

---

КРАТКИЙ  
СПРАВОЧНИК  
ПО  
ГЕОХИМИИ

---

---

---

КРАТКИЙ  
СПРАВОЧНИК  
ПО  
ГЕОХИМИИ

---

---

550.4(031)

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,  
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

2067



МОСКВА, «НЕДРА», 1977



Краткий справочник по геохимии. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Недра», 1977. ... с. Авт.: Г. В. Войткевич, А. Е. Мирошников, А. С. Поваренных, В. Г. Прохоров.

В справочнике собраны и систематизированы основные данные современной геохимии. Приведены общие сведения о Земле и других планетах Солнечной системы. Большое внимание уделено распространенности химических элементов в различных горных породах, природных водах, растениях и почвах. Приведены данные по геохимии изотопов и ядерной геохронологии; критерия и методы температурных условий образования минералов; промышленно-экономические данные по месторождениям большинства элементов.

Книга рассчитана на геохимиков, минералогов, геологов.

Табл. 117, ил. 18, список лит. — 313 назв.

Авторы: Г. В. Войткевич, А. Е. Мирошников, А. С. Поваренных, В. Г. Прохоров.

## ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

---

Первое издание справочника, вышедшего в 1970 г., разошлось очень быстро. С тех пор прошло немного времени, но потребность в использовании геохимических данных при поисковых и научно-исследовательских работах неуклонно возрастала. За этот же период накопились многочисленные данные по составу многих природных образований. Существенно расширились наши сведения о составе метеоритов. Значительно более полными стали данные космохимии в целом в связи с исследованием Солнечной системы космическими аппаратами. Эти исследования привели к дальнейшему сближению проблем геохимии и космохимии.

Учитывая вышесказанное, авторы-составители подготовили второе издание справочника. В нем главы «Атомы и ионы в геохимии» и «Некоторые физические свойства элементов, минералов и горных пород» объединены в одну под названием «Свойства элементов, минералов и горных пород». Некоторые устаревшие таблицы устранены и заменены новыми. Обновлены списки литературы.

## ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

---

---

Прогресс во многих разделах современного естествознания связан с измерением точных числовых значений определенных величин, которыми оперирует данная наука.

Геохимия как наука об атомах нашей планеты и их истории немислима без использования и учета точных количественных данных, без применения ряда констант, выражающих свойства химических элементов и их природных соединений.

Возникновение геохимии как новой науки о Земле стало возможным после накопления трудами многих исследователей определенного количества эмпирических числовых данных. Далеко не случайно первая крупная сводка по геохимии Ф. Кларка носила название «Data of Geochemistry», которое само подчеркивало в первую очередь значение количественных данных в геохимии. С тех пор количество новых геохимических данных необозримо выросло и они качественно уточнились. Возникли совершенно новые разделы геохимии, связанные с успехами науки в области строения вещества.

В процессе работы авторы неоднократно сталкивались с тем, что числовые данные, относящиеся к геохимии, рассеяны в различных источниках. Между тем сводка геохимических данных сейчас особенно необходима в связи с необычайным расширением геохимических работ и широким внедрением геохимии в практику геологопоискового и геологоразведочного дела. Кроме того, справочник по геохимии нужен для научной работы геологам, геофизикам, петрографам, литологам, минералогам. Учитывая это, авторы собрали наиболее важные сведения по геохимии и систематизировали их в данном справочнике.

Цель настоящей книги — дать ту количественную основу, на которой базируется здание современной геохимии.

В процессе составления справочника авторы получили ценные советы и методические указания со стороны рецензентов академика А. П. Виноградова, В. В. Щербины, А. И. Перельмана и выражают им глубокую благодарность. Авторы считают приятным долгом выразить благодарность Н. И. Панкратовой и А. Ф. Желтовой за техническую помощь в составлении справочника.

# Глава I

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗЕМЛЕ

### РАЗМЕРЫ ЗЕМЛИ

Фигуру Земли в первом приближении можно считать шаром. Во втором, более точном приближении фигуру нашей планеты можно принять за сфероид — эллипсоид вращения с малым сжатием в направлении полюсов. В третьем приближении (по результатам точных геодезических исследований) к истинной фигуре Земли лучше всего подходит трехосный эллипсоид с двумя почти равными экваториальными осями и меньшей полярной осью. В окончательном виде истинная фигура Земли представляет собой геоид — неправильное тело, близкое к сфероиду.

Земной сфероид характеризуют параметры:  $a$  — большая полуось (радиус экватора),  $b$  — малая полуось (полярный радиус), сжатие Земли  $\alpha = (a - b)/a$ . Наибольшее применение в геофизике и геодезии нашли три модели земного сфероида: 1) сфероид Бесселя, который в отдельных случаях используется и сейчас, был предложен в 1841 г.; 2) международный сфероид, вычисленный Хейфордом на основании геодезических измерений в США, был рекомендован Международным геодезическим съездом в Мадриде в 1924 г.; 3) советский сфероид, вычисленный Центральным научно-исследовательским институтом геодезии, аэросъемки и картографии (Ф. Н. Красовским, А. А. Изотовым и М. С. Молоденским) на основании геодезических измерений в СССР, Западной Европе и США. Данные этих сфероидов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры земного сфероида

| Модель сфероида     | $a$ , м   | $b$ , м   | $\alpha$   |
|---------------------|-----------|-----------|------------|
| Сфероид Бесселя     | 6 377 397 | 6 356 079 | 1 : 299,15 |
| Сфероид Хейфорда    | 6 378 388 | 6 356 909 | 1 : 297    |
| Сфероид Красовского | 6 378 245 | 6 356 863 | 1 : 298,3  |

В СССР с 1926 г. для картографических работ принимался сфероид Бесселя. Но в 1946 г. Совет Министров СССР принял решение о переводе всех геодезических и картографических работ на новый сфероид Красовского.

#### Дополнительные данные для сфероида Красовского

Средний радиус 6371,22 км  
 Длина окружности экватора 40 075,696 км  
 Поверхность Земли 510 000 000 км<sup>2</sup>  
 Поверхность суши 149 000 000 км<sup>2</sup> (29% всей поверхности Земли)  
 Водная поверхность 361 000 000 км<sup>2</sup> (71% всей поверхности Земли)  
 Объем Земли 1,083320 · 10<sup>12</sup> км<sup>3</sup>  
 Критическая скорость освобождения тел 11,2 км/с  
 Линейная скорость точки на экваторе 465 м/с  
 Средняя скорость движения Земли по орбите 29,76 км/с (100 000 км/ч)

### ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЗЕМЛИ И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ

Все способы подсчета массы Земли основаны на законе всемирного тяготения. В настоящее время данные относительно массы и средней плотности Земли оцениваются следующими величинами: масса Земли  $M = 5,974 \cdot 10^{27}$  г; средняя

плотность Земли  $d = 5,517 \pm 0,004 \text{ г/см}^3$ ; средняя плотность верхней литосферы  $d = 2,65 \text{ г/см}^3$ .

Расхождение между средней плотностью Земли и сравнительно легкой верхней зоной твердых пород послужило первым указанием на наличие в недрах нашей планеты плотного ядра.

Распределение ускорения силы тяжести на поверхности Земли определяется ее фигурой и вращением. Первую формулу характеристики нормального поля силы тяжести на поверхности Земли дал А. Клеро. Распределение ускорения силы тяжести для советского сфероида с использованием данных по континентам и морским станциям по подсчетам А. А. Изотова выражается формулой

$$g_{\varphi} = 978,045 (1 + 0,0053026 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi),$$

где  $\varphi$  — широта точки.

Стандартное ускорение силы тяжести равно  $980,665 \text{ см/с}^2$ , или  $980\,665 \text{ мгал}$ ; ускорение силы тяжести на экваторе равно  $978\,045 \text{ мгал}$ , на широте  $45^\circ$  —  $980\,616$  и на полюсе  $983\,235 \text{ мгал}$ .

С глубиной величина ускорения силы тяжести увеличивается, достигая на определенной глубине максимума, затем падает к центру Земли, а в самом центре приобретает нулевое значение. Для одной из моделей строения Земли (Haddon and Bullen, 1969) изменение величины ускорения силы тяжести с глубиной показано в табл. 2.

Таблица 2

Внутреннее строение и свойства Земли по Р. Хаддону и К. Буллену

| Оболочка            | Глубина, км | Давление, $10^{11}$ Па | Плотность, $\text{г/см}^3$ | Ускорение силы тяжести, $\text{см/с}^2$ | Скорость сейсмических волн, км/с |              |
|---------------------|-------------|------------------------|----------------------------|---|----------------------------------|--------------|
|                     |             |                        |                            |   | продольных P                     | поперечных S |
| Кора                | 0           | 0,000                  | 2,650                      | 982,1                                   | 6,300                            | 3,550        |
|                     | 15          | 0,004                  | 2,840                      | 983,2                                   | 6,300                            | 3,550        |
| Раздел Мохоровичича |             |                        |                            |   |                                  |              |
| Мантия              | 60          | 0,019                  | 3,332                      | 984,7                                   | 7,831                            | 4,625        |
|                     | 100         | 0,032                  | 3,348                      | 986,1                                   | 7,951                            | 4,500        |
|                     | 200         | 0,065                  | 3,387                      | 989,6                                   | 8,256                            | 4,500        |
|                     | 300         | 0,099                  | 3,424                      | 993,4                                   | 8,585                            | 4,500        |
|                     | 350         | 0,116                  | 3,441                      | 995,5                                   | 8,750                            | 4,500        |
|                     | 350         | 0,116                  | 3,700                      | 995,5                                   | 8,750                            | 4,500        |
|                     | 400         | 0,135                  | 3,775                      | 996,4                                   | 8,924                            | 4,717        |
|                     | 413         | 0,140                  | 3,795                      | 996,6                                   | 8,970                            | 4,774        |
|                     | 500         | 0,174                  | 3,925                      | 997,5                                   | 9,650                            | 5,150        |
|                     | 600         | 0,213                  | 4,075                      | 998,6                                   | 10,243                           | 5,583        |
|                     | 650         | 0,234                  | 4,150                      | 998,7                                   | 10,481                           | 5,800        |
|                     | 650         | 0,234                  | 4,200                      | 998,7                                   | 10,481                           | 5,900        |
|                     | 800         | 0,298                  | 4,380                      | 997,8                                   | 11,009                           | 6,149        |
|                     | 984         | 0,380                  | 4,529                      | 996,0                                   | 11,420                           | 6,351        |
|                     | 1000        | 0,387                  | 4,538                      | 995,8                                   | 11,440                           | 6,362        |
|                     | 1200        | 0,478                  | 4,655                      | 994,3                                   | 11,706                           | 6,500        |
|                     | 1400        | 0,572                  | 4,768                      | 993,7                                   | 11,992                           | 6,622        |
|                     | 1600        | 0,668                  | 4,877                      | 994,5                                   | 12,262                           | 6,730        |
| 1800                | 0,766       | 4,983                  | 997,1                      | 12,534                                  | 6,829                            |              |
| 2000                | 0,867       | 5,087                  | 1002,1                     | 12,794                                  | 6,924                            |              |
| 2200                | 0,970       | 5,188                  | 1010,2                     | 13,034                                  | 7,018                            |              |
| 2400                | 1,076       | 5,288                  | 1022,3                     | 13,270                                  | 7,117                            |              |
| 2600                | 1,187       | 5,387                  | 1039,3                     | 13,495                                  | 7,214                            |              |
| 2800                | 1,301       | 5,487                  | 1062,6                     | 13,638                                  | 7,312                            |              |
| 2878                | 1,347       | 5,527                  | 1073,8                     | 13,642                                  | 7,310                            |              |
| 2878                | 1,347       | 9,927                  | 1073,8                     | 8,106                                   | —                                |              |

| Оболочка          | Глубина, км | Давление,<br>$10^{11}$ Па | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Ускорение<br>силы тяжести,<br>см/с <sup>2</sup> | Скорость сейсмических волн, км/с |              |
|-------------------|-------------|---------------------------|---------------------------------|---|----------------------------------|--------------|
|                   |             |                           |                                 |   | продольных P                     | поперечных S |
| Раздел Гутенберга |             |                           |                                 |   |                                  |              |
| Внешнее ядро      | 3000        | 1,476                     | 10,121                          | 1046,7  | 8,247                            | —            |
|                   | 3200        | 1,686                     | 10,421                          | 999,6   | 8,496                            | —            |
|                   | 3400        | 1,892                     | 10,697                          | 949,5   | 8,791                            | —            |
|                   | 3600        | 2,092                     | 10,948                          | 896,7   | 9,059                            | —            |
|                   | 3800        | 2,284                     | 11,176                          | 841,4   | 9,307                            | —            |
|                   | 4000        | 2,467                     | 11,383                          | 783,9   | 9,531                            | —            |
|                   | 4200        | 2,640                     | 11,570                          | 724,4   | 9,731                            | —            |
|                   | 4400        | 2,802                     | 11,737                          | 663,0   | 9,907                            | —            |
|                   | 4600        | 2,951                     | 11,887                          | 600,0   | 10,096                           | —            |
|                   | 4800        | 3,087                     | 12,017                          | 535,6   | 10,284                           | —            |
| Переходная зона   | 4982        | 3,198                     | 12,121                          | 475,9   | 10,468                           | —            |
|                   | 5000        | 3,208                     | 12,130                          | 469,9   | 10,332                           | —            |
|                   | 5121        | 3,275                     | 12,197                          | 429,6   | 9,428                            | —            |
|                   | 5121        | 3,275                     | 12,197                          | 429,6   | 11,188                           | —            |
| Внутреннее ядро   | 5200        | 3,315                     | 12,229                          | 403,1   | 11,205                           | —            |
|                   | 5400        | 3,405                     | 12,301                          | 335,4   | 11,243                           | —            |
|                   | 5600        | 3,480                     | 12,360                          | 267,1   | 11,275                           | —            |
|                   | 5800        | 3,537                     | 12,405                          | 198,2   | 11,300                           | —            |
|                   | 6000        | 3,579                     | 12,437                          | 129,0   | 11,320                           | —            |
|                   | 6200        | 3,602                     | 12,455                          | 59,5  | 11,332                           | —            |
|                   | 6371        | 3,608                     | 12,460                          | 0,0   | 11,338                           | —            |

Основные сведения относительно внутреннего строения Земли были получены на основании изучения особенностей распространения сейсмических волн, возникающих при землетрясениях. К 1914 г. по данным сейсмологии удалось установить общую картину строения Земли и приблизительно вычислить скорость распространения продольных и поперечных сейсмических волн.

По установившимся в настоящее время представлениям Земля состоит из трех основных оболочек: коры, мантии (или промежуточной оболочки) и центрального ядра. Границы между ними фиксируются резкими скачками в скорости распространения сейсмических волн. Особенно резкие скачки относятся к разделам I порядка, менее резкие — к разделам II порядка.

Спорным и до настоящего времени проблематичным остается вопрос относительно физического состояния и состава глубинных частей Земли.

Резкая разница между средней высокой плотностью Земли (5,52 г/см<sup>3</sup>) и малой плотностью верхних ее частей (2,65 г/см<sup>3</sup>) привела к заключению о наличии в центре нашей планеты плотных масс, слагающих ядро. Однако границы ядра были установлены лишь в начале XX в. благодаря успехам сейсмологии.

Еще в XIX столетии были выдвинуты первые модели строения и состава Земли. Обнаруженную высокую плотность ядра Земли нельзя было первоначально объяснить действием лишь одного давления вышележащих масс. Для суждения о составе глубинных частей Земли привлекались данные о составе метеоритов, которые считались обломками планет земного типа. Допускалось (и сейчас допускается многими исследователями), что средний химический состав Земли соответствует химическому составу метеоритов. Отсюда возникли так называемые метеоритные модели строения и состава Земли.

За последние десятилетия установилось два представления о строении и составе Земли. Согласно первому представлению, развитому большинством

геохимиков (В. Гольдшмидт, А. Е. Ферман и другие), зонарное строение Земли связано с различным химическим составом ее оболочек. Согласно второму (В. Н. Лодочников, В. Рамзей), Земля в целом довольно однородна по своему химическому составу. Наличие оболочек различной плотности объясняется сильным уплотнением силикатного материала, переходом его в более плотное фазовое состояние с глубиной. Так, ядро Земли состоит из сильно сжатых силикатов, находящихся в «металлизованном» состоянии. Оригинальную модель Земли предложил А. Ф. Капустинский (1956), применяя при рассмотрении проблемы ее строения и состава различные методы — термодинамический, химический

и квантово-механический. По этой модели ядро Земли (или центрисфера) представляет собой область нулевого химизма, которая состоит из ядер атомов, находящихся в плазме сжатой электронной жидкости, общей для всех ядер и обладающей свойствами металлического состояния. Но в то же время при этом не исключена возможность, что ядро Земли содержит максимальное количество железа по сравнению с вышеуказанными оболочками.

Новые геофизические данные, а также данные по физике высоких давлений свидетельствуют о различном химическом составе основных оболочек Земли — мантии и ядра. К настоящему времени весь диапазон давлений и температур, соответствующих глубинам Земли, перекрыт лабораторным экспериментом. В динамических исследованиях с помощью ударных волн достигнуты давления, господствующие в центральных областях земного ядра. При статической нагрузке изучено вещество при условиях, соответствующих глубинам 600—1000 км. Экспериментальные исследования при сверхвысоких давлениях ( $5 \cdot 10^{11}$  Па) не обнаружили метал-

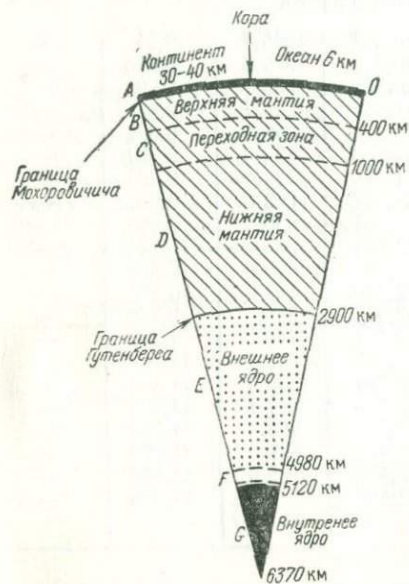


Рис. 1. Внутреннее строение Земли

лизации силикатов, что поставило под сомнение гипотезу металлизованного ядра. В то же время большим достижением геофизики является доказательство жидкого состояния большей части земного ядра, что вытекает из его низкой вязкости, из данных о скоростях и поглощениях сейсмических волн, из данных о собственных колебаниях Земли, из исследований приливов в теле Земли и нутации земной оси.

Наиболее распространенной моделью строения Земли является модель Гутенберга — Буллена (рис. 1, табл. 3). В табл. 4 (Мейсон, 1971) приведена характеристика также и верхних оболочек Земли — атмосферы и гидросферы.

Новые данные о физических свойствах ядра Земли указывают, что оно, вероятно, состоит из сплава железа с более легкими элементами. А. Рингвуд допустил, что ядро Земли содержит кремний в качестве легкого элемента. Такое предположение он обосновывает тем, что элементарный кремний в количестве нескольких весовых процентов встречается в металлической фазе некоторых хондритовых метеоритов (энстатитовых). Механизм вхождения кремния в ядро теоретически был рассмотрен О. Л. Кусковым (1975). С. Г. Сорохтин (1971) рассмотрел возможные физико-химические процессы образования ядра Земли и заключил, что в его составе в качестве легкого элемента может быть кислород в форме соединения  $Fe_2O$ . Однако наиболее вероятным легким элементом в составе земного ядра является сера. Предположение о наличии серы в земном ядре вытекает из сравнения ее распространения в космическом материале хондритовых метеоритов и мантии Земли. Так, сопоставление элементарных атомных соотношений некоторых летучих элементов (по отношению к нелетучему крем-

## Строение Земли

| Оболочка | Интервал глубин, км | Интервал плотностей, г/см <sup>3</sup> | Доля объема, % | Масса, 10 <sup>27</sup> г | Доля полной массы, % |
|----------|---------------------|--|----------------|---------------------------|----------------------|
| Кора (A) | 0—33                | 2,7—3,0                                | 1,55           | 5                         | 0,8                  |
| Мантия   | (B) 33—400          | 3,32—3,65                              | 16,67          | 62                        | 10,4                 |
|          | (C) 400—1000        | 3,65—4,68                              | 21,31          | 98                        | 16,4                 |
|          | (D) 1000—2900       | 4,68—5,69                              | 44,28          | 245                       | 41,0                 |
| Ядро     | (E) 2900—5000       | 9,40—11,5                              | 15,16          | 188                       | 31,5                 |
|          | (F) 5000—5100       | 11,5—12,0                              |                |                           |                      |
|          | (G) 5100—6371       | 12,0—12,3                              |                |                           |                      |

Таблица 4

## Характеристика оболочек Земли

| Оболочка               | Мощность, км | Объем, 10 <sup>27</sup> см <sup>3</sup> | Средняя плотность, г/см <sup>3</sup> | Масса              |         |
|------------------------|--------------|---|--------------------------------------|--------------------|---------|
|                        |              |   |                                      | 10 <sup>27</sup> г | %       |
| Атмосфера              | —            | —                                       | —                                    | 0,000005           | 0,00009 |
| Гидросфера (в среднем) | 3,8          | 0,00137                                 | 1,03                                 | 0,00141            | 0,024   |
| Кора                   | 30           | 0,015                                   | 2,8                                  | 0,043              | 0,7     |
| Мантия                 | 2870         | 0,892                                   | 4,5                                  | 4,054              | 67,8    |
| Ядро                   | 3471         | 0,175                                   | 10,7                                 | 1,876              | 31,5    |
| Земля в целом          | 6371         | 1,083                                   | 5,52                                 | 6,974              | 100,00  |

нию) в смеси коры и мантии и в хондритовых метеоритах показывает резкий недостаток серы. В материале коры и мантии Земли концентрация серы на три порядка ниже, чем в среднем материале солнечной системы, в качестве которого принимаются хондриты. В. Мурти и Г. Холл (Murthy and Hall, 1970) привели термодинамические и кристаллохимические аргументы в пользу внешнего ядра, состоящего из эвтектики Fe—FeS. При этих условиях в ядре Земли содержится около 15% (весовых) серы. Состав Земли наиболее вероятно соответствует смеси, состоящей из 40% материала типа углистых хондритов, 50% обычных хондритов и 10% железных метеоритов.

Состав маленького внутреннего ядра Земли, начиная с 5000 км и глубже, остается наиболее загадочным. Не исключена возможность, что оно имеет тот же состав, что и внешнее ядро, но находится в твердом состоянии. Возможно, что оно состоит из одного никелистого железа без примесей серы.

Современные представления о природе нашей планеты соответствуют химически дифференцированному земному шару, который оказался разделенным на две разные части: мощную твердую силикатно-окисную мантию и жидкое в основном металлическое ядро. Земная кора представляет собой наиболее легкую верхнюю твердую оболочку, состоящую из алюмосиликатов и имеющую наиболее сложное строение.

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС И ВНУТРЕННЕЕ ТЕПЛО ЗЕМЛИ

Главным источником энергии для большинства геохимических процессов, происходящих на поверхности Земли, является излучение Солнца. Лучистая энергия Солнца, получаемая земной атмосферой, на нормальную поверхность

определяется солнечной постоянной, в среднем равной 8,4 Дж/см<sup>2</sup>. мин. Часть этой энергии рассеивается и отражается обратно атмосферой и облаками, а в почное время отдает излучение в пространство; при этом средняя годовая температура не показывает заметного увеличения или уменьшения. На весь земной шар в год попадает 5,44 · 10<sup>24</sup> Дж лучистой энергии. Около 55% этой энергии поглощается атмосферой, растительным покровом и почвой и после ряда превращений аккумулируется зелеными растениями, а часть покидает Землю. Остальное количество энергии непосредственно отражается в мировое пространство.

Значительная часть лучистой энергии Солнца вызывает движение воздушных масс атмосферы и определяет круговорот воды на поверхности Земли. С круговоротом воды связано движение огромных масс твердого вещества, которое в дисперсном виде переносится водными потоками, реками в пониженные области рельефа поверхности планеты, занятые морями и океанами. Общее количество воды, участвующее в годовом круговороте, по наиболее обоснованным данным М. И. Львовича (1966) дано в табл. 5.

Солнечная теплота непосредственно не проникает в глубинные части Земли. Глубже 10 м (от поверхности почвы) годового изменения температур практически не наблюдается.

Глубинный энергетический баланс Земли связан с ее тепловым режимом, который, с одной стороны, определяется расходом тепла, с другой — генерацией тепла от внутренних источников, из которых наиболее достоверный — радиоактивность.

Земля теряет свое тепло преимущественно за счет теплопроводности. Остальные явления играют подчиненную роль. Оценка тепловых потоков производится на основе измерения геотермического градиента в скважинах и коэффициента теплопроводности проходимых скважинами горных пород. В этом случае тепловой поток выражается формулой

$$dQ = k \frac{dt}{ds},$$

где  $k$  — коэффициент теплопроводности, для обычных пород он в среднем равен 0,025 Дж/см · с;

$dt/ds$  — геотермический градиент, изменяющийся в пределах 10—40° С/км.

Измеренные тепловые потоки в разных частях поверхности Земли приведены в табл. 6.

Годовой водный баланс Земли

Таблица 5

| Элементы водного баланса                                  | Объем, км <sup>3</sup> | Слой, мм | Процент от атмосферных осадков земного шара |
|---|------------------------|----------|---|
| Периферическая часть суши (117 504 тыс. км <sup>2</sup> ) |                        |          |   |
| Осадки  | 101 000                | 859      | 19,4  |
| Речной сток   | 36 380                 | 309      | 7,0   |
| Испарение   | 64 620                 | 550      | 12,4  |
| Замкнутая часть суши (31 124 тыс. км <sup>2</sup> )       |                        |          |   |
| Осадки  | 7 400                  | 238      | 1,4   |
| Испарение   | 7 400                  | 238      | 1,4   |
| Мировой океан (361 455 тыс. км <sup>2</sup> )             |                        |          |   |
| Осадки  | 411 600                | 1140     | 79,2  |
| Приток речных вод   | 36 380                 | 100      | 7,0   |
| Испарение   | 447 980                | 1240     | 86,2  |
| Земной шар (510 000 тыс. км <sup>2</sup> )                |                        |          |   |
| Осадки  | 520 000                | 1020     | 100   |
| Испарение   | 520 000                | 1020     | 100   |

## Тепловые потоки у поверхности Земли

| Район измерений          | Число измерений | Тепловой поток, $10^{-6}$ Дж/(см <sup>2</sup> ·с) |             |                  |
|--------------------------|-----------------|---|-------------|------------------|
|                          |                 | максимальный                                      | минимальный | среднее значение |
| Северная Америка         | 82              | 15,08   | 2,51        | 5,40             |
| Европа                   | 45              | 14,25   | 2,64        | 6,78             |
| Азия                     | 57              | 10,63   | 2,22        | 4,35             |
| Африка                   | 15              | 16,36   | 3,60        | 4,98             |
| Австралия                | 58              | 16,0  | 2,30        | 6,99             |
| Тихий океан              | 520             | 38,17   | 0,04        | 7,49             |
| Атлантический океан      | 229             | 27,2  | 0,38        | 5,43             |
| Северный Ледовитый океан | 20              | 6,19  | 3,24        | 5,36             |
| Индийский океан          | 220             | 25,74   | 0,04        | 6,19             |

Значение теплового потока для всей земной коры может быть принято равным  $6,03 \cdot 10^{-6}$  Дж/см<sup>2</sup>·с. Если принять это значение для всего земного шара и учесть его поверхность, то общее количество тепла, теряемого Землей путем теплопроводности, составит  $30,6 \cdot 10^{12}$  Дж/с или  $9,6 \cdot 10^{20}$  Дж/год. Некоторые авторы дают усредненную величину теплового потока Земли  $7,9 \pm 0,4 \cdot 10^{20}$  Дж/год.

