро) характеризует ϵ -Fe. Им соответствуют модельные зависимости плотности $\rho_{Fe,l}(P)$ для l -Fe и $\rho_{Fe,e}(P)$ для ϵ -Fe вдоль этих энтроп. Они представлены на рис. 3. Расчетные значения $\rho_{Fe,l}(P)$ при $P_1 = 136$ ГПа и $P_2 = 329$ ГПа составляют 10.63 и 12.97 г/см³ соответственно. Они близки к значениям 10.64 и 12.90 г/см³ для l -Fe при этих давлениях согласно [1].

Расчет энтропии Ti с помощью его УРС выполнен в двух вариантах. В первом варианте энтропия $S_{Ti,A}$ определялась по значениям P, T в состоянии A на рис. 2, отвечающим границе внешнее—внутреннее ядро. Эти параметры выше средних для Fe в ядре, примерно равных 250 ГПа, 5050 К (точка B на рис. 2). Во втором варианте $S_{Ti,B}$ определялась по значениям P, T в состоянии B . Расчетные энтропические зависимости температуры $T_{Ti,A}(P), T_{Ti,B}(P)$ показаны на рис. 2, энтропические зависимости плотности $\rho_{Ti,A}(P), \rho_{Ti,B}(P)$ — на рис. 3. Несмотря на разницу температур в 200 К в вариантах A и B , отвечающие этим вариантам распределения плотности Ti, практически совпада-

ют. Поэтому в качестве функции $\rho_{Ti}(P)$ в (3) может быть использована любая из этих зависимостей. По расчету A и B энтропы отвечают твердой фазе Ti. То же показывают УРС Ti из работ [20, 21]. Аналогичная ситуация имеет место, когда в качестве добавки к Fe ядра рассматривается углерод C, обладающий при характерных для ядра давлениях более высокой, чем Fe, температурой плавления [36]. Можно отметить, что, согласно УРС Ti [37], энтропы A и B соответствуют не твердой, а жидкой фазе (при монотонной экстраполяции кривой плавления этого УРС в область $P > 100$ ГПа).

На рис. 3 приведены зависимости $\rho(P)$ во внешнем и внутреннем ядре согласно модели PREM [2] и результаты настоящего расчета по (3) при $\alpha = 0.2$. Для жидкого ядра дополнительно показаны модельные зависимости при $\alpha = 0.15$ и 0.25 (для внутреннего ядра отклонение плотности при этих α от случая $\alpha = 0.2$ примерно такое же, как и для внешнего). Результаты расчета при $\alpha = 0.2$ хорошо согласуются с результатами модели PREM. В большей части внешнего ядра и во внутреннем ядре различие в плотности не превышает 1%. Максимальное отклонение (<2%) имеет место для внешнего ядра в интервале $P = 300 - 329$ ГПа.

Как отмечалось выше, вдоль изотермы $T = 298$ К экспериментальная плотность Ti больше расчетной по применяемому здесь УРС на ~2.5% при $P = 150$ ГПа (рис. 1). Поэтому, по-видимому, и вдоль энтропы Ti реальная плотность также несколько превышает расчетную при этом давлении (рис. 3). Если считать, что она, как и на изотерме $T = 298$ К, больше расчетной на ~2.5%, то это приводит к увеличению модельного значения

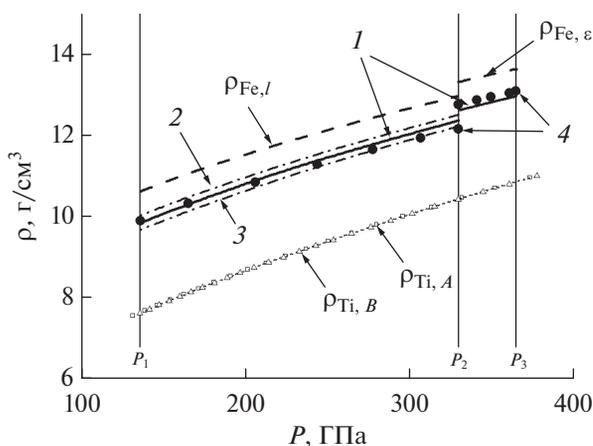


Рис. 3. Модельные зависимости плотности от давления вдоль энтроп жидкого $\rho_{Fe,l}$ и твердого $\rho_{Fe,e}$ Fe, вдоль энтроп Ti $\rho_{Ti,A}$ и $\rho_{Ti,B}$, в вариантах A и B (см. рис. 2) и в жидком и твердом ядре при массовой доле Ti $\alpha = 0.2$ (I), 0.15 (2), 0.25 (3); 4 — модель PREM [2].