Существенный вклад в глубинное тепло Земли вносит распад радиоактивных элементов, в первую очередь таких, как уран, торий, калий. Эти элементы при распаде выделяют следующие количества энергии:

|                   | МэВ/атом | Дж/(г·год)          |
|-------------------|----------|---------------------|
| <sup>238</sup> U  | 47,4     | 2,97                |
| <sup>235</sup> U  | 45,2     | 17,0                |
| U (общий)         | —        | 3,06                |
| <sup>232</sup> Th | 39,80    | 0,84                |
| <sup>40</sup> K   | 0,71     | 0,92                |
| K (общий)         | —        | $113 \cdot 10^{-6}$ |

Таблица 7

## Радиогенное тепло Земли

| Автор радиоактивной модели Земли | (K : U) · 10 <sup>4</sup> | Выделение тепла радиоэлементами, $10^{-6}$ Дж/(год·г) |       |       |        | Для всей Земли, $10^{20}$ Дж/год* |
|----------------------------------|---------------------------|---|-------|-------|--------|-----------------------------------|
|                                  |                           | Уран  | Торий | Калий | Всего  |                                   |
| А. Полацкий                      | —                         | 85,54   | 61,11 | 14,66 | 161,71 | 94,16                             |
| Е. А. Любимова                   |                           |   |       |       |        |                                   |
| вариант А                        | 16,1                      | 2,85  | 2,34  | 16,74 | 21,93  | 13,0                              |
| вариант Б                        | 1,5                       | 30,56   | 25,11 | 16,74 | 72,41  | 43,5                              |
| Г. В. Войткевич                  | 0,77                      | 11,92   | 12,13 | 3,77  | 37,82  | 16,8                              |
| Б. Ю. Левин                      | 1,8                       | 15,29   | 16,74 | 10,04 | 42,01  | 25,1                              |
| Г. Юри                           | 7,28                      | 3,43  | 3,18  | 9,20  | 15,81  | 9,6                               |
| Г. Вассербург                    | 1,0                       | 7,93  | 6,99  | 2,51  | 17,43  | 10,5                              |
| Д. Шоу                           |                           |   |       |       |        |                                   |
| хондритовая модель               | 7,5                       | 3,35  | 3,35  | 9,25  | 15,95  | 9,6                               |
| углисто-хондритовая модель       | 1,8                       | 7,28  | 5,39  | 4,60  | 17,27  | 10,2                              |
| ахондритовая модель              | 0,7                       | 15,29   | 16,74 | 3,85  | 35,88  | 21,6                              |

\* Потеря тепла Землей за счет проводимости  $(7,9-9,6) \cdot 10^{20}$  Дж/год.

Если известно содержание этих элементов в Земле, то нетрудно вычислить их общую генерацию тепла. Наиболее существенные оценки радиоактивности Земли в отношении выделения радиогенного тепла по разным авторам (Войткевич, 1970) приведены в табл. 7. Из этих данных следует, что при разных вариантах радиоактивных моделей Земли количество тепловой радиогенной энергии соизмеримо с потерей тепла за счет теплопроводности или даже несколько превышает ее.

За время существования Земли внутренняя генерация тепла от распада радиоактивных элементов значительно изменялась. Величины изменения радиогенного тепла как функции времени в прошлом представлены на рис. 2. На графике видно, что в начальные стадии развития Земли она получала значительно больше радиогенного тепла, чем в современную эпоху. В то же время существенно

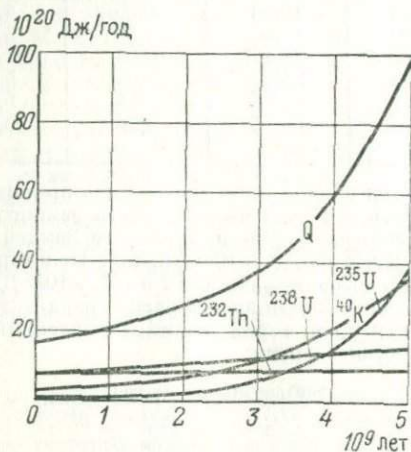


Рис. 2. Выделение радиогенного тепла в прошлом Земли

изменялась роль отдельных радиоэлементов в генерации тепла. Так, свыше  $3 \cdot 10^9$  лет тому назад основное значение в генерации тепла имели  $^{235}\text{U}$  и  $^{40}\text{K}$ . В настоящее время получены убедительные данные о том, что в начале существования Солнечной системы в ее веществе присутствовали такие изотопы, как трансурановые  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{247}\text{Cm}$ , а также радиоактивный йод  $^{129}\text{I}$ , которые вскоре вымерли. Наличие этих недолговечных изотопов в составе ранней Земли должно было вызвать ее дополнительный радиогенный нагрев (Войткевич, 1974).

### СРЕДНИЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗЕМЛИ В ЦЕЛОМ

Средний химический состав Земли рассчитывается по содержанию элементов в различных метеоритных фазах, из которых главными являются две: силикатная и металлическая. Наиболее существенные результаты расчетов даны в табл. 8.

### ЛУНА

Луна представляет собой естественный спутник Земли, составляющий  $1/81$  часть ее массы. Основные данные о Луне следующие.

Среднее расстояние Луны от Земли 384 400 км (60,26659 радиуса Земли)  
 Расстояние в апогее 405 500 км  
 Расстояние в перигее 363 300 км  
 Средний радиус 1740 км  
 Объем  $2193,9 \cdot 10^7 \text{ км}^3$  (0,020254 объема Земли)  
 Поверхность  $3,80 \cdot 10^7 \text{ км}^2$  (0,0744 поверхности Земли)  
 Средняя скорость движения по орбите 1,02 км/с, или 3680 км/ч

## Химический состав Земли

| Элемент | По Г. Вашингтону | По П. Ниггли | По А. Ферману | По Ф. Смитгу | По Б. Мэйсону | По Р. Мурти, Г. Холлу |
|---------|------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|-----------------------|
| O       | 27,71            | 29,3         | 28,56         | 29,56        | 29,53         | 30,75                 |
| Na      | 0,39             | 0,90         | 0,52          | 0,56         | 0,57          | 0,30                  |
| Mg      | 8,69             | 6,73         | 11,03         | 11,28        | 12,70         | 15,70                 |
| Al      | 1,79             | 3,01         | 1,22          | 1,24         | 1,09          | 1,29                  |
| Si      | 14,53            | 14,9         | 14,47         | 14,67        | 15,20         | 14,73                 |
| P       | 0,11             | 0,15         | 0,12          | 0,15         | 0,10          | —                     |
| S       | 0,64             | 0,73         | 1,44          | 3,29         | 1,93          | 4,65                  |
| K       | 0,11             | 0,29         | 0,15          | 0,14         | 0,07          | —                     |
| Ca      | 2,52             | 2,99         | 1,38          | 1,40         | 1,13          | 1,54                  |
| Ti      | 0,02             | 0,54         | —             | 0,07         | 0,05          | —                     |
| Cr      | 0,20             | 0,13         | 0,26          | 0,26         | 0,26          | —                     |
| Mn      | 0,07             | 0,14         | 0,18          | 0,22         | 0,22          | —                     |
| Fe      | 39,76            | 36,9         | 37,04         | 34,82        | 34,63         | 29,29                 |
| Co      | 0,23             | 0,18         | 0,06          | 0,17         | 0,13          | —                     |

Поверхность Луны состоит из светлых участков, образованных горными системами и возвышенностями, и участков темных — так называемых морей. Вся поверхность Луны покрыта бесчисленным множеством воронок разного размера, наиболее крупные из которых получили название лунных цирков.

Благодаря последним исследованиям с полной достоверностью выявлены главные особенности химического, минерального и петрографического состава горных пород поверхности Луны, отобранных из восьми районов. По первым образцам удалось по структурному признаку выделить четыре типа лунных пород: пузырьчатые со стекловидными пузырьками (тип А), кристаллические (тип В), брекчиевидные (тип С) и лунная пыль (тип D). Луна покрыта реголитом — разнозернистым обломочно-пылевым слоем толщиной от нескольких метров до десятков метров, образовавшимся при дроблении коренных лунных пород. Основная масса лунных вулканических пород сходна с земными базальтами. Они сложены плагиоклазом, пироксеном, ильменитом, оливином; встречаются шпидель, циркон, апатит (табл. 9).

Таблица 9

## Основные разновидности лунных пород

| Компонент                      | Морской базальт, среднее из четырех («Аполлон-11») | Габбро-анортит («Луна-20») | Анортит, № 15415 («Аполлон-15») | Норит или неморской базальт, № 14310 («Аполлон-14») | Дацит, № 12013 («Аполлон-12») |
|--------------------------------|--|----------------------------|---------------------------------|---|-------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 40,5   | 42,4                       | 44,1                            | 50,0  | 61,0                          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9,7  | 20,2                       | 35,5                            | 20,0  | 12,0                          |
| FeO                            | 19,0   | 6,4                        | 0,2                             | 7,7   | 10,0                          |
| TiO <sub>2</sub>               | 11,4   | 0,4                        | —                               | 1,3   | 1,2                           |
| CaO                            | 9,6  | 18,6                       | 19,7                            | 11,0  | 6,3                           |
| MgO                            | 8,0  | 12,2                       | 0,1                             | 8,0   | 6,0                           |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,53   | 0,40                       | 0,34                            | 0,63  | 0,69                          |
| K <sub>2</sub> O               | 0,16   | 0,52                       | —                               | 0,53  | 2,0                           |

В лунном грунте найдены обломки метеоритного материала. Возраст лунных пород оказался очень древний. Возраст анортитов возвышенностей Луны 4·10<sup>9</sup> лет. Возраст морских базальтов более молодой: 3,5·10<sup>9</sup> лет. В химическом

отношении все лунные породы бедны летучими элементами и обогащены тугоплавкими литофильными элементами по сравнению с аналогичными породами земной коры.

Луна представляет собой сферическое тело, сложенное преимущественно силикатным материалом, испытывавшим процесс химической дифференциации. По сейсмическим данным Луна имеет оболоченное строение и состоит из коры 20—30 км мощности (до 60 км), мантии или литосферы, достигающей глубин 1000 км, и ядра, расположенного глубже 1000 км. Очаги внутренних лунотрясений располагаются на глубинах 700—1000 км, вблизи границы мантии и ядра.

Тепловой поток, идущий из лунных недр, достигает  $30 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ , что приводит к термическим моделям Луны со средней концентрацией урана  $6 \cdot 10^8 \text{ г/г}$ .

## СОЛНЦЕ

Солнце — центральное тело солнечной системы. Энергия солнечного излучения — определяющий фактор многих геохимических процессов и неперенное условие существования биосферы. Основные данные по Солнцу следующие (Allen, 1963).

Среднее расстояние от Земли  $149\,504\,000 \pm 17\,000 \text{ км}$   
 Диаметр  $1\,390\,600 \text{ км}$  (109,1 диаметра Земли)  
 Поверхность  $609 \cdot 10^{10} \text{ км}^2$  (в 11 900 раз больше поверхности Земли)  
 Объем  $1412 \cdot 10^{15} \text{ км}^3$   
 Масса  $1,983 \cdot 10^{33} \text{ г}$   
 Средняя плотность  $1,410 \text{ г/см}^3$   
 Плотность в центре Солнца  $100 \text{ г/см}^3$   
 Ускорение силы тяжести на поверхности  $2,738 \cdot 10^4 \text{ см/с}^2$   
 (в 27,9 раза больше, чем на Земле)  
 Критическая скорость освобождения тел на поверхности  $619,4 \text{ км/с}$   
 Линейная скорость точки солнечного экватора  $2,025 \text{ км/с}$   
 Среднее значение солнечной постоянной  $8,4 \text{ Дж}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$   
 ( $1,39 \cdot 10^6 \text{ эрг}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$ , колеблется в пределах 7%)  
 Мощность солнечного излучения на границе земной атмосферы  $1,39 \text{ кВт/м}^2$   
 Общая радиация  $3,78 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$  ( $1,19 \cdot 10^{41} \text{ эрг/год}$ , около 2 эрг на 1 г массы Солнца)  
 Спектральный класс Солнца G (по гарвардской классификации)  
 Эффективная температура поверхности Солнца  $6000 \text{ К}$   
 Температура в центре Солнца  $13\,600\,000 \text{ К}$   
 Скорость движения относительно окружающих его звезд  $19,5 \text{ км/с}$  (по направлению к созвездию Геркулеса), 4,2 астрономические единицы в год  
 Расстояние Солнца от центра Галактики  $8000 \text{ парсек}$  ( $26\,000 \text{ световых лет}$ )  
 Скорость движения вокруг центра Галактики  $250 \text{ км/с}$   
 Период обращения вокруг центра Галактики  $1,8 \cdot 10^8 \text{ лет}$

В химическом отношении Солнце представляет собой раскаленную водородно-гелиевую газовую сферу, разбавленную примесью других химических элементов в ионизированном состоянии. Атомные соотношения вещества Солнца определяются следующими значениями (на  $10^6$  атомов кремния).

| Элемент | По Зюссю—Юри        | По Аллеру            |
|---------|---------------------|----------------------|
| H       | $4,0 \cdot 10^{10}$ | $3,16 \cdot 10^{10}$ |
| He      | $3,08 \cdot 10^9$   | $5,13 \cdot 10^8$    |
| Li      | 100                 | 100                  |
| Be      | 20                  | 20                   |
| B       | 24                  | 24                   |
| C       | $3,5 \cdot 10^6$    | $1,26 \cdot 10^7$    |
| N       | $6,6 \cdot 10^6$    | $3,55 \cdot 10^6$    |
| O       | $2,15 \cdot 10^7$   | $2,8 \cdot 10^7$     |
| F       | 1600                | $3,16 \cdot 10^4$    |
| Ne      | $8,8 \cdot 10^6$    | $1,59 \cdot 10^7$    |
| Na      | $4,38 \cdot 10^4$   | $6,31 \cdot 10^4$    |
| Mg      | $9,12 \cdot 10^3$   | $7,94 \cdot 10^3$    |
| Al      | $9,48 \cdot 10^4$   | $5,25 \cdot 10^4$    |
| Si      | $1,00 \cdot 10^6$   | $1,00 \cdot 10^6$    |
| P       | $1,00 \cdot 10^4$   | $7,94 \cdot 10^3$    |
| S       | $3,75 \cdot 10^5$   | $7,08 \cdot 10^5$    |
| Ca      | $4,90 \cdot 10^4$   | $4,90 \cdot 10^4$    |
| Fe      | $6,00 \cdot 10^3$   | $1,18 \cdot 10^3$    |

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Главные характерные особенности планет солнечной системы определяются их расстоянием от Солнца, периодом обращения вокруг Солнца, диаметром, массой и объемом (табл. 10). Некоторые физические свойства планет даны в табл. 11. Данные таблиц 10 и 11 взяты из справочника, вышедшего под ред. К. Ведыполя (Wederpohl, 1969).

Таблица 10

Размеры планет по Г. Кейперу и др.

| Планета  | Среднее расстояние от Солнца, $10^6$ км | Сидерический период обращения, год | Диаметр, км | Масса, $10^{26}$ г | Объем, $10^{10}$ км <sup>3</sup> |
|----------|---|------------------------------------|-------------|--------------------|----------------------------------|
| Меркурий | 57,9                                    | 0,24085                            | 4 840       | 3,333              | 5,958                            |
| Венера   | 108,2                                   | 0,61521                            | 12 228      | 48,70              | 95,765                           |
| Земля    | 149,6                                   | 1,00004                            | 12 742      | 59,76              | 108,332                          |
| Луна *   | 0,384                                   | 0,07480                            | 3,476       | 0,735              | 2,192                            |
| Марс     | 227,9                                   | 1,88089                            | 6 770       | 6 443              | 16,250                           |
| Юпитер   | 778                                     | 11,86223                           | 140 720     | 18 993             | 145 923,204                      |
| Сатурн   | 1427                                    | 29,4577                            | 116 820     | 5 684              | 83 469,806                       |
| Уран     | 2870                                    | 84,0153                            | 47 100      | 867,6              | 5 481,599                        |
| Нептун   | 4496                                    | 164,7883                           | 44,600      | 1 069              | 4 636,610                        |
| Плутон   | 5881,9 до<br>5946,5                     | 247,7                              | 6 000       | 55,3               | 10,833                           |

\* Дано расстояние от Земли и период обращения вокруг Земли.

Таблица 11

Основные свойства планет

| Планета  | Средняя плотность, г/см <sup>3</sup> | Ускорение свободного падения, см/с <sup>2</sup> | Скорость улетучивания тел, км/с | Альbedo (общая отражательная способность) |
|----------|--------------------------------------|---|---------------------------------|---|
| Меркурий | 5,62                                 | 380   | 4,29                            | 0,056                                     |
| Венера   | 5,09                                 | 869   | 10,3                            | 0,76                                      |
| Земля    | 5,517                                | 978   | 11,2                            | 0,39                                      |
| Луна     | 3,35                                 | 162   | 2,37                            | 0,067                                     |
| Марс     | 3,97                                 | 372   | 5,03                            | 0,16                                      |
| Юпитер   | 1,30                                 | 2301  | 57,5                            | 0,67                                      |
| Сатурн   | 0,68                                 | 906   | 33,1                            | 0,69                                      |
| Уран     | 1,58                                 | 972   | 21,6                            | 0,93                                      |
| Нептун   | 2,22                                 | 1347  | 24,6                            | 0,84                                      |
| Плутон   | —                                    | —   | —                               | 0,14                                      |

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЗЕМЛИ И ПЛАНЕТ

В настоящее время на смену космогоническим гипотезам приходит новая теория, основанная главным образом на данных космохимии и учитывающая физико-химические процессы при охлаждении первичной солнечной туманности, которые привели к химической неоднородности разных тел солнечной системы. Зональное — оболочечное строение Земли и планет земного типа связывается со способом аккумуляции частиц из газового-пылевого облака, которое само

возникло в процессе охлаждения и конденсации солнечного газа. Согласно последним термодинамическим расчетам, в процессе охлаждения туманности солнечного состава наиболее важные компоненты внутренних планет и метеоритов — железо-никелевые сплавы и магнезиальные силикаты — выделялись в такой последовательности (в интервале давлений от  $1,013 \cdot 10^5$  до  $1,013 \cdot 10^2$  Па): Fe (1700—1620K); Ni (1690—1440);  $MgSiO_3$  (1670—1470);  $Mg_2SiO_4$  (1620—1420); FeS (680K).

Следовательно, аккумуляция Земли началась в тот период, когда в остывающей газовой туманности завершилось формирование железо-никелевых капель, а конденсация силикатных частиц только начиналась. Капли металлов, соприкасаясь друг с другом, легко сливались в тела компактной массы, поскольку металлические частицы (капли) обладают высокой теплопроводностью. Если же аккумуляция планет началась после полного выделения твердых веществ из газовой фазы туманности, то и в этом случае аккумуляция железо-никелевых частиц совместно с сульфидами железа должна была протекать первой в связи с магнитным притяжением (при температурах ниже точки Кюри), поскольку ферромагнитные вещества в сильном магнитном поле первичного Солнца неизбежно могли быстро намагничиваться. Поэтому есть основание допустить, что аккумуляция Земли протекала гетерогенно. Первоначально из металла возникли ядра Земли и планет, а затем вокруг них происходило оседание силикатных частиц и других веществ, образовавших первичные мантии. В связи с успехами космохимии по изучению планет солнечной системы и метеоритов новая постановка проблемы формирования Земли нашла отражение в исследованиях советских (Виноградов, 1971; Войткевич, 1973) и зарубежных ученых (Дж. Лаример, Дж. Льюис, Л. Гроссман, А. Камерон).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батюшкова И. В. Внутреннее строение Земли. Эволюция представлений. М., «Наука», 1966. 160 с.
- Ботт М. Внутреннее строение Земли. Пер. англ. М., «Мир», 1974. 376 с.
- Буллен К. Е. Введение в теоретическую сейсмологию. Пер. с англ. М., «Мир», 1966. 460 с.
- Виноградов А. П. Высокотемпературные протопланетные процессы (к проблеме образования металлических ядер планет). — «Геохимия», 1971, № 11, с. 1283—1296.
- Войткевич Г. В. Радиоактивность в истории Земли. М., «Наука», 1970. 168 с.
- Войткевич Г. В. Происхождение и химическая эволюция Земли. М., «Наука», 1973. 168 с.
- Войткевич Г. В. Трансурановые элементы в составе ранней Земли. — «Изв. Северо-Кавказского научного центра Высшей школы». 1974, № 1, с. 27—32.
- Густенберг Б. Физика земных недр. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1963. 264 с.
- Джеффрис Г. Земля, ее происхождение, история и строение. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960. 486 с.
- Изотов А. А. Форма и размеры Земли по современным данным. — «Тр. ЦНИИГАиК», 1950, вып. 73, с. 25—34.
- Капустинский А. Ф. К теории Земли. — В кн.: Вопросы геохимии и минералогии. М., Изд-во АН СССР, 1956.
- Кусков О. Л., Хитаров Н. И. Химический состав ядер планет земной группы. — «Геохимия», 1975, № 2, с. 163—177.
- Любимова Е. А. Термика Земли и Луны. М., «Наука», 1968. 280 с.
- Львович М. И. Круговорот воды и водные ресурсы. — В кн.: Круговорот воды. М., 1966, с. 17—30.
- Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. М., «Недра», 1965. 380 с.
- Мэйсон Б. Основы геохимии. Пер. с англ. М., «Недра», 1971. 312 с.
- Мэйсон Б., Мелсон У. Лунные породы. Пер. с англ. М., «Мир», 1973. 165 с.
- Сорастин О. Г. Возможные физико-химические процессы образования ядра Земли. — «Докл. АН СССР», 1971, т. 198, № 6, с. 1327—1330.
- Стейси Ф. Физика Земли. Пер. с англ. М., «Мир», 1972. 344 с.
- Allen C. W. Astrophysical Quantities (2-nd ed.). Chapter 7, Athlone Press, London, 1963. 200 p.
- Haddon R. A. W. and Bullen K. E. A Earth model incorporating free earth oscillation data. — «Physics of the Earth and Planetary Interiors», 1969, vol. 2, No 1, p. 35—49.
- Hall H. T. and Rama Murthy V. The early chemical history of the Earth, some critical elemental fractionations. — «Earth and Planetary Science Letters», 1971, vol. 11, No 3, p. 239—244.
- Murthy Rama V. and Hall H. T. The chemical composition of the earth's core: possibly sulphur in core. — «Physics of the Earth and Planetary Interiors», 1970, vol. 2, No 4, p. 276—282.
- Ringwood A. E. Chemical evolution of the terrestrial planets. — «Geochimica et Cosmochimica Acta», 1966, vol. 30, No 11, p. 41—104.
- Wedepohl K. H. (Editor). Handbook of Geochemistry. Vol. 1, Springer — Verlag, Berlin — Heidelberg — New York, 1969. 442 p.

## НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТОВ, МИНЕРАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В АТОМАХ ЭЛЕМЕНТОВ

Положение электрона в структуре атома описывается четырьмя квантовыми числами: главным, орбитальным, магнитным и спиновым. Они определяют энергию, размеры и форму электронных орбиталей, а также собственное вращение электрона (спин). Максимально возможное число электронов в каждом слое равно  $2n^2$ , где  $n$  соответствует значениям главного квантового числа: 1, 2, 3, 4... Распределение электронов в различных слоях атомов в сокращенном виде приведено в табл. 12.

Таблица 12

Распределение электронов в различных слоях атомов

| Периоды | Атомные номера z | Элементы | Число электронов в различных слоях |            |            |            |            |            |            |  |
|---------|------------------|----------|------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
|         |                  |          | K<br>(n=1)                         | L<br>(n=2) | M<br>(n=3) | N<br>(n=4) | O<br>(n=5) | P<br>(n=6) | Q<br>(n=7) |  |
| 1       | 1 → 2            | He → He  | 1 → 2                              |            |            |            |            |            |            |  |
| 2       | 3 → 10           | Li → Ne  | 2                                  | 1 → 8      |            |            |            |            |            |  |
| 3       | 11 → 18          | Na → Ar  | 2                                  | 8          | 1 → 8      |            |            |            |            |  |
| 4       | 19 → 36          | K → Kr   | 2                                  | 8          | 8 → 18     | 1 → 8      |            |            |            |  |
| 5       | 37 → 54          | Rb → Xe  | 2                                  | 8          | 18         | 1 → 18     | 1 → 8      |            |            |  |
| 6       | 55 → 86          | Cs → Rn  | 2                                  | 8          | 18         | 18 → 32    | 8 → 18     | 1 → 8      |            |  |
| 7       | 87 →             | Fr →     | 2                                  | 8          | 18         | 32         | 18 →       | 8 →        | 1 →        |  |

### АТОМНЫЕ РАДИУСЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Значения атомных радиусов (в  $10^{-10}$  м или  $10^{-8}$  см), полученных путем деления на два межатомных расстояния в кристаллических структурах простых тел с координационным числом КЧ=12, показаны в табл. 13.

Таблица 13

Величина атомных радиусов

| Элемент | Атомный радиус | Элемент | Атомный радиус | Элемент | Атомный радиус | Элемент | Атомный радиус |
|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|
| H       | 0,46           | Mn      | 1,30           | In      | 1,66           | Ta      | 1,46           |
| He      | 1,22           | Fe      | 1,26           | Sn      | 1,58           | W       | 1,40           |
| Li      | 1,55           | Co      | 1,25           | Sb      | 1,61           | Re      | 1,37           |
| Be      | 1,13           | Ni      | 1,24           | Te      | 1,7            | Os      | 1,35           |
| B       | 0,91           | Cu      | 1,28           | I       | —              | Ir      | 1,35           |
| C       | 0,77           | Zn      | 1,39           | Xe      | 2,18           | Pt      | 1,38           |
| N       | 0,71           | Ga      | 1,39           | Cs      | 2,68           | Au      | 1,44           |

| Элемент | Атомный радиус | Элемент | Атомный радиус | Элемент | Атомный радиус | Элемент | Атомный радиус |
|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|
| O       | —              | Ge      | 1,39           | Ba      | 2,21           | Hg      | 1,60           |
| F       | —              | As      | 1,48           | La      | 1,87           | Tl      | 1,71           |
| Ne      | 1,60           | Se      | 1,6            | Ce      | 1,83           | Pb      | 1,75           |
| Na      | 1,89           | Br      | —              | Pr      | 1,82           | Bi      | 1,82           |
| Mg      | 1,60           | Kr      | 1,98           | Nd      | 1,82           | Po      | —              |
| Al      | 1,43           | Rb      | 2,48           | Pm      | —              | At      | —              |
| Si      | 1,34           | Sr      | 2,15           | Sm      | 1,81           | Rn      | —              |
| P       | 1,3            | Y       | 1,81           | Eu      | 2,02           | Fr      | 2,80           |
| S       | —              | Zr      | 1,60           | Gd      | 1,79           | Ra      | 2,35           |
| Ar      | 1,92           | Nb      | 1,45           | Tb      | 1,77           | Ac      | 2,03           |
| K       | 2,36           | Mo      | 1,39           | Dy      | 1,77           | Th      | 1,80           |
| Ca      | 1,97           | Ru      | 1,34           | Er      | 1,75           | Pa      | 1,62           |
| Sc      | 1,64           | Rh      | 1,34           | Tu      | 1,74           | U       | 1,53           |
| Ti      | 1,46           | Pd      | 1,37           | Yb      | 1,93           | Np      | 1,50           |
| V       | 1,34           | Ag      | 1,44           | Lu      | 1,74           | Pu      | 1,62           |
| Cr      | 1,27           | Cd      | 1,56           | Hf      | 1,59           |         |                |

### ИОННЫЕ РАДИУСЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Ионный радиус есть величина, принимаемая для обозначения размеров шаровидных ионов и вычисления межатомных расстояний в ионных кристаллах. Для вычисления системы ионных радиусов достаточно знать размер хотя бы одного иона и межатомные расстояния в ионной кристаллической решетке. Н. В. Белов и Г. В. Бокий использовали в этих целях величину ионного радиуса кислорода  $O^{2-}$ , равную  $1,36 \cdot 10^{-8}$  см. Л. Аренс (Ahrens, 1952) использовал значение  $1,40 \cdot 10^{-8}$  см. Наилучшее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными отмечается для системы ионных радиусов Белова — Бокий. Поэтому она имеет преимущество перед другими системами в отношении достоверности и широко используется в СССР. За рубежом большое распространение получила система ионных радиусов Э. Уиттекера и Р. Мантуса (Whittaker, Muntus, 1970). В ней радиус иона  $O^{2-}$  принят равным  $1,32 \cdot 10^{-8}$  см.

Величины ионных радиусов сильно зависят от координационных чисел (КЧ), поэтому они обычно даются для структуры  $КЧ=6$  (структура кристалла поваренной соли). Поправка при  $КЧ=4$  соответствует  $-6\%$ , при  $КЧ=8$  равна  $+3\%$ , а при  $КЧ=12$  составляет  $+12\%$ .

В табл. 14 приводятся ионные радиусы элементов по данным разных авторов, выраженные в  $10^{-8}$  см.

Современное состояние проблемы атомных и ионных радиусов в геохимии и кристаллохимии критически освещено в работах В. И. Лебедева (1969), Дж. Слэтера (Slater, 1964), Дж. Вебера и Д. Кромера (Waber, Cromer, 1965), Р. Шеннона и С. Приюта (Shannon, Prewitt, 1969).

### ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ И ИОНОВ

Потенциалом ионизации называется энергия, необходимая для отрыва электрона от атома или иона. Сродство к электрону — величина энергии, выделяемая (или поглощаемая) при соединении нейтрального атома с электроном. Электроотрицательность элемента — сумма ионизационного потенциала атома и его электронного сродства. Последовательные потенциалы ионизации атомов и ионов (в эВ) приведены в табл. 15.

## Величины ионных радиусов

| Символ иона     | Заряд иона | По В. Гольдшмидту | По Л. Полингу | По Г. Боккио и Белову | По Л. Аренсу | По Е. Уиттекеру и Р. Мантусу |
|-----------------|------------|-------------------|---------------|-----------------------|--------------|------------------------------|
| H               | -1         | 1,54              | 2,08          | 1,36                  | —            | —                            |
| Li              | +1         | 0,78              | 0,60          | 0,68                  | —            | 0,82                         |
| Be              | +2         | 0,34              | 0,31          | 0,34                  | —            | —                            |
| B               | +3         | —                 | 0,20          | 0,21                  | —            | —                            |
| BF <sub>4</sub> | -1         | —                 | —             | —                     | 2,28         | —                            |
| C               | +4         | 0,20              | 0,15          | 0,20                  | —            | —                            |
| C               | -4         | —                 | 2,60          | 2,60                  | —            | —                            |
| N               | +5         | 0,15              | 0,11          | 0,15                  | —            | —                            |
| N               | -3         | —                 | 1,71          | 1,48                  | 1,300        | —                            |
| NH <sub>4</sub> | +1         | 1,43              | —             | —                     | 1,59         | —                            |
| NO <sub>3</sub> | -1         | —                 | —             | —                     | 1,89; 2,57   | —                            |
| O               | +6         | —                 | 0,09          | 0,09                  | —            | —                            |
| O               | -2         | 1,32              | 1,40          | 1,36                  | 1,45         | 1,32                         |
| F               | +7         | —                 | 0,07          | 0,07                  | —            | —                            |
| F               | -1         | 1,33              | 1,36          | 1,33                  | 1,24         | 1,25                         |
| Na              | +1         | 0,98              | 0,95          | 0,98                  | —            | 1,10                         |
| Mg              | +2         | 0,78              | 0,65          | 0,74                  | —            | 0,80                         |
| Al              | +3         | 0,57              | 0,50          | 0,57                  | —            | 0,61                         |
| Si              | +4         | 0,39              | 0,41          | 0,39                  | —            | 0,48                         |
| Si              | -4         | —                 | 2,73          | —                     | —            | —                            |
| P               | +5         | 0,35              | 0,34          | 0,35                  | —            | —                            |
| P               | -3         | —                 | 2,12          | 1,86                  | —            | —                            |
| PO <sub>4</sub> | -3         | —                 | —             | —                     | 3,00         | —                            |
| S               | +6         | 0,34              | 0,29          | 0,30                  | —            | —                            |
| S               | -2         | 1,74              | 1,84          | 1,86                  | 1,90         | 1,78                         |
| SH              | -1         | —                 | —             | —                     | 2,00         | —                            |
| Cl              | +7         | —                 | 0,26          | 0,26                  | —            | —                            |
| Cl              | -1         | 1,81              | 1,81          | 1,81                  | —            | 1,72                         |
| K               | +1         | 1,33              | 1,33          | 1,33                  | —            | 1,46                         |
| Ca              | +2         | 1,06              | 0,99          | 1,04                  | —            | 1,08                         |
| Sc              | +3         | 0,83              | 0,81          | 0,83                  | —            | 0,83                         |
| Sc              | +4         | —                 | —             | 0,69                  | —            | —                            |
| Sc              | +6         | —                 | —             | 0,35                  | —            | —                            |
| Sc              | -2         | 1,91              | 1,98          | 1,98                  | 2,02         | —                            |
| Ti              | +4         | 0,64              | 0,68          | 0,64                  | —            | 0,69                         |
| Ti              | +3         | 0,69              | —             | 0,69                  | —            | —                            |
| Ti              | +2         | 0,80              | —             | 0,78                  | 0,76         | —                            |
| V               | +5         | 0,40              | 0,59          | —                     | 0,59         | 0,62                         |
| V               | +4         | 0,61              | 0,59          | 0,61                  | 0,64         | 0,67                         |
| V               | +3         | 0,65              | —             | 0,67                  | —            | 0,72                         |
| V               | +2         | 0,72              | —             | 0,72                  | —            | 0,87                         |
| Cr              | +6         | 0,35              | 0,52          | 0,52                  | 0,65         | —                            |
| Cr              | +3         | —                 | —             | 0,64                  | 0,55         | 0,70                         |
| Cr              | +2         | 0,83              | —             | 0,83                  | —            | 0,81                         |
| Mn              | +7         | —                 | 0,46          | 0,46                  | —            | —                            |
| Mn              | +4         | 0,52              | 0,50          | 0,52                  | —            | 0,62                         |
| Mn              | +3         | 0,70              | —             | 0,70                  | 0,67         | 0,66                         |
| Mn              | +2         | 0,91              | 0,80          | 0,91                  | —            | 0,91                         |
| Fe              | +3         | 0,67              | —             | 0,67                  | 0,73         | 0,63                         |
| Fe              | +2         | 0,83              | 0,75          | 0,80                  | 0,75         | 0,69                         |
| Co              | +3         | 0,64              | —             | 0,64                  | 0,72         | 0,61                         |
| Co              | +2         | 0,82              | 0,72          | 0,78                  | 0,78         | 0,73                         |
| Ni              | +3         | 0,35              | —             | —                     | —            | 0,64                         |

| Символ иона      | Заряд иона | По В. Гольдшмидту | По Л. Полинг | По Г. Бонкю и Белову | По Л. Аренсу | По Е. Унттеркеру и Р. Майтсу |
|------------------|------------|-------------------|--------------|----------------------|--------------|------------------------------|
| Ni               | +2         | 0,78              | 0,69         | 0,74                 | 0,68         | 0,77                         |
| Ni               | +6         | —                 | —            | —                    | 0,82         | —                            |
| Ni               | +5         | —                 | —            | —                    | 0,88         | —                            |
| Cu               | +2         | 0,70              | —            | 0,80                 | 0,82         | 0,81                         |
| Zn               | +2         | 0,83              | 0,74         | 0,83                 | 0,70         | 0,83                         |
| Ga               | +3         | 0,62              | 0,62         | 0,62                 | —            | 0,70                         |
| Ge               | +4         | 0,44              | 0,53         | 0,44                 | —            | 0,62                         |
| Ge               | +2         | —                 | —            | 0,65                 | 0,98         | —                            |
| Ge               | -4         | —                 | 2,72         | —                    | —            | —                            |
| As               | +5         | —                 | 0,47         | 0,47                 | —            | 0,58                         |
| As               | +3         | 0,69              | —            | 0,69                 | —            | —                            |
| As               | -3         | —                 | 2,22         | 1,91                 | —            | —                            |
| Se               | +4         | —                 | —            | 0,69                 | —            | —                            |
| Se               | +6         | —                 | —            | 0,35                 | —            | —                            |
| Br               | +7         | —                 | 0,39         | 0,39                 | —            | —                            |
| Br               | -1         | 1,96              | 1,95         | 1,96                 | —            | 1,88                         |
| Rb               | +1         | 1,49              | 1,48         | 1,49                 | —            | 1,57                         |
| Sr               | +2         | 1,27              | 1,23         | 1,20                 | 1,10         | 1,21                         |
| Y                | +3         | 1,06              | 0,93         | 0,97                 | —            | 0,98                         |
| Zr               | +4         | 0,87              | 0,80         | 0,82                 | —            | 0,80                         |
| Nb               | +5         | 0,69              | 0,70         | 0,66                 | —            | 0,72                         |
| Nb               | +4         | 0,69              | 0,67         | 0,67                 | 0,74         | 0,77                         |
| Mo               | +6         | —                 | 0,62         | 0,65                 | —            | 0,68                         |
| Mo               | +4         | 0,68              | 0,66         | 0,68                 | —            | 0,73                         |
| MoO <sub>4</sub> | -2         | —                 | —            | —                    | 3,45         | —                            |
| Ru               | +4         | 0,65              | 0,63         | 0,62                 | 0,71         | 0,70                         |
| Ru               | +3         | —                 | —            | —                    | 0,74         | 0,76                         |
| Ru               | +2         | —                 | —            | —                    | 0,85         | —                            |
| Rh               | +4         | —                 | —            | 0,65                 | 0,71         | 0,71                         |
| Rh               | +3         | 0,68              | —            | 0,75                 | 0,78         | 0,75                         |
| Pd               | +4         | —                 | —            | 0,64                 | 0,73         | 0,70                         |
| Pd               | +2         | —                 | —            | —                    | 0,72; 0,88   | 0,94                         |
| Ag               | +1         | 1,13              | 1,26         | 1,13                 | —            | 1,23                         |
| Cd               | +2         | 1,03              | 0,97         | 0,99                 | 0,92         | 1,03                         |
| In               | +3         | 0,92              | 0,81         | 0,92                 | —            | 0,88                         |
| In               | +1         | —                 | —            | 1,30                 | —            | —                            |
| Sn               | +4         | 0,74              | 0,71         | 0,67                 | —            | 0,77                         |
| Sn               | +2         | —                 | —            | 1,02                 | —            | —                            |
| Sb               | +5         | —                 | 0,62         | 0,62                 | —            | 0,69                         |
| Sb               | +3         | 0,90              | —            | 0,90                 | —            | —                            |
| Sb               | -3         | —                 | 2,45         | 2,08                 | —            | —                            |
| Te               | +6         | —                 | 0,56         | 0,56                 | 0,61         | —                            |
| Te               | +4         | 0,89              | 0,81         | 0,89                 | —            | —                            |
| Te               | -2         | 2,11              | 2,21         | 2,22                 | —            | —                            |
| I                | +7         | —                 | 0,50         | 0,50                 | —            | —                            |
| I                | +5         | 0,94              | —            | —                    | 0,98         | 1,03                         |
| I                | +1         | —                 | —            | —                    | 1,30         | —                            |
| I                | -1         | 2,20              | 2,16         | 2,20                 | 2,19         | 2,13                         |
| Cs               | +1         | 1,65              | 1,69         | 1,65                 | —            | 1,78                         |
| Ba               | +2         | 1,43              | 1,35         | 1,38                 | —            | 1,44                         |
| La               | +3         | 1,22              | 1,15         | 1,03                 | —            | 1,13                         |
| Ce               | +4         | 1,02              | 1,01         | 0,88                 | 0,93; 0,87   | 0,88                         |
| Pr               | +4         | 1,00              | 0,92         | —                    | 0,92         | 0,86                         |
| Pr               | +3         | 1,16              | —            | 1,00                 | 1,00         | 1,08                         |

| Символ иона | Заряд иона | По В. Гольдшмидту | По Л. Полингу | По Г. Вокиню и Белову | По Л. Аренсу | По Е. Уиттекеру и Р. Мантусу |
|-------------|------------|-------------------|---------------|-----------------------|--------------|------------------------------|
| Nd          | +3         | 1,15              | —             | 0,99                  | 0,99         | 1,06                         |
| Sm          | +3         | 1,13              | —             | 0,97                  | 0,97         | 1,04                         |
| Sm          | +2         | —                 | —             | —                     | 1,11         | —                            |
| Eu          | +3         | 1,13              | —             | 0,97                  | 0,96         | 1,03                         |
| Eu          | +2         | —                 | —             | —                     | 1,09; 1,24   | 1,25                         |
| Gd          | +3         | 1,11              | —             | 0,94                  | 0,94         | 1,02                         |
| Tb          | +3         | 1,09              | —             | 0,89                  | 0,92         | 1,00                         |
| Dy          | +3         | 1,07              | —             | 0,88                  | 0,98         | 0,99                         |
| Dy          | +1         | —                 | 0,96          | 0,98                  | 0,98         | —                            |
| Ho          | +3         | 1,05              | —             | 0,86                  | 0,89         | 0,98                         |
| Er          | +3         | 1,04              | —             | 0,85                  | 0,97         | 0,97                         |
| Tm          | +3         | 1,04              | —             | 0,85                  | 0,86         | 0,96                         |
| Yb          | +3         | 1,00              | —             | 0,81                  | 0,85         | 0,95                         |
| Lu          | +3         | 0,99              | —             | 0,80                  | 0,84         | 0,94                         |
| Hf          | +4         | —                 | —             | 0,82                  | 0,86         | 0,79                         |
| Ta          | +5         | —                 | —             | 0,66                  | 0,73         | 0,72                         |
| W           | +6         | —                 | —             | 0,65                  | —            | 0,68                         |
| W           | +4         | 0,68              | 0,66          | 0,68                  | —            | 0,73                         |
| Re          | +6         | —                 | —             | 0,56                  | 0,55         | 0,60                         |
| Re          | +4         | —                 | —             | 0,72                  | 0,71         | 0,71                         |
| Os          | +4         | 0,67              | 0,67          | 0,65                  | 0,75         | 0,71                         |
| Os          | +3         | —                 | —             | —                     | 0,81         | —                            |
| Os          | +2         | —                 | —             | —                     | 0,89         | —                            |
| Ir          | +4         | 0,66              | 0,64          | 0,65                  | 0,75         | 0,71                         |
| Ir          | +3         | —                 | —             | —                     | 0,81         | 0,81                         |
| Ir          | +2         | —                 | —             | —                     | 0,89         | —                            |
| Pt          | +4         | —                 | —             | 0,64                  | 0,76         | 0,71                         |
| Pt          | +2         | —                 | —             | —                     | 0,90; 0,87   | —                            |
| Pt          | +6         | —                 | —             | —                     | 0,81         | —                            |
| Pt          | +5         | —                 | —             | —                     | 0,87         | —                            |
| Au          | +1         | —                 | 1,37          | 1,37                  | —            | —                            |
| Au          | +3         | —                 | —             | 0,85                  | —            | —                            |
| Hg          | +2         | 1,12              | 1,10          | 1,12                  | 1,05         | —                            |
| Tl          | +3         | 1,05              | 0,95          | 1,05                  | —            | 0,97                         |
| Tl          | +1         | 1,49              | 1,44          | 1,36                  | —            | 1,58                         |
| Pb          | +2         | 1,32              | 1,21          | 1,26                  | 1,17         | 1,26                         |
| Bi          | +5         | —                 | 0,74          | 0,74                  | —            | —                            |
| Bi          | +3         | —                 | —             | 1,20                  | 1,16         | 1,10                         |
| Bi          | -3         | —                 | —             | 2,13                  | —            | —                            |
| At          | +7         | —                 | —             | —                     | 0,62         | —                            |
| Fr          | +1         | —                 | —             | 1,75                  | —            | —                            |
| Ra          | +2         | 1,52              | —             | 1,44                  | —            | —                            |
| Ac          | +3         | —                 | —             | 1,11                  | —            | —                            |
| Th          | +4         | 1,10              | 1,02          | 0,95                  | 0,99         | 1,08                         |
| Th          | +3         | —                 | —             | 1,08                  | 1,08         | —                            |
| Pa          | +3         | —                 | —             | 1,06                  | 1,05         | —                            |
| Pa          | +4         | —                 | —             | 0,91                  | 0,96         | —                            |
| U           | +6         | —                 | —             | —                     | 0,83         | 0,81                         |
| U           | +5         | —                 | —             | —                     | 0,87         | 0,84                         |
| U           | +4         | 1,04              | 0,97          | 0,95                  | 0,93; 0,89   | —                            |
| U           | +3         | —                 | —             | 1,04                  | 1,03         | 1,12                         |

## Потенциалы ионизации атомов и ионов

| Атомный номер | Химический символ | Энергия, необходимая для отделения электрона |                                       |         |            |            |            |             |             |
|---------------|-------------------|--|---------------------------------------|---------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
|               |                   | от однократно отрицательно заряженного иона  | от нейтрального невозбужденного атома | второго | третьего   | четвертого | пятого     | шестого     | седьмого    |
|               |                   |  |                                       |         |            |            |            |             |             |
| 1             | H                 | 0,75   | 13,595                                |         |            |            |            |             |             |
| 2             | He                | -0,53  | 23,58                                 | 54,50   |            |            |            |             |             |
| 3             | Li                | 0,54   | 5,39                                  | 75,62   | 122,42     |            |            |             |             |
| 4             | Be                | -0,6   | 9,32                                  | 18,21   | 153,85     | 217,66     |            |             |             |
| 5             | B                 | 0,3  | 8,296                                 | 25,15   | 37,92      | 259,30     |            |             |             |
| 6             | C                 | 2,08 ± 0,87                                  | 11,264                                | 24,376  | 47,86      | 64,48      | 340,13     |             |             |
| 7             | N                 | 0,04   | 14,54                                 | 28,60   | 47,426     | 77,45      | 97,86      | 489,84      |             |
| 8             | O                 | 2,73   | 13,614                                | 35,15   | 54,93      | 77,39      | 113,87     | 551,93      | 666,83      |
| 9             | F                 | 3,94   | 17,418                                | 34,98   | 62,65      | 87,23      | 114,21     | 138,08      | 739,11      |
| 10            | Ne                | -1,20  | 21,559                                | 41,07   | 63,5 ± 0,1 | 97,16      | 126,4      | 157,9       | 185,14      |
| 11            | Na                | 0,08   | 5,138                                 | 47,29   | 71,8 ± 0,1 | 98,88      | 138,6      | 172,4       | 207,2 ± 0,1 |
| 12            | Mg                | -0,9   | 7,644                                 | 15,03   | 78,2 ± 0,1 | 109,3      | 141,23     | 186,8 ± 0,1 | 208,44      |
| 13            | Al                | 0,09   | 5,984                                 | 18,82   | 28,44      | 119,96     | 153,8      | 190,42      | 225,3       |
| 14            | Si                | 0,60   | 8,149                                 | 16,34   | 33,46      | 45,13      | 166,73     | 205,1       | 241,8 ± 0,1 |
| 15            | P                 | 0,9  | 10,55                                 | 19,65   | 30,16      | 51,35      | 65,01      | 220,41      | 246,41      |
| 16            | S                 | 2,06   | 10,357                                | 23,4    | 34,8       | 47,29      | 72,5 ± 0,1 | 88,0 ± 0,1  | 263,3       |
| 17            | Cl                | 3,70   | 13,01                                 | 23,80   | 39,9       | 53,3       | 67,8 ± 0,2 | 96,6 ± 0,3  | 280,99      |
| 18            | Ar                | -1,0   | 15,755                                | 27,6    | 40,90      | 59,79      | 75,0 ± 0,1 | 91,3 ± 0,3  | 114,2 ± 0,1 |
| 19            | K                 | 0,69   | 4,339                                 | 31,81   | 45,9       | 61,1       | 82,6 ± 0,4 | 99,4 ± 0,4  | 123,9 ± 0,4 |
| 20            | Ca                |  | 6,111                                 | 11,87   | 51,21      | 67,3       | 84 ± 1     | 109 ± 1     | 117,9 ± 0,4 |
| 21            | Sc                |  | 6,56                                  | 12,75   | 24,75      | 73,9       | 91,8       | 111 ± 1     | 127,9 ± 0,5 |
| 22            | Ti                |  | 6,83                                  | 13,57   | 28,14      | 43,24      | 99,8       | 119         | 139 ± 1     |
| 23            | V                 |  | 6,74                                  | 14,2    | 29,7       | 48,0       | 65,2       | 128,9       | 141 ± 1     |
| 24            | Cr                |  | 6,764                                 | 16,49   | 31         | (51)       | 73         | 90,6        | 151         |
| 25            | Mn                |  | 7,432                                 | 15,64   | 33,69      | (53)       | (76)       | 100 ± 1     | 161,1       |
| 26            | Fe                |  | 7,90                                  | 16,18   | 30,64      | (56)       | (79)       | 103 ± 1     | 190,24      |

|    |    |      |        |            |            |            |            |            |             |
|----|----|------|--------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 27 | Co |      | 7,86   | 17,05      | 33,49      | (53)       | (82)       | (109)      | 133 ± 1     |
| 28 | Ni |      | 7,633  | 18,15      | 36,16      | (56)       | (79)       | (113)      | (143)       |
| 29 | Cu | 0,99 | 7,724  | 20,29      | 36,83      | (59)       | (83)       | (109)      | (148)       |
| 30 | Zn |      | 9,391  | 17,96      | 39,70      | (62)       | (86)       | (114)      | (144)       |
| 31 | Ga |      | 6,00   | 20,51      | 30,70      | 64,2       | (90)       | (118)      | (149)       |
| 32 | Ge |      | 7,88   | 15,93      | 34,21      | 45,7       | 93,4       | (123)      | (155)       |
| 33 | As |      | 9,81   | 18,7 ± 0,1 | 28,3       | 50,1       | 62,0 ± 0,1 | 127,5      | (160)       |
| 34 | Se |      | 9,75   | 21,5       | 32,0       | 42,9       | 68,3 ± 0,1 | 82,1 ± 0,2 | 155         |
| 35 | Br | 3,64 | 11,84  | 21,6       | 35,9       | 47,3       | 59,7 ± 0,1 | 88,6 ± 0,2 | 103,0 ± 0,4 |
| 36 | Kr |      | 13,996 | 24,56      | 36,9       | 52,5       | 64,7       | 78,5 ± 0,1 | 111,0 ± 0,4 |
| 37 | Rb |      | 4,176  | 27,56      | 40         | 52,6       | 71,0       | 84,4       | 99,2 ± 0,1  |
| 38 | Sr |      | 5,692  | 11,026     | 43,6       | 57,1       | 71,6       | 90,8       | 106         |
| 39 | Y  |      | 6,38   | 12,23      | 20,5       | 61,8       | 77,0       | 93,0       | 116         |
| 40 | Zr |      | 6,835  | 12,92      | 24,8       | 33,97      | 82,3       | 99,4       | 116         |
| 41 | Nb |      | 6,88   | 13,90      | 28,1       | 38,3       | 50         | 110,4      | 124         |
| 42 | Mo |      | 7,131  | 15,72      | 29,6       | 46,4       | 61,2       | 67         | 131         |
| 43 | Tc |      | 7,23   | 14,87      | 31,9       | (43)       | (59)       | (76)       | (94)        |
| 44 | Ru |      | 7,36   | 16,60      | 30,3       | (47)       | (63)       | (81)       | (100)       |
| 45 | Rh |      | 7,46   | 15,92      | 32,8       | (46)       | (67)       | (85)       | (105)       |
| 46 | Pd |      | 8,33   | 19,42      | (33)       | (49)       | (66)       | (90)       | (111)       |
| 47 | Ag | 1,1  | 7,574  | 21,48      | 36,10      | (52)       | (70)       | (89)       | (116)       |
| 48 | Cd |      | 8,991  | 16,904     | 44,5       | (55)       | (73)       | (94)       | (115)       |
| 49 | In |      | 5,785  | 18,86      | 28,0       | 58         | (77)       | (98)       | (121)       |
| 50 | Sn |      | 7,332  | 14,6       | 30,7       | 46,4 ± 0,1 | 91         | (103)      | (126)       |
| 51 | Sb |      | 8,64   | 16,7 ± 0,5 | 24,8       | 44,1       | 63,8 ± 0,5 | 119        | (132)       |
| 52 | Te |      | 9,01   | 18,8 ± 0,5 | 31         | 38         | 66 ± 1     | 83 ± 2     | 149         |
| 53 | I  | 3,30 | 10,44  | 19,0       | 33         | (42)       | 71         | 83 ± 2     | 104 ± 3     |
| 54 | Xe |      | 12,127 | 21,2       | 32,1       | (45)       | (57)       | 89         | 102 ± 3     |
| 55 | Cs |      | 3,893  | 25,1       | 34,6 ± 0,7 | (46)       | (62)       | (74)       | 108         |
| 56 | Ba |      | 5,810  | 10,00      | 37 ± 1     | (49)       | (62)       | (80)       | (93)        |
| 57 | La |      | 5,61   | 11,43      | 19,17      | (52)       | (66)       | (80)       | (100)       |
| 58 | Ce |      | 6,91   | 12,3       | 19,5       | 36,7       | (70)       | (85)       | (100)       |
| 59 | Pr |      | 5,76   | —          | —          | —          | —          | (89)       | (106)       |
| 60 | Nd |      | 6,31   | —          | —          | —          | —          | —          | (111)       |
| 61 | Pm |      | —      | —          | —          | —          | —          | —          | —           |
| 62 | Sm |      | 5,6    | 11,2       | —          | —          | —          | —          | —           |
| 63 | Eu |      | 5,67   | 11,24      | —          | —          | —          | —          | —           |
| 64 | Gd |      | 6,16   | 12         | —          | —          | —          | —          | —           |

| Атомный номер | Химический символ | Энергия, необходимая для отделения электрона |                                       |  |            |            |        |         |          |  |
|---------------|-------------------|--|---------------------------------------|--|------------|------------|--------|---------|----------|--|
|               |                   | от однократно отрицательно заряженного иона  | от нейтрального невозбужденного атома | второго  | третьего   | четвертого | пятого | шестого | седьмого |  |
|               |                   |  |                                       | от однозарядного положительного невозбужденного иона |            |            |        |         |          |  |
| 65            | Tb                |  | 6,74                                  |  |            |            |        |         |          |  |
| 66            | Dy                |  | 6,82                                  |  |            |            |        |         |          |  |
| 67            | Ho                |  |                                       |  |            |            |        |         |          |  |
| 68            | Er                |  |                                       |  |            |            |        |         |          |  |
| 69            | Tm                |  |                                       |  |            |            |        |         |          |  |
| 70            | Yb                |  | 6,2                                   | 12,10  |            |            |        |         |          |  |
| 71            | Lu                |  | 6,45                                  | 14,7   | (19)       |            |        |         |          |  |
| 72            | Hf                |  | 5,5                                   | 14,9   | (21)       | (31)       |        |         |          |  |
| 73            | Ta                |  | 7,7                                   | 16,2 ± 0,5   | (22)       | (33)       | (45)   |         |          |  |
| 74            | W                 |  | 7,98                                  | 17,7 ± 0,5   | (24)       | (35)       | (48)   | (61)    |          |  |
| 75            | Re                |  | 7,87                                  | 16,6 ± 0,5   | (26)       | (38)       | (51)   | (65)    | (79)     |  |
| 76            | Os                |  | 8,7                                   | 17 ± 1   | (25)       | (40)       | (54)   | (68)    | (89)     |  |
| 77            | Ir                |  | 9,2                                   | 17,0 ± 0,3   | (27)       | 39         | 57     | 72      | (88)     |  |
| 78            | Pt                |  | 8,96                                  | 18,54 ± 0,1  | (29)       | 41         | 55     | 75      | (92)     |  |
| 79            | Au                | 2,4  | 9,223                                 | 20,5   | (30)       | 44         | 58     | 73      | (96)     |  |
| 80            | Hg                | 1,8  | 10,434                                | 18,751   | 34,2       | 46         | 61     | 77      | (94)     |  |
| 81            | Tl                |  | 6,406                                 | 20,42  | 29,8       | 50         | 64     | 81      | (98)     |  |
| 82            | Pb                |  | 7,415                                 | 15,03  | 31,93      | 39,0       | 69,7   | 84      | (103)    |  |
| 83            | Bi                |  | 7,287                                 | 19,03  | 25,9       | 45,3       | 56,0   | 94,4    | (107)    |  |
| 84            | Po                |  | 8,2 ± 0,4                             | 19,4 ± 1,7   | 27,3 ± 0,8 | 38         | 61     | 73      | (112)    |  |
| 85            | At                |  | 9,2 ± 0,4                             | 20,1 ± 1,7   | 29,3 ± 0,9 | 41         | 51     | 78      | (91)     |  |
| 86            | Rn                |  | 10,745                                | 21,4 ± 1,8   | 29,4 ± 1,0 | (44)       | (55)   | (67)    | (97)     |  |
| 87            | Fr                |  | 3,98 ± 0,1                            | 22,5 ± 1,8   | 33,5 ± 1,5 | (43)       | (59)   | (71)    | (84)     |  |
| 88            | Ra                |  | 5,277                                 | 10,144   | (34)       | (46)       | (59)   | (76)    | (89)     |  |
| 89            | Ac                |  | 6,89 ± 0,6                            | 11,5 ± 0,4   | —          | (49)       | (62)   | (76)    | (95)     |  |
| 90            | Th                |  | —                                     | 11,5 ± 1,0   | 20,0       | 28,7       | (65)   | (80)    | (94)     |  |
| 91            | Pa                |  |                                       |  |            |            |        | (84)    | (100)    |  |
| 92            | U                 |  | 4                                     |  |            |            |        |         | (104)    |  |

## ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

Понятие электроотрицательности (ЭО) в современном его значении ввел в науку Л. Полинг в 1932 г. Электроотрицательность представляет собой энергию притяжения данным атомом валентных электронов при соединении его с другими атомами (Поваренных, 1955). Она характеризует силовое поле атомного ядра и зависит как от его заряда, так и от степени экранирования ядра законченными электронными слоями и отдельными электронами. Следовательно, величина электроотрицательности зависит прежде всего от валентности, проявляемой данным атомом в соединении, а также от строения электронной оболочки атома и ее завершенности.