$\rho(P)$ в ядре на $\sim 0.5\%$ вблизи $P = 150$ ГПа, т.е. изменение представленного на рис. 3 результата относительно мало.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе, исходя из гипотезы о наличии Ti в ядре Земли [3–5], выполнено определение зависимостей плотности от давления для смеси Fe + Ti во внешнем и внутреннем ядре с применением для Fe и Ti реалистичных уравнений состояния. При расчете использовано значение массовой доли Ti в смеси $\approx 20\%$, принятое по данным для высокотитанистых НТ-базальтов. Полученные зависимости близки к зависимостям геофизической модели PREM. Это указывает на присутствие в ядре Ti с данной концентрацией в качестве легкой добавки к Fe. В рассмотренном модельном варианте влияние других легких добавок незначительно. Повышение их содержания приводит к снижению 20%-ной доли Ti. Не исключено, что связь между отношением $[Ti]/[Fe]$ в НТ-базальтах и ядре не является прямой. Возможно также некоторое влияние на результат неточности использованного аддитивного приближения. Обе причины могут снизить полученную здесь концентрацию. Тем не менее представляется, что с учетом обогащенности КИП титаном и предполагаемой обусловленностью КИП всплытием от ядра плюмов наличие Ti в ядре следует принимать во внимание. Рассчитанные здесь изэнтропии Ti могут быть полезны при учете доли Ti в ядре в модельных вариантах, отличных от рассмотренного в настоящей работе. Также при моделировании свойств ядра можно использовать как весьма правдоподобные изэнтропические зависимости Fe, полученные здесь с помощью адекватного экспериментальным данным многофазного УРС. В более строгом подходе по сравнению с примененным в работе требуется определенность P – T – α -диаграммы сплава Fe + Ti при (P , T)-условиях ядра. Она не известна. Диаграмма исследована только при $P = 1$ атм [38].

Автор благодарен А.М. Подурцу и рецензенту за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dehant V., Campuzano S.A., de Santis A.D., van Westrenen W.* Structure, Materials, and Processes in the Earth's Core and Mantle // *Surveys in Geophysics*. 2022. V. 43. № 1. P. 263.
2. *Dziewonski A.M., Anderson D.L.* Preliminary Reference Earth Model // *Phys. Earth Planet Inter.* 1981. V. 25. P. 297.
3. *Bogatikov O.A., Sharkov E.V.* Irreversible Evolution of Tectono-magmatic Processes at the Earth and Moon: Petrological Data // *Petrology*. 2008. V. 16. № 7. P. 629.
4. *Шарков Е.В., Богатиков О.А.* Проблема эволюции ядра Земли: геолого-петрологические и палеомагнитные свидетельства // *Докл. РАН*. 2015. Т. 462. № 3. С. 346.
5. *Шарков Е.В., Богина М.М., Чистяков А.В., Злобин В.Л.* Эволюция крупных изверженных провинций в истории Земли (на примере восточной части Балтийского щита) // *Вулканология и сейсмология*. 2020. № 5. С. 51.
6. *Грачев А.Ф.* Мантийные плюмы и проблемы геодинамики // *Физика Земли*. 2000. № 4. С. 3.
7. *Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А.* Глубинная геодинамика Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. С. 408.
8. *Campbell I.H.* Large Igneous Provinces and the Mantle Plume Hypothesis // *Elements*. 2005. V. 1. P. 265.
9. *Белякова М.Ю., Жерноклетов М.В., Сутулов Ю.Н., Трунин Р.Ф.* Ударное сжатие металлических сплавов // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1991. № 1. С. 99.
10. *Чарахчьян А.А., Милявский В.В., Хищенко К.В.* Применение моделей смеси для анализа ударно-волновых экспериментов с неполным фазовым превращением // *ТВТ*. 2009. Т. 47. № 2. С. 254.
11. *Маевский К.К.* Численное моделирование термодинамических параметров углерода // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 5. С. 701.
12. *Маевский К.К.* Численное моделирование термодинамических параметров германия // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 6. С. 837.
13. *Militzer B., Gonzalez-Cataldo F., Zhang S., Driver K.P., Soubiran F.* First-principles Equation of State Database for Warm Dense Matter Computation // *Phys. Rev. E*. 2021. V. 103. 013203.
14. *Pik R., Deniel K., Coulon C., Yirgu G., Hofmann C., Ayalew D.* The Northwestern Ethiopian Plateau Flood Basalts: Classification and Spatial Distribution of Magma Types // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1998. V. 81. P. 91.
15. *Natali C., Beccaluva L., Bianchini G.G., Ellam R.M., Savo A.G., Siena F., Stuart F.M.* High-MgO Lavas Associated to CFB as Indicators of Plume-related Thermochemical Effects: The Case of Ultra-Titaniferous Picrite-basalt from the Northern Ethiopian–Yemeni Plateau // *Gondwana Res.* 2016. V. 34. P. 29.
16. *Natali C., Beccaluva L., Bianchini G.G., Siena F.* Comparison Among Ethiopia-Yemen, Deccan, and Karoo Continental Flood Basalts of Central Gondwana: Insights on Lithosphere Versus Asthenosphere Contributions in Compositionally Zoned Magmatic Provinces. In: *The Crust-Mantle and Lithosphere–Asthenosphere Boundaries: Insights from Xenoliths, Orogenic Deep Sections, and Geophysical Studies* / Ed. by Bianchini G., Bodinier J.-L., Braga R., Wilson M. Geological Society of America, 2017. Spec. Paper 526.
17. *Фунтиков А.И.* Фазовая диаграмма и кривая плавления железа, полученные по данным статических и ударно-волновых измерений // *ТВТ*. 2003. Т. 41. № 6. С. 954.
18. *Подурец М.А.* О плавлении железа в ударной волне // *ТВТ*. 2000. Т. 38. № 6. С. 895.
19. *Fortov V.E., Lomonosov I.V.* Shock Waves and Equations of State of Matter // *Shock Waves*. 2010. V. 20. P. 53.
20. *Kerley G.I.* Equations of State for Titanium and Ti6Al4V Alloy. Sandia National Laboratories Report SAND 2003-3785, October 2003.
21. *Елькин В.М., Михайлов В.Н., Михайлова Т.Ю.* Полуэмпирическое уравнение состояния твердых α -, ω -