Существуют различные методы расчета электроотрицательности элементов, важнейшие из них следующие: 1) термохимический (Л. Полинг), 2) из атомных (ионных) радиусов, разработанный в разных вариантах У. Горди, Р. Сандерсоном и др., 3) спектроскопический, использованный Дж. Беллом и др., 4) потенциалов ионизации, использованный разными авторами.

Т а б л и ц а 16

Электроотрицательность элементов (в кДж/моль)  
по А. С. Поваренных (1963) с изменениями автора

| Элемент          | ЭО   | Элемент          | ЭО   | Элемент          | ЭО   | Элемент          | ЭО    |
|------------------|------|------------------|------|------------------|------|------------------|-------|
| H <sup>+</sup>   | 1320 | Mn <sup>3+</sup> | 1088 | Ru <sup>8+</sup> | 1445 | Ta <sup>4+</sup> | 755   |
| Li <sup>+</sup>  | 504  | Mn <sup>2+</sup> | 753  | Ru <sup>4+</sup> | 1130 | W <sup>6+</sup>  | 984   |
| Be <sup>2+</sup> | 880  | Fe <sup>4+</sup> | 1362 | Ru <sup>3+</sup> | 984  | W <sup>4+</sup>  | 837   |
| B <sup>3+</sup>  | 1215 | Fe <sup>3+</sup> | 984  | Rh <sup>4+</sup> | 1109 | Re <sup>7+</sup> | 1088  |
| C <sup>4+</sup>  | 1550 | Fe <sup>2+</sup> | 774  | Rh <sup>3+</sup> | 1046 | Re <sup>6+</sup> | 1046  |
| N <sup>5+</sup>  | 1883 | Co <sup>4+</sup> | 1278 | Pd <sup>4+</sup> | 1172 | Re <sup>4+</sup> | 900   |
| O <sup>6+</sup>  | 2219 | Co <sup>3+</sup> | 1088 | Pd <sup>2+</sup> | 942  | Os <sup>8+</sup> | 1214  |
| F <sup>7+</sup>  | 2553 | Co <sup>2+</sup> | 816  | Ag <sup>2+</sup> | 1045 | Os <sup>4+</sup> | 963   |
| Na <sup>+</sup>  | 502  | Ni <sup>4+</sup> | 1362 | Ag <sup>+</sup>  | 733  | Ir <sup>6+</sup> | 1151  |
| Mg <sup>2+</sup> | 733  | Ni <sup>3+</sup> | 1151 | Cd <sup>2+</sup> | 816  | Ir <sup>4+</sup> | 941   |
| Al <sup>3+</sup> | 921  | Ni <sup>2+</sup> | 879  | In <sup>3+</sup> | 900  | Pt <sup>2+</sup> | 900   |
| Si <sup>4+</sup> | 1088 | Cu <sup>2+</sup> | 984  | In <sup>+</sup>  | 565  | Au <sup>3+</sup> | 963   |
| P <sup>5+</sup>  | 1299 | Cu <sup>+</sup>  | 753  | Sn <sup>4+</sup> | 1109 | Au <sup>+</sup>  | 879   |
| S <sup>6+</sup>  | 1571 | Zn <sup>2+</sup> | 858  | Sn <sup>2+</sup> | 712  | Hg <sup>2+</sup> | 900   |
| S <sup>4+</sup>  | 1151 | Ga <sup>3+</sup> | 984  | Sb <sup>5+</sup> | 1235 | Hg <sup>+</sup>  | 1004  |
| Cl <sup>7+</sup> | 1925 | Ge <sup>4+</sup> | 1109 | Sb <sup>3+</sup> | 795  | Tl <sup>3+</sup> | 963   |
| K <sup>+</sup>   | 419  | Ge <sup>2+</sup> | 774  | Te <sup>6+</sup> | 1341 | Tl <sup>+</sup>  | 586   |
| Ca <sup>2+</sup> | 565  | As <sup>5+</sup> | 1257 | J <sup>7+</sup>  | 1571 | Pb <sup>4+</sup> | 925   |
| Sc <sup>3+</sup> | 795  | As <sup>3+</sup> | 921  | J <sup>5+</sup>  | 1046 | Pb <sup>2+</sup> | 733   |
| Ti <sup>4+</sup> | 1045 | Se <sup>6+</sup> | 1466 | Cs <sup>+</sup>  | 377  | Bi <sup>4+</sup> | 1088  |
| Ti <sup>3+</sup> | 900  | Se <sup>4+</sup> | 1046 | Ba <sup>2+</sup> | 481  | Bi <sup>3+</sup> | 816   |
| Ti <sup>2+</sup> | 649  | Br <sup>7+</sup> | 1758 | La <sup>3+</sup> | 628  | Po <sup>6+</sup> | 1172  |
| V <sup>5+</sup>  | 1257 | Rb <sup>+</sup>  | 398  | Ce <sup>4+</sup> | 879  | At <sup>7+</sup> | 1341  |
| V <sup>4+</sup>  | 1151 | Sr <sup>2+</sup> | 523  | Ce <sup>3+</sup> | 628  | Fr <sup>+</sup>  | 377   |
| V <sup>3+</sup>  | 963  | Y <sup>3+</sup>  | 670  | Sm <sup>2+</sup> | 544  | Ra <sup>2+</sup> | 481   |
| V <sup>2+</sup>  | 691  | Zr <sup>4+</sup> | 816  | Eu <sup>2+</sup> | 544  | Ac <sup>3+</sup> | 607   |
| Cr <sup>6+</sup> | 1466 | Nb <sup>5+</sup> | 963  | Gd <sup>2+</sup> | 686  | Th <sup>4+</sup> | 691   |
| Cr <sup>4+</sup> | 1235 | Nb <sup>4+</sup> | 921  | Yb <sup>2+</sup> | 686  | Pa <sup>5+</sup> | (795) |
| Cr <sup>3+</sup> | 1045 | Mo <sup>6+</sup> | 1088 | Lu <sup>2+</sup> | 713  | U <sup>6+</sup>  | (879) |
| Mn <sup>7+</sup> | 2219 | Mo <sup>4+</sup> | 984  | Hf <sup>4+</sup> | 753  | U <sup>4+</sup>  | (753) |
| Mn <sup>4+</sup> | 1278 | Tc <sup>7+</sup> | 1299 | Ta <sup>5+</sup> | 879  |                  |       |

Зависимость степени ковалентности связи в соединениях (в %) от величины разности электроотрицательных (ЭО) элементов по А. С. Поваренных

| Разность ЭО | Ковалентность связи | Разность ЭО | Ковалентность связи | Разность ЭО | Ковалентность связи | Разность ЭО | Ковалентность связи |
|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|
| 2300        | 0                   | 1592        | 22,5                | 1130        | 51,4                | 669         | 80                  |
| 2193        | 1                   | 1550        | 25,0                | 1088        | 54,0                | 627         | 82                  |
| 2093        | 3                   | 1508        | 27,5                | 1046        | 56,7                | 586         | 84                  |
| 1988        | 6                   | 1466        | 30,0                | 1004        | 59,4                | 544         | 86                  |
| 1883        | 9                   | 1424        | 32,7                | 962         | 62,0                | 502         | 88                  |
| 1841        | 10                  | 1383        | 35,4                | 920         | 64,7                | 460         | 90                  |
| 1800        | 12                  | 1340        | 38,0                | 878         | 67,4                | 418         | 91                  |
| 1758        | 14                  | 1300        | 40,7                | 837         | 70,0                | 314         | 94                  |
| 1716        | 16                  | 1257        | 43,4                | 795         | 72,5                | 209         | 97                  |
| 1674        | 18                  | 1214        | 46,0                | 763         | 75,0                | 105         | 99                  |
| 1634        | 20                  | 1172        | 48,7                | 711         | 77,5                | 0           | 100                 |

Одним из наиболее простых методов, хотя и не менее точных, чем другие, является метод потенциалов ионизации в трактовке А. С. Поваренных, который предложил использовать для вычисления электроотрицательности следующее выражение:

$$\text{ЭО} = \frac{I_n}{n} + F,$$

где  $I_n$  — потенциал ионизации атома до соответствующего валентного состояния;

$n$  — валентность атома;

$F$  — сродство к электрону.

Эта формула легко позволяет найти ЭО большинства элементов в любом валентном состоянии (табл. 16).

Электроотрицательность — весьма важная характеристика атомов, позволяющая судить о химическом их поведении в реакциях, о степени основности или кислотности в соединениях с  $\text{OH}$ , о возможности реализации водородной и гидроксильной связи и т. д. Существенное значение ЭО атомов заключается в том, что она дает возможность приблизительно определять степень (долю) ковалентности (соответствующую ионности в смешанной ионно-ковалентной связи, которая свойственна большинству химических соединений). Степень ковалентности связи вычисляется на основе разности ЭО атомов в бинарных соединениях по специальной номограмме (Поваренных, 1955), которая может быть заменена соответствующей таблицей (табл. 17).

## НЕКОТОРЫЕ ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТОВ

В табл. 18 приведены термические свойства химических элементов в чистом виде: температура плавления и кипения, удельная теплоемкость. Эти данные имеют определенное значение в понимании геохимической миграции элементов, особенно в том случае, если они в процессе миграции временами находятся в химически не связанном (самородном) состоянии.

## Некоторые термические свойства элементов

| Элемент        | Температура, °C |         | Удельная теплоемкость, Дж/(г·°C) |          |
|----------------|-----------------|---------|----------------------------------|----------|
|                | плавления       | кипения | область температур               | значение |
| H <sub>2</sub> | -259,1          | -252,5  | -253                             | 25,1     |
| Li             | 186             | 1372    | 0-100                            | 4,56     |
| Na             | 97,5            | 892     | 0                                | 1,185    |
| K              | 62,3            | 774     | 0-56                             | 0,80     |
| Rb             | 38,5            | 679     | —                                | 0,33     |
| Cs             | 28,5            | 690     | 0-26                             | 0,101    |
| Fr             | 27 (?)          | 879     | —                                | —        |
| Cu             | 1083            | 2595    | 15-100                           | 0,40     |
| Ag             | 960,5           | 2212    | 15-100                           | 0,235    |
| Au             | 1063            | 2966    | 17-100                           | 0,130    |
| Be             | 1350            | 1530    | 0-100                            | 1,780    |
| Mg             | 651             | 1107    | 17-100                           | 1,035    |
| Ca             | 851             | 1487    | 0-20                             | 0,624    |
| Sr             | 800             | 1384    | —                                | —        |
| Ba             | 850             | 1140    | 18                               | 0,29     |
| Ra             | 960             | 1140    | —                                | —        |
| Zn             | 419,4           | 907     | 20                               | 0,4776   |
| Cd             | 320,9           | 765     | 20                               | 0,2300   |
| Hg             | -38,9           | 357     | 20                               | 0,1395   |
| B              | 2300            | 2550    | 0-100                            | 1,286    |
| Al             | 660             | 2056    | 17-100                           | 0,909    |
| Ga             | 29,75           | 2071    | —                                | —        |
| In             | 155             | 1450    | 0-100                            | 0,239    |
| Tl             | 303,5           | 1457    | 20-100                           | 0,138    |
| Sc             | 1200            | 2400    | —                                | —        |
| Y              | 1490            | 2500    | —                                | —        |
| La             | 826             | 1800    | 0-100                            | 0,188    |
| Ce             | 640             | 1400    | 0-100                            | 0,188    |
| Pr             | 940             | 3017    | —                                | —        |
| Nd             | 1024            | 3101    | —                                | —        |
| Pm             | 1027            | —       | —                                | —        |
| Sm             | 1300            | 1601    | —                                | —        |
| Eu             | 827             | 1469    | —                                | —        |
| Gd             | 1327 (?)        | 1497    | —                                | —        |
| Tb             | 1417 (?)        | 2480    | —                                | —        |
| Dy             | 1500            | 2330    | —                                | —        |
| Ho             | 1461            | 2490    | —                                | —        |
| Er             | 1527            | 2390    | —                                | —        |
| Tm             | 1545            | 1720    | —                                | —        |
| Yb             | 824             | 1387    | —                                | —        |
| Lu             | 1652            | 2262    | —                                | —        |
| Ac             | 1197 (?)        | 3054    | —                                | —        |
| C              | B. 3527         | 4200    | 11                               | 0,670    |
| Si             | 1420            | 2287    | 20                               | 0,712    |
| Ge             | 958,5           | 2854    | 0-100                            | 0,340    |
| Sn             | 231,9           | 2270    | 20                               | 0,226    |
| Pb             | 327,5           | 1744    | 20-100                           | 0,128    |
| Ti             | 1800            | 3169    | 20                               | 0,595    |
| Zr             | 1900            | 4325    | 0-100                            | 0,280    |
| Hf             | 1977            | 5687    | —                                | —        |
| Th             | 1845            | 4227    | 0-100                            | 0,117    |
| P              | 44,1            | 280     | 7-30                             | 0,79     |

| Элемент         | Температура, °С |         | Удельная теплоемкость, Дж/(г·°С) |          |
|-----------------|-----------------|---------|----------------------------------|----------|
|                 | плавления       | кипения | область температур               | значение |
| As              | 814             | В. 610  | 0—100                            | 0,33     |
| Sb              | 630,5           | 1440    | 20                               | 0,2095   |
| Bi              | 271             | 1470    | 17—100                           | 0,1250   |
| V               | 1710            | 3000    | 0—100                            | 0,482    |
| Nb              | 2500            | 3700    | —                                | —        |
| Ta              | 2996            | 5292    | 58                               | 0,151    |
| Pa              | 1500 (?)        | —       | —                                | —        |
| S               | 112,8           | 444,6   | 0—55                             | 0,75     |
| Se              | 217             | 680     | 22—62                            | 0,355    |
| Te <sub>2</sub> | 452             | 1390    | 15—100                           | 0,201    |
| Po              | 254             | 962     | —                                | —        |
| Cr              | 1615            | 2482    | 17—100                           | 0,460    |
| Mo              | 2622            | 4804    | 15—93                            | 0,301    |
| W               | 3370            | 5927    | 20—100                           | 0,142    |
| U               | 1133            | 3862    | 0—100                            | 0,14     |
| F <sub>2</sub>  | -223            | -187    | —                                | —        |
| Cl <sub>2</sub> | -101,6          | -34,6   | 0—24                             | 0,947    |
| Br <sub>2</sub> | -7,2            | 58,8    | 13—45                            | 0,448    |
| I <sub>2</sub>  | 112,9           | 183     | 9—98                             | 0,226    |
| At <sub>2</sub> | 302             | 434     | —                                | —        |
| Mn              | 1260            | 2151    | 0—100                            | 0,461    |
| Tc              | 2127            | 3927    | —                                | —        |
| Re              | 3180            | 5642    | —                                | —        |
| Fe              | 1535            | 2735    | 18—100                           | 0,473    |
| Co              | 1480            | 3000    | 15—100                           | 0,435    |
| Ni              | 1452            | 2732    | 15—100                           | 0,457    |
| Ru              | 2450            | 4227    | 0—100                            | 0,255    |
| Pd              | 1553            | 2200    | 18—100                           | 0,247    |
| Os              | 2700            | 5300    | 19—98                            | 0,130    |
| Ir              | 2350            | 4800    | —                                | —        |
| Pt              | 1773,5          | 4300    | 15—100                           | 0,135    |

В. — возгонка вещества.

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

К термодинамическим свойствам относятся: энтропия, теплота образования, свободная энергия образования. Эти величины помещены в табл. 19, наряду с молекулярным объемом и молекулярным весом минералов (Роби, 1969).

### ПЛОТНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Плотность относится к важнейшим физическим свойствам. Средняя плотность типичных горных пород и некоторых стекол дана в табл. 20 и 21.

### ТЕМПЕРАТУРА ПЛАВЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ

Температура плавления ряда минералов может быть использована для определения верхнего температурного предела, при котором эти минералы могут кристаллизоваться. Сведения о температуре плавления минералов приводятся в табл. 22 (Барч и др., 1949); данные для кварца и силикатов — по годовичному отчету геофизической лаборатории института Карнеги (1964, 1965 гг.).

Термодинамические данные для минералов по Р. Роби (1969)

| Формула         | Название минерала        | Молекулярная масса, г | Молекулярный объем, см <sup>3</sup> /моль | Энтропия ( $S_{298,15}^{\circ}$ ), Дж/(моль·°C) | Теплота образования ( $\Delta H_{298,15}^{\circ}$ ), Дж/моль | Свободная энергия образования ( $\Delta F_{298,25}^{\circ}$ ), Дж/моль |
|-----------------|--------------------------|-----------------------|---|---|--|--|
| Элементы        |                          |                       |   |   |  |  |
| Ag              | Серебро                  | 107,880               | 10,274 ± 0,005                            | 42,74 ± 0,21                                    | 0  | 0  |
| Au              | Золото                   | 197,0                 | 10,216 ± 0,005                            | 47,72 ± 0,08                                    | 0  | 0  |
| C               | Алмаз                    | 12,011                | 3,4167 ± 0,0005                           | 2,370 ± 0,012                                   | 453 ± 5  | 2903 ± 15  |
| C               | Графит                   | 12,011                | 5,299 ± 0,002                             | 5,750 ± 0,021                                   | 1879 ± 21  | 63   |
| Cu              | Медь                     | 63,54                 | 7,114 ± 0,004                             | 33,30 ± 0,12                                    | 0  | 0  |
| Fe              | $\alpha$ -Железо         | 55,85                 | 7,093 ± 0,004                             | 27,20 ± 0,12                                    | 0  | 0  |
| Ni              | Никель                   | 58,71                 | 6,589 ± 0,005                             | 29,91 ± 0,84                                    | 0  | 0  |
| Pt              | Платина                  | 195,05                | 9,092 ± 0,005                             | 41,69 ± 0,21                                    | 0  | 0  |
| S               | $\alpha$ -Сера           | 32,066                | 15,53 ± 0,02                              | 31,72 ± 0,21                                    | 0  | 0  |
| S               | $\beta$ -Сера            | 32,066                | ...                                       | 32,59 ± 0,25                                    | 293 ± 84   | 63 ± 42  |
| S <sub>2</sub>  | Идеальный газ            | 64,132                | 24466,1 ± 1,0                             | 228,35 ± 0,49                                   | 30 840 ± 838   | 19 137 ± 838   |
| Pb              | Свинец                   | 207,21                | 18,289 ± 0,005                            | 64,94 ± 0,21                                    | 129 219  | 800 445  |
| Sn              | $\beta$ -Олово           | 118,70                | 16,290 ± 0,01                             | 51,53 ± 0,25                                    | 0  | 0  |
| Sb              | Сурьма                   | 121,76                | 18,18 ± 0,02                              | 45,67 ± 0,25                                    | 0  | 0  |
| As              | Мышьяк                   | 74,91                 | 12,96 ± 0,05                              | 35,02 ± 0,84                                    | 0  | 0  |
| Bi              | Висмут                   | 209,00                | 21,311 ± 0,01                             | 52,37 ± 0,84                                    | 0  | 0  |
| Zn              | Цинк                     | 65,38                 | 9,164 ± 0,005                             | 41,69 ± 0,21                                    | 0  | 0  |
| Se              | Селен                    | 78,96                 | 16,42 ± 0,02                              | 42,70 ± 0,21                                    | 0  | 0  |
| Te              | Теллур                   | 127,61                | 20,48 ± 0,02                              | 49,86 ± 0,42                                    | 0  | 0  |
| O <sub>2</sub>  | Кислород (идеальный газ) | 32,00                 | 24466,1 ± 1,0                             | 105,30 ± 0,04                                   | 0  | 0  |
| Cl <sub>2</sub> | Хлор (идеальный газ)     | 70,914                | 24466,1 ± 1,0                             | 223,33 ± 0,04                                   | 0  | 0  |
| Si              | Кремний                  | 28,09                 | 12,058 <sub>3</sub> ± 0,006               | 18,800 ± 0,038                                  | 0  | 0  |

| Формула                          | Название минерала | Молекулярная масса, г | Молекулярный объем, см <sup>3</sup> /моль | Энтропия (S <sub>298,15</sub> ), Дж/(моль·°C) | Теплота образования (ΔH <sub>298,15</sub> <sup>0</sup> ), Дж/моль | Свободная энергия образования (ΔF <sub>298,25</sub> <sup>0</sup> ), Дж/моль |
|----------------------------------|-------------------|-----------------------|---|---|---|---|
| <b>Г а л о и д ы</b>             |                   |                       |   |   |   |   |
| NaCl                             | Галит             | 58,448                | 27,018 ± 0,007                            | 72,48 ± 0,42                                  | -411 580 ± 1,257  | -384 680 ± 1466   |
| KCl                              | Сильвин           | 74,557                | 37,528 ± 0,007                            | 82,54 ± 0,21                                  | -436,590 ± 838  | -406,640 ± 1037   |
| NaF                              | Вилиамит          | 41,991                | 14,99 ± 0,01                              | 51,36 ± 0,29                                  | -671,090 ± 1257   | -540,050 ± 1466   |
| AgBr                             | Бромирит          | 187,796               | 28,99 ± 0,01                              | 107,20 ± 0,42                                 | -99,470 ± 838   | -96,370 ± 838   |
| AgCl                             | Кераргирит        | 143,337               | 25,73 ± 0,01                              | 96,30 ± 0,42                                  | -127,160 ± 1037   | -109,570 ± 838  |
| AgI                              | Иодерит           | 234,79                | 41,31 ± 0,02                              | 115,64 ± 168                                  | -61,090 ± 1466  | -63,200 ± 1466  |
| CaF <sub>2</sub>                 | Флюорит           | 78,08                 | 24,54 ± 0,01                              | 68,96 ± 0,33                                  | -1216,300 ± 1676  | -1163,980 ± 1885  |
| MgF <sub>2</sub>                 | Селаит            | 62,32                 | 19,64 ± 0,02                              | 57,40 ± 0,29                                  | -1104,060 ± 1257  | -1050,800 ± 1466  |
| HgCl                             | Каломель          | 236,067               | 32,94 ± 0,02                              | 96,37 ± 1,26                                  | -132,650 ± 1257   | -105,580 ± 838  |
| Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> | Криолит           | 209,953               | 70,86 ± 0,25                              | 238,80 ± 1,68                                 | -3287,800 ± 3770  | -3123,200 ± 4188  |
| MgCl <sub>2</sub>                | Хлормагнезит      | 95,234                | 40,95 ± 0,05                              | 89,74 ± 0,84                                  | -642,700 ± 1676   | -593,300 ± 1885   |
| HCl                              | Идеальный газ     | 36,465                | 24,4661 ± 1,0                             | 187,00 ± 0,21                                 | -92,180 ± 628   | -95,030 ± 754   |
| MnCl <sub>2</sub>                | Сашиг             | 125,854               | 42,11 ± 0,20                              | 118,40 ± 0,21                                 | -482,040 ± 503  | -441,800 ± 1257   |