- β -фаз титана и жидкости с учетом испарения // ВАНТ. Сер. Теор. и прикл. физика. 2017. Вып. 1. С. 28.
22. *Медведев А.Б.* Широкодиапазонное многофазное уравнение состояния железа // ФГВ. 2014. Т. 50. № 5. С. 91.
 23. *Трунин Р.Ф., Симаков Г.В., Медведев А.Б.* Сжатие титана в ударных волнах // ТВТ. 1999. Т. 37. № 6. С. 881.
 24. *Gibson S.A., Thompson R.N., Dickin A.P., Leonardos O.H.* Erratum to “High-Ti and Low-Ti Mafic Potassic Magmas: Key to Plume–Lithosphere Interactions and Continental Flood–basalt Genesis” // Earth Planet. Sci. Lett. 1996. V. 141. P. 325.
 25. *Machado F.B., Rocha-Junior E.R.V., Marques L.S., Nardy A.J.R., Zizzo L.V., Marteleto N.S.* Geochemistry of the Northern Parana Continental Flood Basalt (PCFB) Province: Implications for Regional Chemostratigraphy // Brazil. J. Geology. 2018. V. 48. № 2. P. 177.
 26. *Xie-Yan Song, Hua-Wen Qi, Rui-Zhong Hu, Lie-Meng Chen, Song-Yue Yu.* Formation of Thick Stratiform Fe–Ti Oxide Layers in Layered Intrusion and Frequent Replenishment of Fractionated Mafic Magma: Evidence From the Panzhihua Intrusion, SW China // Geochem. Geophys. Geosyst. 2013. V. 14. P. 712.
 27. *Escuder-Virueite J., Perez-Estaun A., Contreras F., Joubert M., Weis D., Ullrich T.D., Spadea P.* Plume Mantle Source Heterogeneity Through Time: Insights from the Duarte Complex, Hispaniola, Northeastern Caribbean // J. Geoph. Res. 2007. V. 112. B04203.
 28. *Медведев А.Б.* Модель уравнения состояния с учетом испарения, ионизации и плавления // ВАНТ. Сер. Теор. и прикл. физика. 1992. Вып. 1. С. 12.
 29. *Медведев А.Б., Трунин Р.Ф.* Ударное сжатие пористых металлов и силикатов // УФН. 2012. Т. 182. Вып. 8. С. 829.
 30. *Медведев А.Б.* Об испарении железа после ударного сжатия // ФГВ. 2022. Т. 58. № 6. С. 100.
 31. *Sinmyo R., Hirose K., Ohishi Y.* Melting Curve of Iron to 290 GPa Determined in a Resistance-heated Diamond-anvil Cell // Earth Planet. Sci. Lett. 2019. V. 510. P. 45.
 32. *Hirao N., Akahama Y., Ohishi Y.* Equations of State of Iron and Nickel to the Pressure at the Center of the Earth // Matter Radiat. Extremes. 2022. V. 7. 038403.
 33. *Kuwayama Y., Morard G., Nakajima Y., Hirose K., Baron A.Q.R., Kawaguchi S.I., Tsuchiya T., Ishikawa D., Hirao N., Ohishi Y.* Equation of State of Liquid Iron under Extreme Conditions // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. 165701.
 34. *Dewaele A., Stutzmann V., Bouchet J., Bottin F., Occelli F., Mezouar M.* High Pressure-temperature Phase Diagram and Equation of State of Titanium // Phys. Rev. B. 2015. V. 91. 134108.
 35. *Akahama Y., Kawaguchi S., Hirao N., Ohishi Y.* Observation of High-pressure BCC Phase of Titanium at 243 GPa // J. Appl. Phys. 2020 V. 128. 035901.
 36. *Eggert J.H., Hicks D.G., Celliers P.M., Bradley D.K., McWilliams R.S., Jeanloz R., Miller J.E., Boehly T.R., Collins G.W.* Melting Temperature of Diamond at Ultrahigh Pressure // Nature Phys. 2010. V. 6. P. 40.
 37. *Pecker S., Eliezer S., Fisher D., Henis Z.* A Multiphase Equation of State of Three Solid Phases, Liquid, and Gas for Titanium // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. 043516.
 38. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Спр. в 3-х т. Т. 2 / Под общ. ред. Лякишева Н.П. М.: Машиностроение, 1997. С. 1024.