**О к и с л ы**

|                                |               |        |               |               |                   |                   |
|--------------------------------|---------------|--------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Корунд        | 101,96 | 25,57 ± 0,01  | 51,11 ± 0,12  | -1 677 676 ± 1257 | -1584,100 ± 1380  |
| Al(OH) <sub>3</sub>            | Бёмит         | 59,988 | 19,54 ± 0,02  | 48,60 ± 0,21  | -986 740 ± 14 665 | -912 030 ± 14 660 |
| HAIO <sub>3</sub>              | Диаспор       | 59,988 | 17,76 ± 0,03  | 35,30 ± 0,16  | —                 | —                 |
| Al(OH) <sub>3</sub>            | Гиббсит       | 78,004 | 31,96 ± 0,04  | 70,18 ± 0,42  | -1 283 300 ± 1250 | -1 345 750 ± 1466 |
| As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Арсенолит     | 187,82 | 51,12 ± 0,03  | 107,2 ± 20,9  | -657 830 ± 1670   | -541 340 ± 2095   |
| BiO                            | Бромелит      | 23,013 | 8,315 ± 0,005 | 14,12 ± 0,08  | -599 580 ± 628    | -585 420 ± 838    |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Биемит        | 466,00 | 49,73 ± 0,06  | 151,7 ± 2,5   | -574 440 ± 1250   | -506 990 ± 2095   |
| CaO                            | Известь       | 56,08  | 16,76 ± 0,01  | 39,8 ± 0,84   | -627 000 ± 1250   | -604 826 ± 1466   |
| Ca(OH) <sub>2</sub>            | Порландит     | 74,096 | 33,06 ± 0,04  | 83,50 ± 0,4   | -987 160 ± 1885   | -897 738 ± 2095   |
| CdO                            | —             | 128,41 | 15,59 ± 0,01  | 54,9 ± 1,2    | -256 420 ± 838    | -222 070 ± 1047   |
| CO                             | Идеальный газ | 28,011 | 24,4661 ± 1,0 | 197,85 ± 0,08 | -110 680 ± 250    | -137 616 ± 335    |
| CO <sub>2</sub>                | Идеальный газ | 44,011 | 24,4661 ± 1,0 | 213,98 ± 0,08 | -395 955 ± 126    | -394 870 ± 209    |

|                                |                      |        |                |               |                   |                   |
|--------------------------------|----------------------|--------|----------------|---------------|-------------------|-------------------|
| ClO <sub>2</sub>               | Цирианит             | 172,13 | 23,86 ± 0,02   | 62,38 ± 0,12  | -1 089 900 ± 1466 | -1 026 550 ± 1885 |
| CoO                            | —                    | 74,94  | 11,64 ± 0,01   | 53,04 ± 0,33  | -239 240 ± 1250   | -269 400 ± 1466   |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Эсколант             | 152,02 | 28,98 ± 0,05   | 81,3 ± 1,2    | -1 442 600 ± 1676 | -1 050 900 ± 2095 |
| CuO                            | Тенорит              | 79,54  | 12,22 ± 0,02   | 42,73 ± 0,21  | -155 600 ± 1250   | -127 790 ± 1466   |
| Cu <sub>2</sub> O              | Куприт               | 143,08 | 23,44 ± 0,02   | 93,8 ± 0,8    | -169 276 ± 6280   | -146 700 ± 6700   |
| FeO                            | Вюстит               | 68,89  | 12,04 ± 0,04   | 57,57 ± 0,42  | -267 300 ± 1676   | -246 200 ± 2095   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Гематит              | 159,70 | 30,28 ± 0,02   | 87,57 ± 0,21  | -825 380 ± 4609   | -742 300 ± 5866   |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | Магнетит             | 231,55 | 44,53 ± 0,02   | 150,96 ± 0,42 | -1 120 400 ± 2095 | -1 018 630 ± 2933 |
| H <sub>2</sub> O               | Вода                 | 18,016 | 18,069 ± 0,003 | 70,00 ± 0,12  | -237 520 ± 42     | -237 520 ± 63     |
| H <sub>2</sub> O               | Идеальный газ        | 18,016 | 24,4661 ± 1,0  | 188,97 ± 0,04 | -232 180 ± 42     | -229 916 ± 63     |
| HfO <sub>2</sub>               | Гафния               | 210,50 | 20,82 ± 0,01   | 59,49 ± 0,42  | -1 114 500 ± 1250 | -1 057 590 ± 1466 |
| HgO                            | Монтроидит (красный) | 216,61 | 19,32 ± 0,02   | 70,30 ± 0,33  | -115 900 ± 377    | -58 660 ± 209     |
| MgO                            | Периклаз             | 40,32  | 11,25 ± 0,01   | 28,98 ± 0,17  | -602 500 ± 419    | -570 750 ± 628    |
| Mg(OH) <sub>2</sub>            | Брусит               | 58,336 | 24,64 ± 0,03   | 63,26 ± 0,21  | -926 800 ± 2095   | -735 695 ± 2304   |
| MnO                            | Манганозит           | 70,94  | 13,22 ± 0,01   | 59,79 ± 0,42  | -385 480 ± 460    | -363 306 ± 628    |
| MnO <sub>2</sub>               | Пирролюзит           | 86,94  | 16,61 ± 0,06   | 53,20 ± 0,42  | -521 445 ± 838    | -466 500 ± 1047   |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Биксбит              | 157,88 | 31,38 ± 0,03   | 110,60 ± 2,09 | -960 340 ± 8380   | -882 240 ± 9218   |
| Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | Гаусманит            | 228,82 | 46,96 ± 0,08   | 148,7 ± 4,19  | -1 388 500 ± 1676 | -1 281 190 ± 3352 |
| MoO <sub>3</sub>               | Молибдит             | 143,95 | 30,56 ± 0,02   | 77,98 ± 0,42  | -746 200 ± 419    | -641 400 ± 628    |
| NiO                            | Бунзенит             | 74,71  | 10,97 ± 0,01   | 38,04 ± 0,16  | -230 080 ± 419    | -211 890 ± 628    |
| PbO                            | Глет (красный)       | 223,21 | 23,91 ± 0,02   | 65,3 ± 0,8    | -220 070 ± 1257   | -189 590 ± 628    |
| PbO                            | Массикот (желтый)    | 223,21 | 23,15 ± 0,02   | 66,4 ± 0,8    | -216 790 ± 1257   | -1 887 590 ± 628  |
| SO <sub>2</sub>                | Идеальный газ        | 64,066 | 24,4661 ± 1,0  | 248,46 ± 0,42 | -297 260 ± 209    | -300 590 ± 251    |
| SO <sub>3</sub>                | Идеальный газ        | 80,066 | 24,4661 ± 1,0  | 256,4 ± 2,09  | -395 820 ± 293    | -360 940 ± 419    |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Валентинит           | 291,52 | 50,01 ± 0,06   | 123,1 ± 2,5   | -707 120 ± 5866   | -624 700 ± 4185   |
| SiO <sub>2</sub>               | α-Кварц              | 60,09  | 22,690 ± 0,005 | 41,39 ± 0,08  | -911 950 ± 1676   | -857 440 ± 2095   |
| SiO <sub>2</sub>               | α-Кристаллит         | 60,09  | 25,74 ± 0,02   | 43,49 ± 0,08  | -908 810 ± 3352   | -855 050 ± 3771   |
| SiO <sub>2</sub>               | α-Тридимит           | 60,09  | 26,53 ± 0,20   | 43,99 ± 0,42  | -908 800 ± 3771   | -855 060 ± 4185   |
| SiO <sub>2</sub>               | Кворт                | 60,09  | 20,64          | 38,9          | —                 | —                 |
| SnO <sub>2</sub>               | Касситерит           | 150,70 | 21,55 ± 0,02   | 52,37 ± 0,12  | -581 650 ± 628    | -520 800 ± 838    |
| TeO <sub>2</sub>               | Теллуриг             | 159,61 | 27,75 ± 0,02   | 70,3 ± 4,19   | -325 730 ± 3352   | -260 600 ± 2933   |
| ThO <sub>2</sub>               | Торианит             | 264,05 | 26,38 ± 0,01   | 64,36 ± 0,21  | -1 228 500 ± 1676 | -1 170 800 ± 1885 |
| TiO <sub>2</sub>               | Рутил                | 79,90  | 18,80 ± 0,02   | 50,44 ± 0,17  | -945 680 ± 419    | -888 500 ± 628    |
| TiO <sub>2</sub>               | Анатаз               | 79,90  | 20,49 ± 0,03   | 49,86 ±       | —                 | —                 |
| UO <sub>2</sub>                | Ураниг               | 270,07 | 24,62 ± 0,01   | 18,63 ± 0,42  | -1 085 200 ± 2514 | -1 033 040 ± 2933 |
| ZnO                            | Цингит               | 81,38  | 14,34 ± 0,01   | 46,70 ± 0,42  | -348 870 ± 838    | -318 800 ± 838    |
| ZrO <sub>2</sub>               | Бадделент            | 123,22 | 21,15 ± 0,06   | 50,78 ± 0,33  | -1 102 380 ± 2095 | -1 044 600 ± 1676 |

| Формула | Название минерала | Молекулярная масса, г | Молекулярный объем, см <sup>3</sup> /моль | Энтронпия (S <sub>298,15</sub> ) <sup>0</sup> , Дж/(моль·°С) | Теплота образования (ΔH <sub>298,15</sub> ) <sup>0</sup> , Дж/моль | Свободная энергия образования (ΔF <sub>298,25</sub> ) <sup>0</sup> , Дж/моль |
|---------|-------------------|-----------------------|---|--|--|--|
|---------|-------------------|-----------------------|---|--|--|--|

## Шпидели, алюминаты и титанаты

|                                  |                |        |              |               |                   |                   |
|----------------------------------|----------------|--------|--------------|---------------|-------------------|-------------------|
| MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | Шпидель        | 142,28 | 39,72 ± 0,03 | 70,70         | —                 | —                 |
| FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | Герцинит       | 173,81 | 40,82 ± 0,06 | 106,4 ± 0,8   | —                 | —                 |
| MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | Магнезиоферрит | 200,02 | ...          | 124,0 ± 2,5   | -1 429 500 ± 2933 | -1 318 050 ± 4185 |
| NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | Треворит       | 234,41 | 43,66 ± 0,08 | 131,9 ± 0,8   | —                 | —                 |
| MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | Пиррохромит    | 192,34 | 43,57 ± 0,06 | 106,0 ± 0,8   | —                 | —                 |
| FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | Хромит         | 223,87 | 44,01 ± 0,10 | 146,2 ± 1,7   | —                 | —                 |
| CaTiO <sub>3</sub>               | Перовскит      | 135,98 | 33,72 ± 0,08 | 93,8 ± 1,2    | -1 663 000 ± 2514 | -1 577 500 ± 2933 |
| FeTiO <sub>3</sub>               | Ильменит       | 151,75 | 31,71 ± 0,05 | 106,0 ± 1,2   | -1 238 390 ± 2514 | -1 160 080 ± 2933 |
| Fe <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub> | Ульвошпидель   | 223,60 | ...          | 169,00 ± 2,51 | —                 | —                 |
| MgTiO <sub>3</sub>               | Гейкилит       | 120,22 | 30,86 ± 0,03 | 74,58 ± 0,42  | -1 575 000 ± 1676 | -1 486 500 ± 2095 |

## Фосфаты

|  |                    |         |               |               |                   |                   |
|--|--------------------|---------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|
| AlPO <sub>4</sub>                                  | Беррилит           | 121,955 | 46,59 ± 0,05  | 90,90 ± 0,21  | —                 | —                 |
| Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> OH | Гидроксилит-апатит | 502,333 | 159,66 ± 0,40 | 390,90 ± 0,40 | —                 | —                 |
| Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F  | Фторапатит         | 504,325 | 157,60 ± 0,50 | 388,40 ± 0,17 | —                 | —                 |
| Fe(PO <sub>4</sub> )·2H <sub>2</sub> O             | Стреангит          | 186,857 | ...           | 171,49 ± 0,13 | -1 891 700 ± 4185 | -1 666 320 ± 5447 |

## Карбонаты и нитраты

|   |          |         |               |               |                   |                   |
|---|----------|---------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|
| CaCO <sub>3</sub>                                 | Кальцит  | 100,091 | 36,94 ± 0,02  | 93,0 ± 0,8    | -1 207 050 ± 1047 | -1 130 500 ± 838  |
| CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>               | Доломит  | 184,422 | 64,33 ± 0,04  | 155,40 ± 0,29 | -2 336 200 ± 3352 | -2 173 350 ± 3770 |
| CdCO <sub>3</sub>                                 | Отавит   | 172,421 | 34,40 ± 0,02  | 97,6 ± 2,5    | -750 170 ± 2514   | -625 200 ± 4185   |
| FeCO <sub>3</sub>                                 | Сидерит  | 115,861 | 29,38 ± 0,02  | 100,16 ± 2,5  | -746 600 ± 5020   | -674 840 ± 3350   |
| MgCO <sub>3</sub>                                 | Магнезит | 84,33   | 28,08 ± 0,01  | 65,70 ± 0,8   | -1 114 700 ± 1676 | -1 031 060 ± 1885 |
| Mg <sub>3</sub> Ca(CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> | Гунтит   | 353,084 | 122,90 ± 0,30 | —             | —                 | -422 200 ± 4185   |

3  
Запаз. 35

|   |            |         |              |               |                   |                   |
|---|------------|---------|--------------|---------------|-------------------|-------------------|
| MnCO <sub>3</sub>   | Родохрозит | 114,951 | 31,08 ± 0,01 | 100,10 ± 2,09 | -889 900 ± 3352   | -813 600 ± 4185   |
| ZnCO <sub>3</sub>   | Смитсонит  | 125,391 | 28,28 ± 0,01 | 84,46 ± 1,25  | -812 870 ± 2933   | -731 680 ± 4185   |
| BaCO <sub>3</sub>   | Витерит    | 197,371 | 45,81 ± 0,04 | 102,2 ± 2,09  | -1 219 140 ± 4693 | -1 139 200 ± 6285 |
| CaCO <sub>3</sub>   | Арагонит   | 100,091 | 34,16 ± 0,02 | 88,7 ± 1,25   | -1 205 840 ± 1046 | -1 130 000 ± 838  |
| PbCO <sub>3</sub>   | Перусит    | 267,221 | 40,60 ± 0,03 | 131,1 ± 3,3   | -570 250 ± 2933   | -627 900 ± 4185   |
| SrCO <sub>3</sub>   | Строцианит | 147,641 | 39,01 ± 0,03 | 88,7 ± 1,7    | -1 216 630 ± 2095 | -1 138 370 ± 838  |
| Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                 | Малахит    | 221,107 | 54,86 ± 0,05 | —             | —                 | -905 810 ± 2095   |
| Cu <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | Азурит     | 334,653 | 91,02 ± 0,07 | —             | —                 | -1 440 020        |
| KNO <sub>3</sub>  | К-селитра  | 101,108 | 48,04 ± 0,05 | 133,24 ± 6,3  | -492 940 ± 1257   | -393 096 ± 2095   |
| NaNO <sub>3</sub>   | Na-селитра | 84,999  | 37,60 ± 0,02 | 116,55 ± 4,0  | -466 900 ± 1257   | -366 029 ± 2095   |

## Сульфаты и бораты

|   |                |         |               |               |                   |                   |
|---|----------------|---------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|
| BaSO <sub>4</sub>   | Барит          | 233,426 | 51,11 ± 0,05  | 132,4 ± 0,8   | -1 474 670 ± 9637 | -1 362 880 ± 8370 |
| CaSO <sub>4</sub>   | Ангидрит       | 136,146 | 45,94 ± 0,05  | 106,7 ± 1,7   | -1 438 373 ± 4185 | -1 326 060 ± 4185 |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                    | Серная кислота | 98,082  | 53,57 ± 0,07  | 157,09 ± 0,21 | -814 850 ± 419    | -690 830 ± 628    |
| PbSO <sub>4</sub>   | Англезит       | 303,276 | 47,96 ± 0,05  | 148,73 ± 0,29 | -920 700 ± 1257   | -814 130 ± 838    |
| SrSO <sub>4</sub>   | Целестин       | 183,696 | 46,25 ± 0,05  | 118,02 ± 4,19 | -1 452 200 ± 7542 | -1 340 070 ± 6285 |
| ZnSO <sub>4</sub>   | Цинкозит       | 161,446 | 51,58 ± 0,05  | 113,0 ± 4,19  | -985 723 ± 6285   | -874 963 ± 3770   |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                    | Арканит        | 174,266 | 65,51 ± 0,4   | 175,8 ± 1,7   | -1 439 900 ± 3350 | -1 322 154 ± 2095 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                   | Тенардит       | 142,048 | 53,34 ± 0,06  | 149,37 ± 0,29 | -1 390 230 ± 2304 | -1 272 500 ± 2095 |
| CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O                              | Гипс           | 172,178 | 74,31 ± 0,16  | 199,02 ± 1,25 | -2 025 540 ± 4693 | -1 700 273 ± 4185 |
| MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O                              | Эпсомит        | 246,498 | 146,85 ± 0,50 | —             | -3 384 410 ± 8380 | —                 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O               | Мирабилит      | 322,208 | 219,83 ± 0,40 | 592,11 ± 0,63 | -3 648 740 ± 2933 | -2 969 136 ± 2933 |
| CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O                              | Халькантит     | 249,686 | 109,08 ± 0,20 | 305,60 ± 4,2  | -2 262 280 ± 4185 | -1 880 320 ± 5028 |
| CuSO <sub>4</sub> ·Cu <sub>3</sub> (OH) <sub>6</sub>              | Брошантит      | 452,274 | 113,60 ± 1,15 | 293,8 ± 17,0  | -2 206 564 ± 4920 | -1 821 933 ± 2511 |
| Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O | Бура           | 381,422 | —             | —             | -6 266 830 ± 8370 | —                 |

## Силикаты

|   |                   |         |               |               |                  |                   |
|---|-------------------|---------|---------------|---------------|------------------|-------------------|
| Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>  | Андалузит         | 162,05  | 51,54 ± 0,01  | 92,32 ± 0,42  | —                | —                 |
| Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>  | Киазит            | 162,05  | 44,11 ± 0,02  | 83,78 ± 0,34  | —                | —                 |
| Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>  | Силлиманит        | 162,05  | 49,91 ± 0,02  | 96,27 ± 0,46  | —                | —                 |
| CaSiO <sub>3</sub>  | Волластонит       | 116,17  | 39,94 ± 0,08  | 82,00 ± 0,84  | -88 930 ± 2930   | -89 200 ± 3348    |
| CaSiO <sub>3</sub>  | Псевдоволластонит | 116,17  | 40,08 ± 0,08  | 87,46 ± 0,84  | —                | —                 |
| CaMg(SiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>  | Диопсид           | 216,58  | 66,10 ± 0,10  | 143,28 ± 0,8  | -152 900 ± 6280  | -151 630 ± 7110   |
| MgSiO <sub>3</sub>  | Клиноэпстатит     | 100,41  | 31,47 ± 0,07  | 67,88 ± 0,0   | -36 360 ± 628    | -36 240 ± 837     |
| MnSiO <sub>3</sub>  | Родонит           | 131,03  | 35,32 ± 0,30  | 102,53 ± 2,50 | -24 780 ± 711    | -25 210 ± 1674    |
| NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>  | Жадит             | 202,151 | 60,98 ± 0,40  | 133,65 ± 1,26 | -152 900 ± 4185  | -149 220 ± 5860   |
| Ca <sub>2</sub> Mg <sub>5</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub> | Тремолит          | 812,496 | 272,95 ± 0,90 | 549,30 ± 1,26 | -505 710 ± 10460 | -486 148 ± 12 570 |

| Формула  | Название минерала          | Молекулярная масса, г | Молекулярный объем, см <sup>3</sup> /моль | Энтропия ( $S_{298,15}^{\circ}$ ), Дж/(моль·°C) | Теплота образования ( $\Delta H_{298,15}^{\circ}$ ), Дж/моль | Свободная энергия образования ( $\Delta F_{298,25}^{\circ}$ ), Дж/моль |
|--|----------------------------|-----------------------|---|---|--|--|
| CaTiSiO <sub>5</sub>   | Сфен                       | 196,07                | 55,70 ± 0,30                              | 129,38 ± 0,84                                   | -112 360 ± 1046  | -11 257 ± 1460   |
| γ·Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>   | Са-оливин                  | 172,25                | 58,63 ± 0,35                              | 120,52 ± 0,84                                   | -137 180 ± 2511  | -137 080 ± 2930  |
| Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>   | Фаялит                     | 203,79                | 46,39 ± 0,8                               | 145,37 ± 1,67                                   | -34 650 ± 1674   | -30 470 ± 2093   |
| CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>                                   | Анортит                    | 278,22                | 100,73 ± 0,15                             | 202,76 ± 1,26                                   | -91 275 ± 2930   | -100 037 ± 3767  |
| NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>   | Альбит                     | 262,241               | 100,21 ± 0,19                             | 210,13 ± 1,67                                   | -150 390 ± 6280  | -157 218 ± 7533  |
| KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>  | Ортоклаз                   | 278,35                | —   | 219,70  | -213 620 ± 4185  | —  |
| KAlSiO <sub>4</sub>  | Калифилит                  | 158,17                | 59,90 ± 0,08                              | 133,44 ± 1,26                                   | —  | —  |
| KAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>  | Лейцит                     | 218,26                | 88,39 ± 0,05                              | 184,35 ± 1,67                                   | -193 340 ± 6280  | —  |
| NaAlSiO <sub>4</sub>   | Нефелин                    | 142,061               | 54,17 ± 0,15                              | 124,38 ± 1,26                                   | -129 460 ± 4185  | -135 410 ± 5442  |
| Na <sub>2</sub> AlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ·H <sub>2</sub> O                 | Анальцит                   | 220,167               | 97,50 ± 0,10                              | 234,53 ± 2,51                                   | -137 200 ± 2930  | -142 775 ± 3767  |
| NaAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>   | Дегидратированный анальцит | 202,151               | —   | 175,47 ± 1,67                                   | -107 050 ± 2930  | -115 880 ± 4185  |
| CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>                                   | Гексагональный анортит     | 278,22                | —   | 191,84 ± 1,26                                   | -70 820 ± 2511   | -76 302 ± 3348   |
| CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (OH) × × H <sub>2</sub> O         | Клаусовит                  | 314,252               | 101,33 ± 0,15                             | 237,750 ± 2,09                                  | -155 800 ± 2511  | -133 234 ± 3348  |
| Ca <sub>2</sub> Mg <sub>4</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>24</sub> ·7H <sub>2</sub> O | Леонардит                  | 922,91                | —   | 922,37 ± 6,70                                   | -318 670 ± 6280  | -284 890 ± 8370  |
| Ca <sub>2</sub> MgSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                                   | Акерманит                  | 272,68                | 92,82                                     | —   | -183 440 ± 2930  | —  |
| Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>   | Форстерит                  | 140,73                | 43,67 ± 0,08                              | 95,21 ± 0,82                                    | -63 290 ± 646  | -63 208 ± 14 466   |
| CaMgSiO <sub>4</sub>   | Монтчеллит                 | 156,49                | 51,37 ± 1,5                               | —   | -115 344 ± 2511  | —  |
| Mn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>   | Тенорит                    | 201,97                | 48,62 ± 0,10                              | 139,37 ± 4,18                                   | -49 260 ± 2511   | -49 990 ± 4185   |
| β·Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>   | Ларнит                     | 172,25                | 51,60 ± 0,40                              | 127,79 ± 0,82                                   | -126 490 ± 646   | -128 500 ± 1446  |
| Be <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>   | Фенакит                    | 110,116               | 37,20 ± 0,06                              | 64,34 ± 3,35                                    | —  | —  |
| Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>   | Виллемит                   | 222,85                | 52,42 ± 0,13                              | 131,15 ± 0,84                                   | -29 250 ± 586  | -30 080 ± 1674   |
| ZrSiO <sub>4</sub>   | Циркон                     | 183,31                | 39,27 ± 0,15                              | 84,53 ± 0,84                                    | —  | —  |
| Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>                  | Тальк                      | 379,336               | 134,30 ± 0,80                             | 260,89 ± 0,63                                   | -187 860 ± 2093  | -171 370 ± 2093  |
| KMg <sub>3</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> F                               | Фторфлогопит               | 421,31                | 146,38 ± 0,50                             | 317,70 ± 2,09                                   | -87 380 ± 8370   | —  |
| KMg <sub>3</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>               | Флогопит                   | 417,326               | 149,66 ± 1,00                             | 314,76 ± 1,26                                   | —  | —  |
| Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH) <sub>4</sub>                   | Каолинит                   | 258,172               | —   | 203,10 ± 1,26                                   | -29 880 ± 2093   | -8 296 ± 2930  |

|   |          |         |              |               |                |               |
|---|----------|---------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| * <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> | Диксит   | 258,172 | 99,31 ± 0,30 | 197,12 ± 1,26 | -28 620 ± 2093 | -5 820 ± 2930 |
| Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH) <sub>4</sub>                | Галуазит | 258,172 | —            | 203,51 ± 1,26 | -11 170 ± 2093 | -9 349 ± 2930 |

## Сульфиды, теллуриды, селениды

|                   |               |         |               |               |                 |                 |
|-------------------|---------------|---------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Ag <sub>2</sub> S | Аргентит      | 247,826 | 34,21 ± 0,05  | 143,02 ± 0,42 | -32 380 ± 1257  | -40 020 ± 837   |
| CaS               | Ольдгамит     | 72,146  | 27,81 ± 0,02  | 56,68 ± 1,26  | -478 830 ± 2511 | -113 070 ± 2093 |
| CdS               | Гринокит      | 144,476 | 29,94 ± 0,02  | 70,30 ± 1,67  | —               | —               |
| CuS               | Коввелит      | 95,606  | 20,43 ± 0,04  | 66,80 ± 1,67  | -80 200 ± 1257  | -86 747 ± 1257  |
| Cu <sub>2</sub> S | Халькозин     | 127,672 | 27,47 ± 0,06  | 120,78 ± 2,09 | -111 360 ± 1046 | -101 742 ± 1257 |
| FeS               | Троилит       | 87,916  | 18,17 ± 0,05  | 60,35 ± 0,21  | -171 500 ± 1674 | -160 406 ± 1883 |
| FeS <sub>2</sub>  | Пирит         | 119,982 | 23,94 ± 0,02  | 53,15 ± 0,13  | —               | —               |
| FeSe <sub>2</sub> | Ферросилит    | 134,81  | 29,92 ± 0,08  | 86,88 ± 0,25  | -20 150 ± 419   | -33 124 ± 419   |
| H <sub>2</sub> S  | Идеальный газ | 34,082  | 24466,1 ± 1,0 | 205,61 ± 0,42 | -46 297 ± 2093  | -42 278 ± 837   |
| HgS               | Киноварь      | 232,676 | 30,17 ± 0,04  | 96,27 ± 4,18  | -205 070 ± 1674 | -209 384 ± 1674 |
| MnS               | Алабадин      | 87,006  | 21,46 ± 0,01  | 78,27 ± 1,67  | -253 190 ± 6460 | -244 370 ± 6460 |
| MoS <sub>2</sub>  | Молибденит    | 160,082 | 32,03 ± 0,07  | 62,62 ± 0,21  | -84 910 ± 4185  | -86 200 ± 4185  |
| NiS               | Миллерит      | 90,776  | 16,89 ± 0,01  | 66,13 ± 4,18  | -97 778 ± 1046  | -96 200 ± 837   |
| PbS               | Галенит       | 239,276 | 31,49 ± 0,01  | 91,40 ± 1,3   | —               | —               |
| PbSe              | Клаустолит    | 286,17  | 34,61 ± 0,01  | 102,45 ± 2,09 | -70 737 ± 2093  | -69 480 ± 1257  |
| PbTe              | Алатаит       | 334,82  | 40,60 ± 0,01  | 109,99 ± 2,09 | -82 460 ± 3348  | -78 560 ± 3767  |
| PtS               | Куперит       | 227,156 | 22,15 ± 0,02  | 55,10 ± 0,12  | -105 300 ± 1257 | -100 240 ± 1466 |
| SnS               | Герцбергит    | 150,766 | 29,01 ± 0,02  | 78,85 ± 0,83  | —               | —               |
| WS <sub>2</sub>   | Тунгстенит    | 247,992 | 32,07 ± 0,05  | 95,00 ± 8,4   | -205 900 ± 4185 | -201 160 ± 4600 |
| ZnS               | Сфалерит      | 97,446  | 23,83 ± 0,01  | 57,65 ± 0,83  | -129 215 ± 837  | -75 925 ± 837   |
| S <sub>2</sub>    | Идеальный газ | 64,132  | 24466,1 ± 1,0 | 228,17 ± 0,42 | -102 575 ± 209  | -49 890 ± 646   |
| S <sub>8</sub>    | Идеальный газ | 256,528 | 24466,1 ± 1,0 | 432,43 ± 1,67 | —               | —               |

## Средняя плотность полнокристаллических изверженных пород

| Порода                     | Число измеренных образцов | Средняя плотность, г/см <sup>3</sup> | Пределы колебания плотностей, г/см <sup>3</sup> |
|----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---|
| Гранит                     | 155                       | 2,667                                | 2,516—2,809                                     |
| Гранодиорит                | 11                        | 2,716                                | 2,668—2,787                                     |
| Сиезит                     | 24                        | 2,757                                | 2,630—2,899                                     |
| Кварцевый диорит           | 21                        | 2,806                                | 2,680—2,960                                     |
| Диорит                     | 13                        | 2,839                                | 2,721—2,960                                     |
| Норит                      | 11                        | 2,984                                | 2,720—3,020                                     |
| Габбро (включая оливинное) | 27                        | 2,076                                | 2,850—3,120                                     |
| Диабаз (свежий)            | 40                        | 2,965                                | 2,804—3,110                                     |
| Перидотит (свежий)         | 3                         | 3,234                                | 3,152—3,276                                     |
| Дунит                      | 16                        | 3,277                                | 3,204—3,314                                     |
| Пироксенит                 | 8                         | 3,231                                | 3,10—3,318                                      |
| Анортозит                  | 12                        | 2,734                                | 2,640—2,920                                     |

Таблица 21

## Плотность кристаллических пород и соответствующих им стекол (искусственно приготовленных)

| Порода                  | Плотность, г/см <sup>3</sup> |        | Разница между плотностью породы и стекла, % |
|-------------------------|------------------------------|--------|---|
|                         | породы                       | стекла |   |
| Гранит, Шап Филлс       | 2,656                        | 2,446  | 7,90  |
| Гранит, Питерхид        | 2,630                        | 2,376  | 9,66  |
| Сиезит, Планшер, Граунд | 2,724                        | 2,560  | 6,02  |
| Тоналит, Новая Зеландия | 2,765                        | 2,575  | 6,87  |
| Диорит                  | 2,833                        | 2,680  | 5,40  |
| Диорит, Макфилд         | 2,880                        | 2,710  | 5,90  |
| Габбро, Каррок Филд     | 2,940                        | 2,791  | 5,07  |
| Оливинный долерит       | 2,889                        | 2,775  | 3,95  |
| Долерит, Роули Раг      | 2,800                        | 2,640  | 5,71  |
| Долерит, Уин Силл       | 2,925                        | 2,800  | 2,27  |
| Диабаз, Палисадес       | 2,96                         | 2,76   | 6,8   |
| Эклогит                 | 3,415                        | 2,746  | 19,6  |

Таблица 22

## Температура плавления

| Формула | Минерал | Температура плавления, °С |
|---------|---------|---------------------------|
|---------|---------|---------------------------|

## Самородные элементы

|    |         |        |
|----|---------|--------|
| S  | Сера    | 112,3  |
| Bi | Висмут  | 271,3  |
| Pb | Свинец  | 327,6  |
| Ag | Серебро | 961    |
| Au | Золото  | 1063,0 |

| Формула                             | Минерал                          | Температура плавления, °С    |
|-------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| О к и с л ы                         |                                  |                              |
| $Al_2O_3$                           | Корунд                           | 2050 ± 10                    |
| $MgO$                               | Периклаз                         | 2800 ± 13                    |
| $MoO_3$                             | Молибдит                         | 795 ± 2                      |
| $Sb_2S_3$                           | Валентинит (ромбический)         | 655                          |
| $Sb_2S_3$                           | Валентинит (кубический)          | 642                          |
| $FeO$                               | Вюстит                           | 1370                         |
| $SiO_2$                             | Кварц                            | 1413 ± 5                     |
| С у л ь ф а т ы                     |                                  |                              |
| $BaSO_4$                            | Барит                            | Плавится с распадом,<br>1580 |
| $CaSO_4$                            | Ангидрит                         | Плавится с распадом,<br>1450 |
| $SrSO_4$                            | Целестин                         | Плавится с распадом,<br>1005 |
| Ф о с ф а т ы и н и т р а т ы       |                                  |                              |
| $Ca_{10}(PO_4)_6ClF$                | Апатит                           | 1270                         |
| $Ca_5(PO_4)_3Cl$                    | Хлорапатит                       | 1580                         |
| $Ca_5(PO_4)_3F$                     | Фторапатит                       | 1660                         |
| $Ca_5(PO_4)_3OH$                    | Гидроксилapatит                  | Распад при 1400              |
| $Ca_5(PO_4)_3CaCO_3$                | Карбонатапатит (при 100 $CO_2$ ) | 1470                         |
| $NaN_3O_3$                          | Натриевая селитра                | 370                          |
| Г а л о и д ы                       |                                  |                              |
| $AgCl$                              | Керраргирит                      | 455 ± 5                      |
| $AgBr$                              | Бромаргирит                      | 430                          |
| $CaF_2$                             | Флюорит                          | 1378                         |
| $FeCl_3$                            | Моллизит                         | 300 ± 5, кипит при 370       |
| $Hg_2Cl_2$                          | Каломель                         | 543                          |
| $HgCl_2$                            | Сулема                           | 277                          |
| $KCl$                               | Сильвин                          | 770                          |
| $NaCl$                              | Галит                            | 800,4 ± 0,5                  |
| С у л ь ф и д ы и и х а н а л о г и |                                  |                              |
| $Ag_2Te$                            | Гассит искусственный             | 959 ± 2                      |
| $As_2S_3$                           | Аурипигмент искусственный        | 310                          |
| $AsS$                               | Реальгар искусственный           | 320                          |
| $Cu_2S$                             | Халькозин (в вакууме)            | 1130                         |
| $FeS_x$                             | Пирротин, троилит                | 1175                         |
| (x — от 1 до 1,14)                  |                                  |                              |
| $MoS_2$                             | Молибденит                       | 730                          |
| $Sb_2S_3$                           | Стибнит искусственный            | 546                          |

| Формула                              | Минерал     | Температура плавления, °С |
|--------------------------------------|-------------|---------------------------|
| <b>Силикаты</b>                      |             |                           |
| $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_3$ | Анортит     | 1553                      |
| $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$          | Альбит      | 1118 ± 3                  |
| $\text{NaAlSi}_4\text{O}_{10}$       | Нефелин     | 1526 ± 2                  |
| $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$           | Калифилит   | 1750                      |
| $\text{KAlSi}_2\text{O}_6$           | Лейцит      | 1686 ± 5                  |
| $\text{CaSiO}_3$                     | Волластонит | 1544 ± 2                  |
| $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$        | Диопсид     | 1391,5                    |
| $\text{MgSiO}_3$                     | Энстатит    | 1557                      |
| $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$            | Форстерит   | 1890                      |
| $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$            | Фаялит      | 1205                      |
| $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ | Галенит     | 1590 ± 50                 |
| $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ | Акерманит   | 1454 ± 2                  |

Таблица 23

## Температура разложения

| Формула  | Минерал                      | Характер разложения и температура, °С  |
|--|------------------------------|--|
| $\text{Ca}(\text{OH})_2$<br>$\text{Fe}(\text{OH})_2$   | —                            | $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ , 545<br>При изобарической дегидратации переходит в $\text{Fe}_3\text{O}_4$ при 200 |
| $\text{FeOOH}$<br>$\text{FeOH}$  | Гетит<br>Лепидокрокит        | $\rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$ (гематит), 275<br>$\rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$ (гематит), 240   |
| $\text{BaCO}_3$  | Витерит                      | Диссоциирует при 1352<br>( $1,01 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2 \text{ CO}_2$ )  |
| $\text{CaCO}_3$  | Кальцит                      | Диссоциирует на $\text{CaO} + \text{CO}_2$<br>при $885 \pm 10$   |
| $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$<br>$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$<br>$\text{FeCO}_3$ | Азурит<br>Малахит<br>Сидерит | Разлагается при 200<br>То же<br>Диссоциирует при 282<br>( $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па CO}_2$ )  |
| $\text{MgCO}_3$  | Магнезит                     | Диссоциирует при 373<br>( $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па CO}_2$ ), может быть задержка диссоциации)  |
| $\text{MnCO}_3$  | Родохрозит                   | Диссоциирует при 400<br>( $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па CO}_2$ )  |
| $\text{SrCO}_3$  | Стронцианит                  | Диссоциирует при 189<br>( $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па CO}_2$ )  |
| $\text{ZnCO}_3$  | Смитсонит                    | Диссоциирует при 296<br>( $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па CO}_2$ )  |
| $\text{BaSO}_4$  | Барит                        | Диссоциирует при 1510<br>( $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ )  |
| $\text{CaSO}_4$  | Ангидрит                     | Диссоциирует при 1230<br>( $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ )  |
| $\text{CaK}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   | Полигалит                    | Распадается при 298<br>( $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па SO}_2$ )   |
| $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$   | Мелантерит                   | Распадается при 480  |

| Формула                                      | Минерал              | Характер разложения и температура, °С   |
|--|----------------------|---|
| $MgSO_4 \cdot KCl \cdot 3H_2O$               | Каинит               | Распадается при 158<br>( $1,01 \cdot 10^5$ Па $SO_2$ )                                      |
| $PbSO_4$<br>$ZnSO_4$                         | Англезит<br>Цинкозит | Распадается при 1000<br>Распадается при 740<br>( $1,01 \cdot 10^5$ Па $SO_2$ )              |
| $4AlPO_4 \cdot 2Al(OH)_3 \cdot 9H_2O$<br>AsS | Вавелит<br>Реальгар  | Дегидратируется при 250<br>В воде устойчив до 70°, да-<br>лее разлагается с выделе-<br>нием |
| $As_2S_3$                                    | Аурипигмент          | В воде устойчив до 40°, выше<br>разлагается с выделением                                    |
| CuS  | Ковеллин             | Диссоциирует при $510 \pm 10$ ,<br>( $1,01 \cdot 10^5$ Па S)                                |
| $FeS_2$                                      | Пирит                | Диссоциирует при 690<br>( $1,01 \cdot 10^5$ Па S), при 480<br>в вакууме                     |

## Температуры превращений

Таблица 24

| Формула | Превращения | Температура, °С |
|---------|-------------|-----------------|
|---------|-------------|-----------------|

## Окислы

|           |  |               |
|-----------|--|---------------|
| $Fe_2O_3$ | Гематит → магнетит → гематит                 | 550           |
| $Sb_2O_3$ | Валентинит ромбический → кубиче-<br>ский     | 557           |
| $SiO_2$   | Кварц α-тригональный → β-гексаго-<br>нальный | $573 \pm 3$   |
|           | Кварц → тридимит                             | $867 \pm 3$   |
|           | Тридимит → кристобалит                       | $1470 \pm 10$ |

## Карбонаты

|                      |   |              |
|----------------------|---|--------------|
| $BaCO_3$             | Витерит α → β                               | 810          |
|                      | β → α                                       | 982          |
| $CaCO_3$             | Арагонит → кальцит                          | 425          |
| $SrCO_3$             | Стронцианит ромбический → триго-<br>нальный | 926          |
| $CaSO_4$             | Ангидрит ромбический → моноклин-<br>ный     | 1193         |
| $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ | Гипс → ангидрит                             | $42 \pm 2$   |
| $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ | Халькантит $CuSO_4 \cdot 3H_2O$             | 95           |
| $CuSO_4 \cdot 3H_2O$ | → $CuSO_4 \cdot H_2O$                       | 114          |
| $CuSO_4 \cdot H_2O$  | → $CuSO_4$                                  | $250 (SO_2)$ |
| $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ | Мелантерит $FeSO_4 \cdot 4H_2O$             | 56,7         |
| $FeSO_4 \cdot 4H_2O$ | → $FeSO_4 \cdot H_2O$                       | 100          |
| $FeSO_4 \cdot H_2O$  | → $FeSO_4$                                  | 300          |
| $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ | Эпсомит → $MgSO_4 \cdot 6H_2O$              | 51           |
| $MgSO_4 \cdot 6H_2O$ | → $MgSO_4 \cdot H_2O$ — кизерит             | 68           |
| $MnSO_4 \cdot 7H_2O$ | Маллордит → $MnSO_4 \cdot 6H_2O$            | 5            |

| Формула минерала        | Преобразования                                 | Температура, °C |
|-------------------------|--|-----------------|
| $MnSO_4 \cdot 6H_2O$    | $\rightarrow MnSO_4 \cdot 4H_2O$               | 8               |
| $MnSO_4 \cdot 4H_2O$    | $\rightarrow MnSO_4 \cdot 3H_2O$               | 18              |
| $MnSO_4 \cdot 3H_2O$    | $\rightarrow MnSO_4 \cdot 2H_2O$               | 40              |
| $MnSO_4 \cdot 2H_2O$    | $\rightarrow MnSO_4 \cdot H_2O$                | 57              |
| $MnSO_4 \cdot 2H_2O$    | $\rightarrow MnSO_4 \cdot H_2O$                | 57              |
| $MnSO_4 \cdot H_2O$     | $\rightarrow MnSO_4$                           | 117             |
| $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ | Мирабилит $\rightarrow Na_2SO_4$               | 32,4            |
| $PbSO_4$                | Англезит ромбический $\rightarrow$ моноклинный | 865             |

## Сульфиды и другие минералы

|                     |  |               |
|---------------------|--|---------------|
| $AgBiSe$            | Метальдит кубический $\rightarrow$ ромбический                     | 195 $\pm$ 5   |
| $AgCuSe$            | Эвкайрит кубический $\rightarrow$ тетрагональный                   | 190           |
| $Ag_2S$             | Аргентит (кубический) $\rightleftharpoons$ айкинит (моноклинный)   | 175           |
| $Ag_2Se$            | Науманит кубический $\rightarrow$ моноклинный                      | 133           |
| $Ag_2Te$            | Гессит $\alpha \rightarrow \beta$                                  | 140           |
| $Ag_2S_3$           | Аурипигмент желтый $\rightarrow$ красный                           | 170           |
| $AsS$               | Реальгар красный $\rightarrow$ черный                              | 267           |
| $Cu_3As$            | Домейкит кубический $\rightarrow$ гексагональный                   | 225           |
| $Cu_5FeS_4$         | Борнит кубический $\rightarrow$ тетрагональный                     | 170—200       |
| $CuFeS_2$           | Халькопирит кубический $\rightarrow$ тетрагональный                | 550           |
| $Cu_2S$             | Халькозин кубический $\alpha \rightarrow \beta$ -ромбический       | 90—5          |
|                     | Халькозин гексагональный $\rightleftharpoons$ ромбический (Рамдор) | 103           |
| $Cu_2S \cdot Ag_2S$ | Штрэммерит ромбический $\rightleftharpoons$ кубический             | 100           |
| $Cu_2Te$            | Вейссит кубический $\rightarrow$ псевдотетрагональный              | 351           |
| $FeS_x$             | Пирротин, тромлит гексагональный $\rightarrow$ ромбический         | 136           |
| $FeS_2$             | Пирит, марказит  |               |
| $HgS$               | Марказит $\rightarrow$ пирит                                       | 415           |
|                     | $\alpha$ -киноварь (устойчива)                                     |               |
|                     | Метациннабарит (неустойчив)  |               |
|                     | Тетациннабарит $\rightarrow$ киноварь                              | 400           |
| $NiS$               | Миллерит гексагональный $\rightarrow$ тригональный                 | 352           |
| $ZnS$               | Сфалерит $\rightarrow$ вюрцит (гексагональный)                     | 1020 $\pm$ 10 |

## ТЕМПЕРАТУРА РАЗЛОЖЕНИЯ ПРИРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Аналогично температуре плавления температура разложения минералов на некоторые составные компоненты может показывать верхний температурный предел, при котором мог образоваться минерал. В табл. 23 приведены температуры разложения некоторых природных соединений (Филимонова, 1965).

## ТЕМПЕРАТУРА ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

При определенных температурах ряд минералов обнаруживает переход от одной кристаллографической модификации к другой. Наиболее распространенным минералом, испытывающим изменение кристаллографической структуры при температуре 573° С, является кварц. Данные о температурах перехода различных модификаций минералов приведены в табл. 24 (Филимонова, 1965).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бокий Г. Б. Введение в Кристаллохимию. М., Изд-во МГУ, 1954. 450 с.
- Барч Фр., Шерер Дж., Спайсер Г. Справочник для геологов по физическим константам. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1949. 260 с.
- Дэли Р., Манжер Дж., Кларк С. П. Плотность пород. Пер. с англ. — В кн.: Справочник физических констант горных пород. Под ред. С. Кларка мл. М., 1969, с. 27—34.
- Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. К. П. Мищенко и А. А. Равделя. Л., «Химия», 1967. 188 с.
- Лебедев В. И. Ионно-атомные радиусы и их значения для геохимии и химии. Л., Изд-во ЛГУ, 1969. 195 с.
- Наутов Г. Б., Рыженко В. Н., Ходаковский Н. Л. Справочник термодинамических величин (для геологов). М., Атомиздат, 1971. 240 с.
- Парлинг Л. Природа химической связи. Пер. с англ. М.—Л., Госхимиздат, 1947. 440 с.
- Поваренных А. С. О некоторых основных вопросах кристаллохимии и их понимании в минералогии. — «Зап. Всесоюз. минерал. об-ва», 1955, ч. 84, № 4, с. 25—30.
- Поваренных А. С. Твердость минералов. Киев, 1963. 250 с. (АН УССР).
- Поваренных А. С. Кристаллохимическая классификация минеральных видов. Киев, «Наукова думка», 1966. 548 с.
- Роби П. А. Термодинамические свойства минералов. — В кн.: Справочник физических констант горных пород. Пер. с англ. М., 1969, с. 405—426.
- Филимонова А. А. Рудообразующие минералы и их сростания как геологические термометры. — В кн.: Минералогическая термометрия и барометрия. М., 1965, с. 230—240.
- Ahrens L. H. The use of ionisation potentials I., Ionic radii of the elements. — «Geochimica et Cosmochimica Acta», 1952, 2, 155—169.
- Goldschmidt V. M. Kristallchemie. — Handwörterbuch der Naturwissenschaften. 2. Aufl., Bd. 5. Jena, Gustav Fischer, 1934.
- Gordy W. Electronegativities of the elements. — «Journ. of Chem. Phys.», 1956, v. 24, p. 439—445.
- IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry). Comptes Rendus, XXII, Conference, London, Butterworths Sci. Publ. 1963, 800 p.
- Pauling L. The sizes of ions and the structure of ionic crystals. — «J. Amer. Chem. Soc.», 1927, 49 p. 763—775.
- Pauling L. The nature of chemical bond. Ithaca, N. Y. Cornell University Press, 1960, 500 p.
- Shannon R. D. and Prewitt C. T. Effective crystal radii in oxides and fluorides. — «Acta Crystallogr.», 1969, B-25, p. 925—946.
- Slater J. C. Atomic radii in crystals. — «Journ. of Chem. Phys.», 1964, vol. 41, No. 10, p. 320—330.
- Waber J. T. and Cromer D. T. Orbital radii of atoms and ions. — «Journ. of Chem. Phys.», 1965, vol. 42, No. 12, p. 1540—1548.
- Whittaker E. J. W. and Muntus R. Ionic radii use in geochemistry. — «Geochimica et Cosmochim. Acta», 1970, v. 34, No 9, p. 945—956.

## РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

## ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Изучение распространения элементов началось в первой половине XIX столетия. Большое внимание этому уделяли классики геохимии Ф. Кларк, В. М. Гольдшмидт, В. И. Вернадский, А. Е. Ферсман. А. Е. Ферсман ввел понятие о кларке как о среднем содержании элемента в определенной природной системе.

Уже первые анализы горных пород позволили установить ряд эмпирических закономерностей распространения химических элементов. Так было установлено, что в природе преобладают элементы легкие, начала периодической системы Д. И. Менделеева, а с возрастанием порядкового номера распространенность их неравномерно убывает. Преобладают также элементы четного порядкового номера по сравнению с соседними нечетными элементами. Эта закономерность, как известно, получила название правила Оддо — Гаркинса. Изучение химического состава метеоритов, а впоследствии состава звездных атмосфер с помощью спектрального анализа показало, что главные особенности распространения элементов в значительной мере являются общими для космических тел галактики и для Земли в целом. В настоящее время не вызывает сомнения то обстоятельство, что главные особенности распространения элементов, или вернее основные черты первоначальной распространенности элементов в Солнечной системе определяются ядерными свойствами. Поэтому для выяснения общих закономерностей распространения элементов важно знать распространенность не только их самих, но и отдельных ядерных видов (изотопов). Связь между распространенностью ядерных видов (изотопов) в зависимости от основных их параметров рассмотрена в главе V (изотопы в геохимии).

В нижеприведенных таблицах суммированы наиболее новые данные по распространению элементов в космических телах, земной коре и наиболее ее крупных составных частях: типичных горных породах, а также в гидросфере, почвах, наземных растениях, живом веществе биосферы и атмосфере.

При пользовании таблицами следует иметь в виду, что средние содержания элементов в земной коре по Ф. Кларку, Г. Вашингтону, А. Е. Ферсману даны лишь для верхнего 16-километрового слоя земной коры. Средние содержания элементов в земной коре в современном понимании этого термина как верхнего слоя планеты выше границы Мохоровичича, состоящей из двух частей материала кислых пород и одной части материала основных пород, вычислены А. П. Виноградовым (1962). Данные А. П. Виноградова следует рассматривать как наиболее достоверные за исключением содержания тория и урана; отношение  $\text{Th} : \text{U} = 5,5$  завышено. Значительно ближе к истине отношение  $\text{Th} : \text{U}$  в пределах 3,7—4,0 (Wasserburg, Mac-Donald, Hoyle, 1964). В отношении содержания иттрия, соотношений радиоактивных и редкоземельных элементов предпочтительны данные С. Тейлора (Taylor, 1964).

АТОМНЫЕ РАСПРОСТРАНЕННОСТИ  
ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Оценка атомной распространенности элементов в космических телах в астрофизике и космохимии чаще всего выражается в числе атомов данного элемента на  $10^6$  атомов кремния. Кремний выбран для сравнения потому, что он относится к довольно распространенным элементам, трудно летуч и относительно легко определяется при спектральном анализе звездных объектов. В табл. 25 приводятся атомные распространенности элементов в Солнечной системе в целом по обобщенным данным Г. Голса, который в отношении распределения редких элементов учел данные по составу метеоритного материала.

## Распространенность элементов в солнечной системе по Г. Голсу (Coles, 1969)

| Атомный номер | Элемент | Атомная распространенность по отношению к $10^6$ атомам Si | Атомный номер | Элемент | Атомная распространенность по отношению к $10^6$ атомам Si |
|---------------|---------|--|---------------|---------|--|
| 1             | H       | $4,8 \cdot 10^{10}$  | 47            | Ag      | 0,33   |
| 2             | He      | $3,9 \cdot 10^9$   | 48            | Cd      | 1,2  |
| 3             | Li      | 16   | 49            | In      | 0,10   |
| 4             | Be      | 0,81   | 50            | Sn      | 1,7  |
| 5             | B       | 6,2  | 51            | Sb      | 0,20   |
| 6             | C       | $1,7 \cdot 10^7$   | 52            | Te      | 3,1  |
| 7             | N       | $4,6 \cdot 10^6$   | 53            | I       | 0,41   |
| 8             | O       | $4,4 \cdot 10^7$   | 54            | Xe      | 3,0  |
| 9             | F       | 2500   | 55            | Cs      | 0,21   |
| 10            | Ne      | $4,4 \cdot 10^6$   | 56            | Ba      | 5,0  |
| 11            | Na      | $3,5 \cdot 10^4$   | 57            | La      | 0,47   |
| 12            | Mg      | $1,0 \cdot 10^6$   | 58            | Ce      | 1,38   |
| 13            | Al      | $8,4 \cdot 10^4$   | 59            | Pr      | 0,19   |
| 14            | Si      | $1,0 \cdot 10^6$   | 60            | Nd      | 0,88   |
| 15            | P       | 8100   | 61            | Pm      | —  |
| 16            | S       | $8,0 \cdot 10^5$   | 62            | Sm      | 0,28   |
| 17            | Cl      | 2100   | 63            | Eu      | 0,10   |
| 18            | Ar      | $3,4 \cdot 10^5$   | 64            | Gd      | 0,43   |
| 19            | K       | 2100   | 65            | Tb      | 0,061  |
| 20            | Ca      | $7,2 \cdot 10^4$   | 66            | Dy      | 0,45   |
| 21            | Sc      | 35   | 67            | Ho      | 0,093  |
| 22            | Ti      | 2400   | 68            | Er      | 0,28   |
| 23            | V       | 590  | 69            | Tm      | 0,041  |
| 24            | Cr      | $1,24 \cdot 10^4$  | 70            | Yb      | 0,22   |
| 25            | Mn      | 6200   | 71            | Lu      | 0,036  |
| 26            | Fe      | $2,5 \cdot 10^5$   | 72            | Hf      | 0,31   |
| 27            | Co      | 1900   | 73            | Ta      | 0,019  |
| 28            | Ni      | $4,5 \cdot 10^4$   | 74            | W       | 0,16   |
| 29            | Cu      | 420  | 75            | Re      | 0,059  |
| 30            | Zn      | 630  | 76            | Os      | 0,86   |
| 31            | Ga      | 28   | 77            | Ir      | 0,96   |
| 32            | Ge      | 76   | 78            | Pt      | 1,4  |
| 33            | As      | 3,8  | 79            | Au      | 0,18   |
| 34            | Se      | 27   | 80            | Hg      | 0,60   |
| 35            | Br      | 5,4  | 81            | Tl      | 0,13   |
| 36            | Kr      | 25   | 82            | Pd      | 1,3  |
| 37            | Rb      | 4,1  | 83            | Bi      | 0,19   |
| 38            | Sr      | 25   | 90            | Th      | 0,04   |
| 39            | Y       | 4,7  | 92            | U       | 0,01   |
| 40            | Zr      | 23   |               |         |  |
| 41            | Nb      | 0,90   |               |         |  |
| 42            | Mo      | 2,5  |               |         |  |
| 43            | Tc      | —  |               |         |  |
| 44            | Ru      | 1,83   |               |         |  |
| 45            | Rh      | 0,33   |               |         |  |
| 46            | Pd      | 1,33   |               |         |  |

## СРЕДНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Средние содержания многих химических элементов в земной коре (кларки по А. Е. Ферсману; рис. 3) первоначально устанавливались как средние значения из результатов нескольких тысяч анализов горных пород для 16-километрового (10-мильного) слоя земной коры, доступного для геохимического изучения. При этом (в частности Ф. Кларком) учитывалась распространенность пород в этом слое: изверженных пород 95%, метаморфических 4%, осадочных 1%. При установлении средних содержаний малораспространенных элементов, требующих трудоемких анализов, анализировались смеси из многих образцов горных пород с разных территорий. Состав этих смесей подбирался близким к петро-

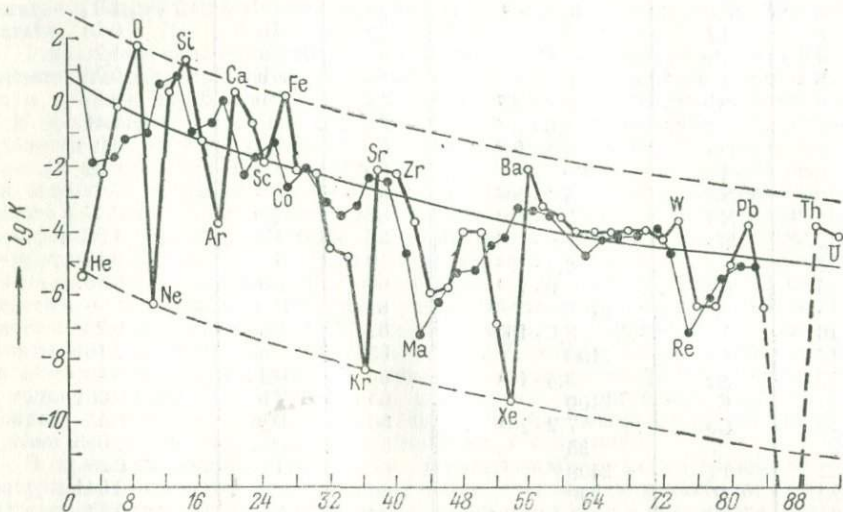


Рис. 3. Логарифмы атомных кларков элементов земной коры (по А. Е. Ферсману)

графическому составу земной коры. Анализ элемента в смеси отражал его среднее содержание в земной коре. Таким способом определялось среднее содержание некоторых редких элементов (реция, гафния и др.). В последующих подсчетах Виноградов, 1962; Taylor, 1964) брались наиболее точные анализы двух типичных групп горных пород литосферы — гранитов и базальтов и затем при пересчетах учитывалось наиболее вероятное их соотношение в том слое Земли, который расположен между поверхностью и сейсмической границей Мохоровичича. Данные по среднему содержанию элементов в земной коре и их распространенности приведены в табл. 26 и 27.

## СРЕДНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГЛАВНЫХ ТИПАХ ГОРНЫХ ПОРОД

Основой для отбора аналитических данных, характеризующих среднее содержание элемента в породе, явилась множественность идентичных определений данного элемента рядом авторов и особенно тех определений, которые относились к породам с разных территорий или к смесям пород из разных мест. Отдавалось предпочтение тем данным для ряда редких элементов, которые были получены наиболее совершенными аналитическими методами, с помощью радиоактивного анализа, масс-спектрометрии и другими физическими методами. При установлении среднего химического состава земной коры производился расчет из состава 2 части гранитов + 1 часть базальтов (табл. 28). В табл. 29

Данные по среднему содержанию элементов в земной коре (вес. %)

| Z  | Элемент | По Ф. Кларку и Г. Вашингтону | По А. Е. Ферсману   | По А. П. Виноградову | По С. Р. Тейлору    |
|----|---------|------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| 1  | H       | 0,88                         | 1,00                | —                    | —                   |
| 2  | He      | —                            | $1 \cdot 10^{-6}$   | —                    | —                   |
| 3  | Li      | 0,004                        | 0,005               | 0,0032               | 0,0020              |
| 4  | Be      | 0,001                        | 0,0004              | 0,00038              | 0,00028             |
| 5  | B       | 0,001                        | 0,005               | 0,0012               | 0,001               |
| 6  | C       | 0,087                        | 0,35                | 0,023                | 0,02                |
| 7  | N       | 0,03                         | 0,04                | 0,0019               | 0,002               |
| 8  | O       | 49,52                        | 49,13               | 47,0                 | 46,40               |
| 9  | F       | 0,027                        | 0,08                | 0,066                | 0,0625              |
| 10 | Ne      | —                            | $5 \cdot 10^{-7}$   | —                    | —                   |
| 11 | Na      | 2,64                         | 2,40                | 2,50                 | 2,36                |
| 12 | Mg      | 1,94                         | 2,25                | 1,87                 | 2,33                |
| 13 | Al      | 7,51                         | 7,45                | 8,05                 | 8,23                |
| 14 | Si      | 25,75                        | 26,00               | 29,00                | 28,15               |
| 15 | P       | 0,12                         | 0,12                | 0,093                | 0,105               |
| 16 | S       | 0,048                        | 0,10                | 0,047                | 0,026               |
| 17 | Cl      | 0,19                         | 0,20                | 0,017                | 0,013               |
| 18 | Ar      | —                            | $4 \cdot 10^{-4}$   | —                    | —                   |
| 19 | K       | 2,40                         | 2,35                | 2,50                 | 2,09                |
| 20 | Ca      | 3,29                         | 3,25                | 2,96                 | 4,15                |
| 21 | Sc      | $n \cdot 10^{-5}$            | $6 \cdot 10^{-4}$   | 0,001                | 0,0022              |
| 22 | Ti      | 0,58                         | 0,61                | 0,45                 | 0,57                |
| 23 | V       | 0,016                        | 0,02                | 0,009                | 0,0135              |
| 24 | Cr      | 0,033                        | 0,03                | 0,0083               | 0,010               |
| 25 | Mn      | 0,08                         | 0,10                | 0,10                 | 0,095               |
| 26 | Fe      | 4,70                         | 4,20                | 4,65                 | 4,63                |
| 27 | Co      | 0,01                         | 0,002               | 0,0018               | 0,0025              |
| 28 | Ni      | 0,018                        | 0,01                | 0,0058               | 0,0075              |
| 29 | Cu      | 0,01                         | 0,01                | 0,0047               | 0,0055              |
| 30 | Zn      | 0,004                        | 0,02                | 0,0083               | 0,007               |
| 31 | Ga      | $n \cdot 10^{-9}$            | 0,0001              | 0,0019               | 0,0015              |
| 32 | Ge      | $n \cdot 10^{-9}$            | 0,0004              | $1,4 \cdot 10^{-4}$  | $1,5 \cdot 10^{-4}$ |
| 33 | As      | $n \cdot 10^{-4}$            | $5 \cdot 10^{-4}$   | $1,7 \cdot 10^{-4}$  | $1,8 \cdot 10^{-4}$ |
| 34 | Se      | $n \cdot 10^{-6}$            | $8 \cdot 10^{-5}$   | $5 \cdot 10^{-6}$    | $5 \cdot 10^{-6}$   |
| 35 | Br      | $n \cdot 10^{-4}$            | 0,001               | $2,1 \cdot 10^{-4}$  | $2,5 \cdot 10^{-4}$ |
| 36 | Kr      | —                            | $2 \cdot 10^{-8}$   | —                    | —                   |
| 37 | Rb      | $n \cdot 10^{-3}$            | 0,008               | 0,015                | 0,009               |
| 38 | Sr      | 0,017                        | 0,035               | 0,034                | 0,0375              |
| 39 | Y       | —                            | $5 \cdot 10^{-3}$   | 0,0020               | 0,0033              |
| 40 | Zr      | 0,023                        | 0,025               | 0,017                | 0,0165              |
| 41 | Nb      | —                            | $3,2 \cdot 10^{-5}$ | 0,002                | 0,002               |
| 42 | Mo      | $n \cdot 10^{-4}$            | 0,001               | $1,1 \cdot 10^{-4}$  | $1,5 \cdot 10^{-4}$ |
| 43 | Tc      | —                            | —                   | —                    | —                   |
| 44 | Ru      | $n \cdot 10^{-9}$            | $5 \cdot 10^{-6}$   | —                    | —                   |
| 45 | Rh      | $n \cdot 10^{-9}$            | $1 \cdot 10^{-6}$   | —                    | —                   |
| 46 | Pd      | $n \cdot 10^{-9}$            | $5 \cdot 10^{-6}$   | $1,3 \cdot 10^{-6}$  | —                   |
| 47 | Ag      | $n \cdot 10^{-6}$            | $1 \cdot 10^{-5}$   | $7 \cdot 10^{-6}$    | $7 \cdot 10^{-6}$   |
| 48 | Cd      | $n \cdot 10^{-5}$            | $5 \cdot 10^{-4}$   | $1,3 \cdot 10^{-5}$  | $2 \cdot 10^{-5}$   |
| 49 | In      | $n \cdot 10^{-9}$            | $1 \cdot 10^{-5}$   | $2,5 \cdot 10^{-5}$  | $1 \cdot 10^{-5}$   |
| 50 | Sn      | $n \cdot 10^{-4}$            | $8 \cdot 10^{-3}$   | $2,5 \cdot 10^{-4}$  | $2 \cdot 10^{-4}$   |
| 51 | Sb      | $n \cdot 10^{-5}$            | $5 \cdot 10^{-5}$   | $5 \cdot 10^{-5}$    | $2 \cdot 10^{-5}$   |
| 52 | Te      | $n \cdot 10^{-7}$            | $1 \cdot 10^{-6}$   | $1 \cdot 10^{-7}$    | —                   |

| Z  | Элемент | По Ф. Кларку и Г. Вашингтону | По А. Е. Ферсману   | По А. П. Виноградову | По С. Р. Тейлору     |
|----|---------|------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 53 | I       | $n \cdot 10^{-5}$            | $1 \cdot 10^{-4}$   | $4 \cdot 10^{-5}$    | $5 \cdot 10^{-5}$    |
| 54 | Xe      | —                            | $3 \cdot 10^{-9}$   | —                    | —                    |
| 55 | Cs      | $n \cdot 10^{-7}$            | $1 \cdot 10^{-3}$   | $3,7 \cdot 10^{-4}$  | $3 \cdot 10^{-4}$    |
| 56 | Ba      | 0,047                        | 0,05                | 0,065                | 0,0425               |
| 57 | La      | —                            | $6,5 \cdot 10^{-4}$ | $2,9 \cdot 10^{-3}$  | $3 \cdot 10^{-3}$    |
| 58 | Ce      | —                            | $2,9 \cdot 10^{-3}$ | $7 \cdot 10^{-3}$    | $6 \cdot 10^{-3}$    |
| 59 | Pr      | —                            | $4,5 \cdot 10^{-4}$ | $9 \cdot 10^{-4}$    | $8,2 \cdot 10^{-4}$  |
| 60 | Nd      | —                            | $1,7 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$  | $2,8 \cdot 10^{-3}$  |
| 61 | Pm      | —                            | —                   | —                    | —                    |
| 62 | Sm      | —                            | $7 \cdot 10^{-4}$   | $8 \cdot 10^{-4}$    | $6 \cdot 10^{-4}$    |
| 63 | Eu      | —                            | $2 \cdot 10^{-5}$   | $1,3 \cdot 10^{-4}$  | $1,2 \cdot 10^{-4}$  |
| 64 | Gd      | —                            | $7,5 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-4}$    | $5,4 \cdot 10^{-4}$  |
| 65 | Tb      | —                            | $1 \cdot 10^{-4}$   | $4,3 \cdot 10^{-4}$  | $9 \cdot 10^{-5}$    |
| 66 | Dy      | —                            | $7,5 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$    | $3 \cdot 10^{-4}$    |
| 67 | Ho      | —                            | $1 \cdot 10^{-4}$   | $1,7 \cdot 10^{-4}$  | $1,2 \cdot 10^{-4}$  |
| 68 | Er      | —                            | $6,5 \cdot 10^{-4}$ | $3,3 \cdot 10^{-4}$  | $2,8 \cdot 10^{-4}$  |
| 69 | Tm      | —                            | $1 \cdot 10^{-4}$   | $2,7 \cdot 10^{-5}$  | $4,8 \cdot 10^{-5}$  |
| 70 | Yb      | —                            | $8 \cdot 10^{-4}$   | $3,3 \cdot 10^{-5}$  | $3 \cdot 10^{-5}$    |
| 71 | Lu      | —                            | $1,7 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-5}$    | $5 \cdot 10^{-5}$    |
| 72 | Hf      | $3 \cdot 10^{-3}$            | $4 \cdot 10^{-4}$   | $1 \cdot 10^{-4}$    | $3 \cdot 10^{-4}$    |
| 73 | Ta      | —                            | $2,5 \cdot 10^{-5}$ | $2,5 \cdot 10^{-4}$  | $2 \cdot 10^{-4}$    |
| 74 | W       | $5 \cdot 10^{-3}$            | $7 \cdot 10^{-3}$   | $1,3 \cdot 10^{-4}$  | $1,5 \cdot 10^{-4}$  |
| 75 | Re      | —                            | $1 \cdot 10^{-7}$   | $7 \cdot 10^{-8}$    | —                    |
| 76 | Os      | $n \cdot 10^{-8}$            | $5 \cdot 10^{-6}$   | —                    | —                    |
| 77 | Ir      | $n \cdot 10^{-8}$            | $1 \cdot 10^{-6}$   | —                    | —                    |
| 78 | Pt      | $n \cdot 10^{-7}$            | $2 \cdot 10^{-5}$   | —                    | —                    |
| 79 | Au      | $n \cdot 10^{-7}$            | $5 \cdot 10^{-7}$   | $4,3 \cdot 10^{-7}$  | $4 \cdot 10^{-7}$    |
| 80 | Hg      | $n \cdot 10^{-5}$            | $5 \cdot 10^{-6}$   | $8,3 \cdot 10^{-6}$  | $8 \cdot 10^{-6}$    |
| 81 | Tl      | $n \cdot 10^{-8}$            | $1 \cdot 10^{-5}$   | $1 \cdot 10^{-4}$    | $4,3 \cdot 10^{-5}$  |
| 82 | Pb      | $2 \cdot 10^{-3}$            | $1,6 \cdot 10^{-3}$ | $1,6 \cdot 10^{-3}$  | $1,25 \cdot 10^{-3}$ |
| 83 | Bi      | $n \cdot 10^{-6}$            | $1 \cdot 10^{-5}$   | $9 \cdot 10^{-7}$    | $1,7 \cdot 10^{-5}$  |
| 90 | Th      | $2 \cdot 10^{-3}$            | $1 \cdot 10^{-3}$   | $1,3 \cdot 10^{-3}$  | $9,6 \cdot 10^{-4}$  |
| 92 | U       | $8 \cdot 10^{-3}$            | $4 \cdot 10^{-4}$   | $2,5 \cdot 10^{-4}$  | $2,7 \cdot 10^{-4}$  |

Таблица 27

## Распространенность главных элементов земной коры по В. Гольдшмидту

| Элемент | Распространенность, % |           |         | Радиус иона,<br>$10^{-8}$ см |
|---------|-----------------------|-----------|---------|------------------------------|
|         | по весу               | по объему | атомная |                              |
| O       | 46,60                 | 91,97     | 62,55   | 1,32                         |
| Si      | 27,72                 | 0,80      | 21,22   | 0,39                         |
| Al      | 8,13                  | 0,77      | 6,47    | 0,57                         |
| Fe      | 5,00                  | 0,68      | 1,92    | 0,82                         |
| Mg      | 2,09                  | 0,56      | 1,84    | 0,78                         |
| Ca      | 3,63                  | 1,48      | 1,94    | 1,06                         |
| Na      | 2,83                  | 1,60      | 2,64    | 0,98                         |
| K       | 2,59                  | 2,14      | 1,42    | 1,33                         |

Распространенность элементов в горных породах (вс. %) по А. П. Виноградову (1962)

| Элемент | Каменные метеориты (Хондриты) | Ультраосновные породы (Дуниты и др.) | Основные породы (Базальты, габбро и др.) | Средние породы (Диориты, андезиты) | Кислые породы (Граниты, граптодиориты) | Осадочные породы (Глины и сланцы) | 2 части кислых пород + 1 часть основных пород |
|---------|-------------------------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|--|-----------------------------------|---|
| H       | —                             | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —   |
| He      | —                             | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —   |
| Li      | $3 \cdot 10^{-4}$             | $5 \cdot 10^{-5}$                    | $1,5 \cdot 10^{-3}$                      | $2 \cdot 10^{-3}$                  | $4 \cdot 10^{-3}$                      | $6 \cdot 10^{-3}$                 | $3,2 \cdot 10^{-3}$                           |
| Be      | $3,6 \cdot 10^{-4}$           | $2 \cdot 10^{-5}$                    | $4 \cdot 10^{-5}$                        | $1,8 \cdot 10^{-4}$                | $5,5 \cdot 10^{-4}$                    | $3 \cdot 10^{-4}$                 | $3,8 \cdot 10^{-4}$                           |
| B       | $2 \cdot 10^{-4}$             | $1 \cdot 10^{-4}$                    | $5 \cdot 10^{-4}$                        | $1,5 \cdot 10^{-3}$                | $1,5 \cdot 10^{-3}$                    | $1 \cdot 10^{-2}$                 | $1,2 \cdot 10^{-3}$                           |
| C       | $4 \cdot 10^{-2}$             | $1 \cdot 10^{-2}$                    | $1 \cdot 10^{-2}$                        | $2 \cdot 10^{-2}$                  | $3 \cdot 10^{-2}$                      | 1,0                               | $2,3 \cdot 10^{-2}$                           |
| N       | $1 \cdot 10^{-4}$             | $6 \cdot 10^{-4}$                    | $1,8 \cdot 10^{-3}$                      | $2,2 \cdot 10^{-3}$                | $2 \cdot 10^{-3}$                      | $6 \cdot 10^{-2}$                 | $1,9 \cdot 10^{-3}$                           |
| O       | 35,0                          | 42,5                                 | 43,5                                     | 46,0                               | 48,7                                   | 52,8                              | 47,0  |
| F       | $2,8 \cdot 10^{-3}$           | $1 \cdot 10^{-2}$                    | $3,7 \cdot 10^{-2}$                      | $5 \cdot 10^{-2}$                  | $8 \cdot 10^{-2}$                      | $5 \cdot 10^{-2}$                 | $6,6 \cdot 10^{-2}$                           |
| Ne      | —                             | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —   |
| Na      | $7 \cdot 10^{-1}$             | $5,7 \cdot 10^{-1}$                  | 1,94                                     | 3,0                                | 2,77                                   | 0,66                              | 2,50  |
| Mg      | 14,0                          | 25,9                                 | 4,5                                      | 2,18                               | 0,56                                   | 1,34                              | 1,87  |
| Al      | 1,30                          | 0,45                                 | 8,76                                     | 8,85                               | 7,7                                    | 10,45                             | 8,05  |
| Si      | 18,0                          | 19,0                                 | 24,0                                     | 26,0                               | 32,3                                   | 23,8                              | 29,5  |
| P       | $5 \cdot 10^{-2}$             | $1,7 \cdot 10^{-2}$                  | $1,4 \cdot 10^{-1}$                      | $1,6 \cdot 10^{-1}$                | $7 \cdot 10^{-2}$                      | $7,7 \cdot 10^{-2}$               | $9,3 \cdot 10^{-2}$                           |
| S       | 2,0                           | $1 \cdot 10^{-2}$                    | $3 \cdot 10^{-2}$                        | $2 \cdot 10^{-2}$                  | $4 \cdot 10^{-2}$                      | $3 \cdot 10^{-1}$                 | $4,7 \cdot 10^{-2}$                           |
| Cl      | $7 \cdot 10^{-3}$             | $5 \cdot 10^{-3}$                    | $5 \cdot 10^{-3}$                        | $1 \cdot 10^{-2}$                  | $2,4 \cdot 10^{-2}$                    | $1,6 \cdot 10^{-2}$               | $1,7 \cdot 10^{-2}$                           |
| Ar      | —                             | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —   |
| K       | $8,5 \cdot 10^{-2}$           | $3 \cdot 10^{-2}$                    | $8,3 \cdot 10^{-1}$                      | 2,3                                | 3,34                                   | 2,28                              | 2,50  |
| Ca      | 1,40                          | 0,7                                  | 6,72                                     | 4,65                               | 1,58                                   | 2,53                              | 2,96  |
| Sc      | $6 \cdot 10^{-4}$             | $5 \cdot 10^{-4}$                    | $2,4 \cdot 10^{-3}$                      | $2,5 \cdot 10^{-4}$                | $3 \cdot 10^{-4}$                      | $1 \cdot 10^{-3}$                 | $1 \cdot 10^{-3}$                             |
| Ti      | $5 \cdot 10^{-2}$             | $3 \cdot 10^{-2}$                    | 0,9                                      | 0,8                                | 0,23                                   | 0,45                              | 0,45  |
| V       | $7 \cdot 10^{-3}$             | $4 \cdot 10^{-3}$                    | $2 \cdot 10^{-2}$                        | $1 \cdot 10^{-2}$                  | $4 \cdot 10^{-3}$                      | $1,3 \cdot 10^{-2}$               | $9 \cdot 10^{-3}$                             |
| Cr      | $2,5 \cdot 10^{-3}$           | $2 \cdot 10^{-1}$                    | $2 \cdot 10^{-2}$                        | $5 \cdot 10^{-3}$                  | $2,5 \cdot 10^{-3}$                    | $1 \cdot 10^{-2}$                 | $8,3 \cdot 10^{-3}$                           |
| Mn      | $2 \cdot 10^{-1}$             | $1,5 \cdot 10^{-1}$                  | $2 \cdot 10^{-1}$                        | $1,2 \cdot 10^{-1}$                | $6 \cdot 10^{-2}$                      | $6,7 \cdot 10^{-2}$               | $1 \cdot 10^{-1}$                             |
| Fe      | 25,0                          | 9,85                                 | 8,56                                     | 5,85                               | 2,7                                    | 3,33                              | 4,65  |
| Co      | $8 \cdot 10^{-2}$             | $2 \cdot 10^{-2}$                    | $4,5 \cdot 10^{-3}$                      | $1 \cdot 10^{-3}$                  | $5 \cdot 10^{-4}$                      | $2 \cdot 10^{-3}$                 | $1,8 \cdot 10^{-3}$                           |
| Ni      | 1,35                          | $2 \cdot 10^{-1}$                    | $1,6 \cdot 10^{-2}$                      | $5,5 \cdot 10^{-3}$                | $8 \cdot 10^{-4}$                      | $9,5 \cdot 10^{-3}$               | $5,8 \cdot 10^{-3}$                           |
| Cu      | $1 \cdot 10^{-2}$             | $2 \cdot 10^{-3}$                    | $1 \cdot 10^{-2}$                        | $3,5 \cdot 10^{-3}$                | $2 \cdot 10^{-3}$                      | $5,7 \cdot 10^{-3}$               | $4,7 \cdot 10^{-3}$                           |
| Zn      | $5 \cdot 10^{-3}$             | $3 \cdot 10^{-3}$                    | $1,3 \cdot 10^{-2}$                      | $7,2 \cdot 10^{-3}$                | $6 \cdot 10^{-3}$                      | $8 \cdot 10^{-3}$                 | $8,3 \cdot 10^{-3}$                           |
| Ga      | $3 \cdot 10^{-4}$             | $2 \cdot 10^{-4}$                    | $1,8 \cdot 10^{-3}$                      | $2 \cdot 10^{-3}$                  | $2 \cdot 10^{-3}$                      | $3 \cdot 10^{-3}$                 | $1,9 \cdot 10^{-3}$                           |
| Ge      | $1 \cdot 10^{-3}$             | $1 \cdot 10^{-4}$                    | $1,5 \cdot 10^{-4}$                      | $1,5 \cdot 10^{-4}$                | $1,4 \cdot 10^{-4}$                    | $2 \cdot 10^{-4}$                 | $1,4 \cdot 10^{-4}$                           |
| As      | $3 \cdot 10^{-5}$             | $5 \cdot 10^{-5}$                    | $2 \cdot 10^{-4}$                        | $2,4 \cdot 10^{-4}$                | $1,5 \cdot 10^{-4}$                    | $6,6 \cdot 10^{-4}$               | $1,7 \cdot 10^{-4}$                           |
| Se      | $1 \cdot 10^{-3}$             | $5 \cdot 10^{-6}$                    | $5 \cdot 10^{-6}$                        | $5 \cdot 10^{-6}$                  | $5 \cdot 10^{-6}$                      | $6 \cdot 10^{-5}$                 | $5 \cdot 10^{-6}$                             |
| Br      | $5 \cdot 10^{-5}$             | $5 \cdot 10^{-5}$                    | $3 \cdot 10^{-4}$                        | $4,5 \cdot 10^{-4}$                | $1,7 \cdot 10^{-4}$                    | $6 \cdot 10^{-4}$                 | $2,1 \cdot 10^{-4}$                           |
| Kr      | —                             | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —   |
| Rb      | $5 \cdot 10^{-4}$             | $2 \cdot 10^{-4}$                    | $4,5 \cdot 10^{-3}$                      | $1 \cdot 10^{-2}$                  | $2,0 \cdot 10^{-2}$                    | $2 \cdot 10^{-2}$                 | $1,5 \cdot 10^{-2}$                           |
| Sr      | $1 \cdot 10^{-3}$             | $1 \cdot 10^{-3}$                    | $4,4 \cdot 10^{-2}$                      | $8 \cdot 10^{-2}$                  | $3 \cdot 10^{-2}$                      | $4,5 \cdot 10^{-2}$               | $3,4 \cdot 10^{-2}$                           |
| Y       | $8 \cdot 10^{-5}$             | —                                    | $2 \cdot 10^{-3}$                        | —                                  | $3,4 \cdot 10^{-3}$                    | $3 \cdot 10^{-3}$                 | $2,9 \cdot 10^{-3}$                           |
| Zr      | $3 \cdot 10^{-3}$             | $3 \cdot 10^{-3}$                    | $1 \cdot 10^{-2}$                        | $2,6 \cdot 10^{-2}$                | $2 \cdot 10^{-2}$                      | $2 \cdot 10^{-2}$                 | $1,7 \cdot 10^{-2}$                           |
| Nb      | $3 \cdot 10^{-5}$             | $1 \cdot 10^{-4}$                    | $2 \cdot 10^{-3}$                        | $2 \cdot 10^{-3}$                  | $2 \cdot 10^{-3}$                      | $2 \cdot 10^{-3}$                 | $2 \cdot 10^{-3}$                             |
| Mo      | $6 \cdot 10^{-5}$             | $2 \cdot 10^{-5}$                    | $1,4 \cdot 10^{-4}$                      | $9 \cdot 10^{-5}$                  | $1 \cdot 10^{-4}$                      | $2 \cdot 10^{-4}$                 | $1,1 \cdot 10^{-4}$                           |

| Элемент | Каменные метеориты (хондриты) | Ультраосновные породы (луниты и др.) | Основные породы (базальты, габбро и др.) | Средние породы (диориты, андезиты) | Кислые породы (граниты, градиориты) | Осадочные породы (глины и сланцы) | 2 части кислых пород + 1 часть основных пород |
|---------|-------------------------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---|
| Tc      | —                             | —                                    | —  | —                                  | —                                   | —                                 | —   |
| Ru      | $1 \cdot 10^{-4}$             | —                                    | —  | —                                  | —                                   | —                                 | —   |
| Rh      | $1,9 \cdot 10^{-5}$           | —                                    | —  | —                                  | —                                   | —                                 | —   |
| Pd      | $1 \cdot 10^{-4}$             | $1,2 \cdot 10^{-5}$                  | $1,9 \cdot 10^{-6}$                      | —                                  | $1 \cdot 10^{-6}$                   | —                                 | $1,3 \cdot 10^{-6}$                           |
| Ag      | $9,4 \cdot 10^{-6}$           | $5 \cdot 10^{-6}$                    | $1 \cdot 10^{-5}$                        | $7 \cdot 10^{-6}$                  | $5 \cdot 10^{-6}$                   | $1 \cdot 10^{-5}$                 | $7 \cdot 10^{-6}$                             |
| Cd      | $1 \cdot 10^{-5}$             | $5 \cdot 10^{-6}$                    | $1,9 \cdot 10^{-5}$                      | —                                  | $1 \cdot 10^{-5}$                   | $3 \cdot 10^{-6}$                 | $1,3 \cdot 10^{-5}$                           |
| In      | $1 \cdot 10^{-7}$             | $1,3 \cdot 10^{-6}$                  | $2,2 \cdot 10^{-5}$                      | —                                  | $2,6 \cdot 10^{-5}$                 | $5 \cdot 10^{-6}$                 | $2,5 \cdot 10^{-5}$                           |
| Sn      | $1 \cdot 10^{-4}$             | $5 \cdot 10^{-5}$                    | $1,5 \cdot 10^{-4}$                      | —                                  | $3 \cdot 10^{-4}$                   | $1 \cdot 10^{-3}$                 | $2,5 \cdot 10^{-4}$                           |
| Sb      | $1 \cdot 10^{-5}$             | $1 \cdot 10^{-5}$                    | $1 \cdot 10^{-4}$                        | $2 \cdot 10^{-5}$                  | $2,6 \cdot 10^{-5}$                 | $2 \cdot 10^{-4}$                 | $5 \cdot 10^{-5}$                             |
| Te      | $5 \cdot 10^{-5}$             | $1 \cdot 10^{-7}$                    | $1 \cdot 10^{-7}$                        | $1 \cdot 10^{-7}$                  | $1 \cdot 10^{-7}$                   | $1 \cdot 10^{-6}$                 | $1 \cdot 10^{-7}$                             |
| I       | $4 \cdot 10^{-6}$             | $1 \cdot 10^{-6}$                    | $5 \cdot 10^{-5}$                        | $3 \cdot 10^{-5}$                  | $4 \cdot 10^{-5}$                   | $1 \cdot 10^{-4}$                 | $4 \cdot 10^{-5}$                             |
| Xe      | —                             | —                                    | —  | —                                  | —                                   | —                                 | —   |
| Cs      | $1 \cdot 10^{-5}$             | $1 \cdot 10^{-5}$                    | $1 \cdot 10^{-4}$                        | —                                  | $5 \cdot 10^{-4}$                   | $1,2 \cdot 10^{-3}$               | $3,7 \cdot 10^{-4}$                           |
| Ba      | $6 \cdot 10^{-4}$             | $1 \cdot 10^{-4}$                    | $3 \cdot 10^{-2}$                        | $6,5 \cdot 10^{-2}$                | $8,3 \cdot 10^{-2}$                 | $8 \cdot 10^{-2}$                 | $6,5 \cdot 10^{-2}$                           |
| La      | $3 \cdot 10^{-5}$             | —                                    | $2,7 \cdot 10^{-3}$                      | —                                  | $6 \cdot 10^{-3}$                   | $4 \cdot 10^{-3}$                 | $2,9 \cdot 10^{-3}$                           |
| Ce      | $5 \cdot 10^{-5}$             | —                                    | $4,5 \cdot 10^{-4}$                      | —                                  | $1 \cdot 10^{-2}$                   | $5 \cdot 10^{-3}$                 | $7 \cdot 10^{-3}$                             |
| Pr      | $1 \cdot 10^{-5}$             | —                                    | $4 \cdot 10^{-4}$                        | —                                  | $1,2 \cdot 10^{-3}$                 | $5 \cdot 10^{-4}$                 | $9 \cdot 10^{-4}$                             |
| Nd      | $6 \cdot 10^{-5}$             | —                                    | $2 \cdot 10^{-3}$                        | —                                  | $4,6 \cdot 10^{-3}$                 | $2,3 \cdot 10^{-3}$               | $3,7 \cdot 10^{-3}$                           |
| Pm      | —                             | —                                    | —  | —                                  | —                                   | —                                 | —   |
| Sm      | $2 \cdot 10^{-5}$             | —                                    | $5 \cdot 10^{-4}$                        | —                                  | $9 \cdot 10^{-4}$                   | $6,5 \cdot 10^{-4}$               | $8 \cdot 10^{-4}$                             |
| Eu      | $8 \cdot 10^{-6}$             | $1 \cdot 10^{-6}$                    | $1 \cdot 10^{-4}$                        | —                                  | $1,5 \cdot 10^{-4}$                 | $1 \cdot 10^{-4}$                 | $1,3 \cdot 10^{-4}$                           |
| Gd      | $4 \cdot 10^{-5}$             | —                                    | $5 \cdot 10^{-4}$                        | —                                  | $9 \cdot 10^{-4}$                   | $6,5 \cdot 10^{-4}$               | $8 \cdot 10^{-4}$                             |
| Tb      | $5 \cdot 10^{-6}$             | —                                    | $8 \cdot 10^{-5}$                        | —                                  | $2,5 \cdot 10^{-4}$                 | $9 \cdot 10^{-5}$                 | $4,3 \cdot 10^{-4}$                           |
| Dy      | $3,5 \cdot 10^{-5}$           | $5 \cdot 10^{-6}$                    | $2 \cdot 10^{-4}$                        | —                                  | $6,7 \cdot 10^{-4}$                 | $4,5 \cdot 10^{-4}$               | $5 \cdot 10^{-4}$                             |
| Ho      | $7 \cdot 10^{-6}$             | —                                    | $1 \cdot 10^{-4}$                        | —                                  | $2 \cdot 10^{-4}$                   | $1 \cdot 10^{-4}$                 | $1,7 \cdot 10^{-4}$                           |
| Er      | $2 \cdot 10^{-5}$             | —                                    | $2 \cdot 10^{-4}$                        | —                                  | $4 \cdot 10^{-4}$                   | $2,5 \cdot 10^{-4}$               | $3,3 \cdot 10^{-4}$                           |
| Tm      | $4 \cdot 10^{-6}$             | —                                    | $2 \cdot 10^{-5}$                        | —                                  | $3 \cdot 10^{-5}$                   | $2,5 \cdot 10^{-5}$               | $2,7 \cdot 10^{-5}$                           |
| Yb      | $2 \cdot 10^{-5}$             | —                                    | $2 \cdot 10^{-4}$                        | —                                  | $4 \cdot 10^{-4}$                   | $3 \cdot 10^{-4}$                 | $3,3 \cdot 10^{-5}$                           |
| Lu      | $3,5 \cdot 10^{-6}$           | —                                    | $6 \cdot 10^{-5}$                        | —                                  | $1 \cdot 10^{-4}$                   | $7 \cdot 10^{-5}$                 | $8 \cdot 10^{-5}$                             |
| Hf      | $5 \cdot 10^{-5}$             | $1 \cdot 10^{-5}$                    | $1 \cdot 10^{-4}$                        | $1 \cdot 10^{-4}$                  | $1 \cdot 10^{-4}$                   | $6 \cdot 10^{-4}$                 | $1 \cdot 10^{-4}$                             |
| Ta      | $2 \cdot 10^{-6}$             | $1,8 \cdot 10^{-6}$                  | $4,8 \cdot 10^{-5}$                      | $7 \cdot 10^{-5}$                  | $3,5 \cdot 10^{-4}$                 | $3,5 \cdot 10^{-4}$               | $2,5 \cdot 10^{-4}$                           |
| W       | $1,5 \cdot 10^{-5}$           | $1 \cdot 10^{-5}$                    | $1 \cdot 10^{-4}$                        | $1 \cdot 10^{-4}$                  | $1,5 \cdot 10^{-4}$                 | $2 \cdot 10^{-4}$                 | $1,3 \cdot 10^{-4}$                           |
| Re      | $8 \cdot 10^{-8}$             | —                                    | $7,1 \cdot 10^{-8}$                      | —                                  | $6,7 \cdot 10^{-8}$                 | —                                 | $7 \cdot 10^{-8}$                             |
| Os      | $5 \cdot 10^{-5}$             | —                                    | —  | —                                  | —                                   | —                                 | —   |
| Ir      | $4,8 \cdot 10^{-5}$           | —                                    | —  | —                                  | $6,3 \cdot 10^{-7}$                 | —                                 | —   |
| Pt      | $2 \cdot 10^{-4}$             | $2 \cdot 10^{-5}$                    | $1 \cdot 10^{-5}$                        | —                                  | —                                   | —                                 | —   |
| Au      | $1,7 \cdot 10^{-5}$           | $5 \cdot 10^{-7}$                    | $4 \cdot 10^{-7}$                        | —                                  | $4,5 \cdot 10^{-7}$                 | $1 \cdot 10^{-7}$                 | $4,3 \cdot 10^{-7}$                           |
| Hg      | $3 \cdot 10^{-4}$             | $1 \cdot 10^{-6}$                    | $9 \cdot 10^{-6}$                        | —                                  | $8 \cdot 10^{-6}$                   | $4 \cdot 10^{-5}$                 | $8,3 \cdot 10^{-6}$                           |
| Tl      | $1 \cdot 10^{-7}$             | $1 \cdot 10^{-6}$                    | $2 \cdot 10^{-5}$                        | $5 \cdot 10^{-5}$                  | $1,5 \cdot 10^{-4}$                 | $1 \cdot 10^{-4}$                 | $1 \cdot 10^{-4}$                             |
| Pb      | $2 \cdot 10^{-5}$             | $1 \cdot 10^{-5}$                    | $8 \cdot 10^{-4}$                        | $1,5 \cdot 10^{-3}$                | $2 \cdot 10^{-3}$                   | $2 \cdot 10^{-3}$                 | $1,6 \cdot 10^{-3}$                           |
| Bi      | $3 \cdot 10^{-7}$             | $1 \cdot 10^{-7}$                    | $7 \cdot 10^{-7}$                        | $1 \cdot 10^{-6}$                  | $1 \cdot 10^{-6}$                   | $1 \cdot 10^{-6}$                 | $9 \cdot 10^{-7}$                             |
| Th      | $4 \cdot 10^{-6}$             | $5 \cdot 10^{-7}$                    | $3 \cdot 10^{-4}$                        | $7 \cdot 10^{-4}$                  | $1,8 \cdot 10^{-3}$                 | $1,1 \cdot 10^{-3}$               | $1,3 \cdot 10^{-3}$                           |
| U       | $1,5 \cdot 10^{-6}$           | $3 \cdot 10^{-7}$                    | $5 \cdot 10^{-5}$                        | $1,8 \cdot 10^{-8}$                | $3,5 \cdot 10^{-4}$                 | $3,2 \cdot 10^{-4}$               | $2,5 \cdot 10^{-4}$                           |

Распространенность элементов в горных породах  
(в атомных единицах по отношению к  $10^6$  атомам кремния)  
по А. П. Виноградову (1962)

| Элемент | Каменистые метеориты (Хондриты) | Ультраосновные породы (гусшты и др.) | Основные породы (базальты, габбро и др.) | Средние породы (диориты, андезиты) | Кислые породы (граниты, граптодиориты) | Осадочные породы (глины и сланцы) | 2 части тяжелых пород + 1 часть основных пород |
|---------|---------------------------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|--|-----------------------------------|--|
| H       | —                               | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —  |
| He      | —                               | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —  |
| Li      | $6,75 \cdot 10^1$               | $1,06 \cdot 10^1$                    | $2,52 \cdot 10^2$                        | $3,11 \cdot 10^2$                  | $5 \cdot 10^2$                         | $1,02 \cdot 10^2$                 | $4 \cdot 10^2$                                 |
| Be      | $6,23 \cdot 10^1$               | $3,28 \cdot 10^0$                    | $5,19 \cdot 10^1$                        | $2,15 \cdot 10^1$                  | $5,3 \cdot 10^1$                       | $3,91 \cdot 10^0$                 | $3,7 \cdot 10^1$                               |
| B       | $2,86 \cdot 10^1$               | $1,36 \cdot 10^1$                    | $5,40 \cdot 10^1$                        | $1,5 \cdot 10^2$                   | $1,2 \cdot 10^2$                       | $1,09 \cdot 10^0$                 | $1 \cdot 10^2$                                 |
| C       | $5,19 \cdot 10^3$               | $1,23 \cdot 10^3$                    | $9,74 \cdot 10^2$                        | $1,8 \cdot 10^3$                   | $2,17 \cdot 10^3$                      | $9,81 \cdot 10^4$                 | $1,77 \cdot 10^3$                              |
| N       | $1,12 \cdot 10^1$               | $6,32 \cdot 10^1$                    | $1,5 \cdot 10^2$                         | $1,7 \cdot 10^2$                   | $1,24 \cdot 10^2$                      | $5,47 \cdot 10^3$                 | $1,33 \cdot 10^2$                              |
| O       | $3,43 \cdot 10^8$               | $3,9 \cdot 10^8$                     | $3,18 \cdot 10^8$                        | $3,1 \cdot 10^8$                   | $2,64 \cdot 10^8$                      | $3,89 \cdot 10^8$                 | $2,8 \cdot 10^8$                               |
| F       | $2,31 \cdot 10^2$               | $7,77 \cdot 10^2$                    | $2,28 \cdot 10^3$                        | $2,8 \cdot 10^3$                   | $3,65 \cdot 10^3$                      | $3,1 \cdot 10^3$                  | $1,2 \cdot 10^3$                               |
| Ne      | —                               | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —  |
| Na      | $4,75 \cdot 10^4$               | $3,66 \cdot 10^4$                    | $9,85 \cdot 10^4$                        | $1,4 \cdot 10^5$                   | $1,04 \cdot 10^5$                      | $3,38 \cdot 10^4$                 | $9,9 \cdot 10^4$                               |
| Mg      | $9,04 \cdot 10^5$               | $1,57 \cdot 10^6$                    | $2,16 \cdot 10^5$                        | $9,67 \cdot 10^4$                  | $2,0 \cdot 10^4$                       | $6,48 \cdot 10^4$                 | $8,5 \cdot 10^4$                               |
| Al      | $7,79 \cdot 10^4$               | $2,46 \cdot 10^4$                    | $3,79 \cdot 10^5$                        | $3,54 \cdot 10^5$                  | $2,47 \cdot 10^5$                      | $4,56 \cdot 10^5$                 | $3 \cdot 10^5$                                 |
| Si      | $1 \cdot 10^6$                  | $1 \cdot 10^6$                       | $1 \cdot 10^6$                           | $1 \cdot 10^6$                     | $1 \cdot 10^6$                         | $1 \cdot 10^6$                    | $1 \cdot 10^6$                                 |
| P       | $2,52 \cdot 10^3$               | $8,1 \cdot 10^2$                     | $5,28 \cdot 10^3$                        | $5,57 \cdot 10^3$                  | $1,96 \cdot 10^3$                      | $2,93 \cdot 10^3$                 | $3 \cdot 10^3$                                 |
| S       | $9,76 \cdot 10^4$               | $4,6 \cdot 10^2$                     | $1,09 \cdot 10^3$                        | $6,72 \cdot 10^2$                  | $1,08 \cdot 10^5$                      | $1,1 \cdot 10^3$                  | $1 \cdot 10^3$                                 |
| Cl      | $3,12 \cdot 10^2$               | $2,08 \cdot 10^2$                    | $1,65 \cdot 10^2$                        | $3,04 \cdot 10^2$                  | $5,87 \cdot 10^2$                      | $5,31 \cdot 10^2$                 | $4,4 \cdot 10^2$                               |
| Ar      | —                               | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —  |
| K       | $3,40 \cdot 10^3$               | $1,13 \cdot 10^3$                    | $2,48 \cdot 10^4$                        | $6,34 \cdot 10^4$                  | $7,41 \cdot 10^4$                      | $6,87 \cdot 10^4$                 | $5,8 \cdot 10^4$                               |
| Ca      | $5,45 \cdot 10^4$               | $2,58 \cdot 10^4$                    | $1,95 \cdot 10^5$                        | $1,25 \cdot 10^5$                  | $3,43 \cdot 10^4$                      | $7,44 \cdot 10^4$                 | $8,8 \cdot 10^4$                               |
| Sc      | $2,09 \cdot 10^1$               | $1,64 \cdot 10^1$                    | $6,23 \cdot 10^1$                        | $5,97 \cdot 10^0$                  | $5,77 \cdot 10^0$                      | $2,6 \cdot 10^1$                  | $2,46 \cdot 10^1$                              |
| Ti      | $1,62 \cdot 10^3$               | $9,2 \cdot 10^3$                     | $2,2 \cdot 10^4$                         | $1,8 \cdot 10^4$                   | $4,17 \cdot 10^4$                      | $1,1 \cdot 10^3$                  | $3,5 \cdot 10^4$                               |
| V       | $2,14 \cdot 10^2$               | $1,16 \cdot 10^2$                    | $4,6 \cdot 10^2$                         | $2,11 \cdot 10^2$                  | $6,8 \cdot 10^1$                       | $3,0 \cdot 10^2$                  | $2 \cdot 10^2$                                 |
| Cr      | $7,53 \cdot 10^3$               | $5,69 \cdot 10^3$                    | $4,5 \cdot 10^1$                         | $1,04 \cdot 10^1$                  | $4,17 \cdot 10^1$                      | $2,26 \cdot 10^2$                 | $1,8 \cdot 10^2$                               |
| Mn      | $5,71 \cdot 10^3$               | $4,0 \cdot 10^3$                     | $4,26 \cdot 10^3$                        | $2,35 \cdot 10^3$                  | $9,46 \cdot 10^2$                      | $1,44 \cdot 10^3$                 | $2 \cdot 10^3$                                 |
| Fe      | $6,93 \cdot 10^5$               | $2,60 \cdot 10^5$                    | $1,79 \cdot 10^5$                        | $1,13 \cdot 10^4$                  | $4,2 \cdot 10^4$                       | $7,02 \cdot 10^4$                 | $8,8 \cdot 10^4$                               |
| Co      | $2,12 \cdot 10^3$               | $5,04 \cdot 10^3$                    | $8,9 \cdot 10^1$                         | $1,82 \cdot 10^1$                  | $7,35 \cdot 10^0$                      | $3,4 \cdot 10^1$                  | $3,4 \cdot 10^1$                               |
| Ni      | $3,58 \cdot 10^4$               | $5,04 \cdot 10^3$                    | $3,2 \cdot 10^2$                         | $1,01 \cdot 10^1$                  | $1,18 \cdot 10^1$                      | $1,9 \cdot 10^2$                  | $1,1 \cdot 10^2$                               |
| Cu      | $2,4 \cdot 10^2$                | $4,65 \cdot 10^1$                    | $1,83 \cdot 10^2$                        | $5,93 \cdot 10^1$                  | $2,72 \cdot 10^1$                      | $1,05 \cdot 10^1$                 | $7,9 \cdot 10^1$                               |
| Zn      | $1,2 \cdot 10^2$                | $6,78 \cdot 10^1$                    | $2,32 \cdot 10^2$                        | $1,19 \cdot 10^2$                  | $7,96 \cdot 10^1$                      | $1,44 \cdot 10^2$                 | $1,3 \cdot 10^2$                               |
| Ga      | $6,75 \cdot 10^0$               | $4,24 \cdot 10^0$                    | $3,09 \cdot 10^1$                        | $3,09 \cdot 10^1$                  | $2,48 \cdot 10^1$                      | $5,06 \cdot 10^1$                 | $2,7 \cdot 10^1$                               |
| Ge      | $2,16 \cdot 10^1$               | $2,04 \cdot 10^0$                    | $2,42 \cdot 10^0$                        | $2,22 \cdot 10^0$                  | $1,67 \cdot 10^0$                      | $3,24 \cdot 10^0$                 | $2,9 \cdot 10^0$                               |
| As      | $6,26 \cdot 10^{-1}$            | $9,85 \cdot 10^{-1}$                 | $3,24 \cdot 10^0$                        | $3,45 \cdot 10^0$                  | $1,74 \cdot 10^0$                      | $1,04 \cdot 10^0$                 | $2,2 \cdot 10^0$                               |
| Se      | $1,98 \cdot 10^1$               | $9,35 \cdot 10^{-2}$                 | $7,4 \cdot 10^{-2}$                      | $6,83 \cdot 10^{-2}$               | $5,48 \cdot 10^{-2}$                   | $8,94 \cdot 10^{-1}$              | $6 \cdot 10^{-2}$                              |
| Br      | $9,79 \cdot 10^{-1}$            | $9,25 \cdot 10^{-1}$                 | $4,38 \cdot 10^0$                        | $6,07 \cdot 10^{-2}$               | $1,84 \cdot 10^0$                      | $8,84 \cdot 10^0$                 | $2,1 \cdot 10^0$                               |
| Kr      | —                               | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —  |
| Rb      | $9,14 \cdot 10^0$               | $3,46 \cdot 10^0$                    | $6,15 \cdot 10^1$                        | $1,25 \cdot 10^2$                  | $2,02 \cdot 10^2$                      | $2,74 \cdot 10^2$                 | $1,6 \cdot 10^2$                               |
| Sr      | $1,78 \cdot 10^1$               | $1,68 \cdot 10^1$                    | $5,87 \cdot 10^2$                        | $9,84 \cdot 10^2$                  | $2,97 \cdot 10^2$                      | $6,05 \cdot 10^2$                 | $3,9 \cdot 10^2$                               |
| Y       | $1,40 \cdot 10^0$               | —                                    | $2,63 \cdot 10^1$                        | —                                  | $3,16 \cdot 10^1$                      | $3,97 \cdot 10^1$                 | $3 \cdot 10^1$                                 |
| Zr      | $5,14 \cdot 10^1$               | $4,86 \cdot 10^1$                    | $1,3 \cdot 10^2$                         | $3,08 \cdot 10^2$                  | $1,9 \cdot 10^2$                       | $2,58 \cdot 10^2$                 | $1,7 \cdot 10^2$                               |
| Nb      | $5,04 \cdot 10^{-1}$            | $1,6 \cdot 10^0$                     | $8,03 \cdot 10^1$                        | $2,32 \cdot 10^1$                  | $1,87 \cdot 10^1$                      | $2,53 \cdot 10^1$                 | $3,9 \cdot 10^1$                               |
| Mo      | $9,76 \cdot 10^{-1}$            | $3,07 \cdot 10^1$                    | $2,75 \cdot 10^0$                        | $1,01 \cdot 10^{-1}$               | $9,02 \cdot 10^{-1}$                   | $2,45 \cdot 10^0$                 | $1,5 \cdot 10^0$                               |

| Элемент | Каменные метеоориты (хондриты) | Ультраосновные породы (луниты и др.) | Основные породы (базальты, габбро и др.) | Средние породы (диориты, андезиты) | Кислые породы (граниты, гра-нодиориты) | Осадочные породы (глины и сланцы) | 2 части кислых пород + 1 часть основных пород |
|---------|--------------------------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|--|-----------------------------------|---|
| Tc      | —                              | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —   |
| Ru      | $1,53 \cdot 10^0$              | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —   |
| Rh      | $2,88 \cdot 10^{-1}$           | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —   |
| Pd      | $1,46 \cdot 10^0$              | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —   |
| Ag      | $1,36 \cdot 10^{-1}$           | $1,85 \cdot 10^{-1}$                 | $2,08 \cdot 10^{-2}$                     | —                                  | $8,13 \cdot 10^{-3}$                   | —                                 | $1,2 \cdot 10^{-2}$                           |
| Cd      | $1,39 \cdot 10^{-1}$           | $6,84 \cdot 10^{-2}$                 | $1,08 \cdot 10^{-1}$                     | $7,0 \cdot 10^{-2}$                | $4,02 \cdot 10^{-2}$                   | $1,09 \cdot 10^{-2}$              | $6 \cdot 10^{-2}$                             |
| In      | $1,36 \cdot 10^{-3}$           | $6,57 \cdot 10^{-2}$                 | $1,69 \cdot 10^{-1}$                     | —                                  | $7,72 \cdot 10^{-2}$                   | $3,14 \cdot 10^{-1}$              | $1 \cdot 10^{-1}$                             |
| Sn      | $1,31 \cdot 10^0$              | $1,67 \cdot 10^{-2}$                 | $2,23 \cdot 10^{-1}$                     | —                                  | $1,96 \cdot 10^{-2}$                   | $5,13 \cdot 10^{-2}$              | $8 \cdot 10^{-2}$                             |
| Sb      | $1,28 \cdot 10^1$              | $6,22 \cdot 10^{-1}$                 | $1,47 \cdot 10^0$                        | —                                  | $1,93 \cdot 10^0$                      | $9,92 \cdot 10^0$                 | $1,8 \cdot 10^0$                              |
| Te      | $1,28 \cdot 10^1$              | $1,21 \cdot 10^{-2}$                 | $9,58 \cdot 10^{-1}$                     | $1,77 \cdot 10^{-1}$               | $1,85 \cdot 10^{-1}$                   | $1,93 \cdot 10^0$                 | $4,4 \cdot 10^{-1}$                           |
| I       | $6,1 \cdot 10^{-1}$            | $1,16 \cdot 10^{-4}$                 | $9,16 \cdot 10^{-3}$                     | $8,45 \cdot 10^{-3}$               | $6,8 \cdot 10^{-4}$                    | $9,22 \cdot 10^{-3}$              | $7 \cdot 10^{-4}$                             |
| Xe      | $4,9 \cdot 10^{-2}$            | $1,16 \cdot 10^{-2}$                 | $4,60 \cdot 10^1$                        | $2,55 \cdot 10^{-1}$               | $2,73 \cdot 10^{-1}$                   | $9,27 \cdot 10^{-1}$              | $1,6 \cdot 10^{-1}$                           |
| Cs      | —                              | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —   |
| Ba      | $1,17 \cdot 10^{-1}$           | $1,11 \cdot 10^{-2}$                 | $8,8 \cdot 10^{-1}$                      | —                                  | $3,26 \cdot 10^0$                      | $1,06 \cdot 10^0$                 | $2,3 \cdot 10^0$                              |
| La      | $6,85 \cdot 10^0$              | $1,08 \cdot 10^{-1}$                 | $2,6 \cdot 10^2$                         | $5,11 \cdot 10^2$                  | $5,24 \cdot 10^2$                      | $6,86 \cdot 10^2$                 | $4,3 \cdot 10^3$                              |
| Ce      | $3,37 \cdot 10^{-1}$           | —                                    | $2,27 \cdot 10^1$                        | —                                  | $3,75 \cdot 10^1$                      | $3,39 \cdot 10^1$                 | $3,3 \cdot 10^1$                              |
| Pr      | $3,37 \cdot 10^{-1}$           | —                                    | $3,75 \cdot 10^0$                        | —                                  | $6,2 \cdot 10^1$                       | $4,2 \cdot 10^1$                  | $1,7 \cdot 10^0$                              |
| Nd      | $1,11 \cdot 10^{-2}$           | —                                    | $3,32 \cdot 10^0$                        | —                                  | $7,38 \cdot 10^1$                      | $4,18 \cdot 10^0$                 | $5 \cdot 10^1$                                |
| Pm      | $6,49 \cdot 10^{-1}$           | —                                    | $1,62 \cdot 10^1$                        | —                                  | $2,77 \cdot 10^1$                      | $1,88 \cdot 10^1$                 | $2,4 \cdot 10^1$                              |
| Sm      | —                              | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —   |
| Eu      | $2,08 \cdot 10^{-1}$           | —                                    | $3,5 \cdot 10^0$                         | —                                  | $5,21 \cdot 10^0$                      | $5,1 \cdot 10^0$                  | $4,9 \cdot 10^0$                              |
| Gd      | $8,23 \cdot 10^{-2}$           | $9,72 \cdot 10^{-3}$                 | $7,69 \cdot 10^{-1}$                     | —                                  | $8,56 \cdot 10^{-1}$                   | $7,74 \cdot 10^{-1}$              | $8,3 \cdot 10^{-1}$                           |
| Tb      | $4,0 \cdot 10^{-1}$            | —                                    | $3,73 \cdot 10^0$                        | —                                  | $4,97 \cdot 10^0$                      | $4,88 \cdot 10^0$                 | $4,5 \cdot 10^0$                              |
| Dy      | $4,93 \cdot 10^{-2}$           | —                                    | $5,88 \cdot 10^{-1}$                     | —                                  | $1,36 \cdot 10^0$                      | $6,87 \cdot 10^{-1}$              | $1,1 \cdot 10^0$                              |
| Ho      | $3,37 \cdot 10^{-1}$           | $4,56 \cdot 10^{-2}$                 | $1,44 \cdot 10^0$                        | —                                  | $3,57 \cdot 10^0$                      | $3,26 \cdot 10^0$                 | $2,9 \cdot 10^0$                              |
| Er      | $6,62 \cdot 10^{-2}$           | —                                    | $7,08 \cdot 10^{-1}$                     | —                                  | $1,05 \cdot 10^0$                      | $6,93 \cdot 10^{-1}$              | $9 \cdot 10^{-1}$                             |
| Tm      | $1,87 \cdot 10^{-1}$           | —                                    | $1,4 \cdot 10^0$                         | —                                  | $2,07 \cdot 10^0$                      | $1,76 \cdot 10^0$                 | $1,2 \cdot 10^0$                              |
| Yb      | $3,69 \cdot 10^{-2}$           | —                                    | $1,38 \cdot 10^{-1}$                     | —                                  | $1,54 \cdot 10^{-1}$                   | $1,74 \cdot 10^{-1}$              | $1,5 \cdot 10^{-1}$                           |
| Lu      | $1,81 \cdot 10^{-1}$           | —                                    | $1,34 \cdot 10^0$                        | —                                  | $2,0 \cdot 10^0$                       | $2,04 \cdot 10^0$                 | $1,1 \cdot 10^0$                              |
| Hf      | $3,12 \cdot 10^{-2}$           | —                                    | $4 \cdot 10^{-1}$                        | —                                  | $4,96 \cdot 10^{-1}$                   | $4,76 \cdot 10^{-1}$              | $4,6 \cdot 10^{-1}$                           |
| Ta      | $4,36 \cdot 10^{-1}$           | $8,27 \cdot 10^{-2}$                 | $6,54 \cdot 10^{-1}$                     | $6,03 \cdot 10^{-1}$               | $4,86 \cdot 10^{-1}$                   | $3,96 \cdot 10^0$                 | $5,4 \cdot 10^{-1}$                           |
| W       | $1,73 \cdot 10^{-2}$           | $1,47 \cdot 10^{-2}$                 | $3,1 \cdot 10^{-1}$                      | $4,17 \cdot 10^{-1}$               | $1,67 \cdot 10^0$                      | $2,28 \cdot 10^0$                 | $1,2 \cdot 10^0$                              |
| Re      | $1,25 \cdot 10^{-1}$           | $8,03 \cdot 10^{-2}$                 | $6,35 \cdot 10^{-1}$                     | $5,86 \cdot 10^{-1}$               | $7,07 \cdot 10^{-1}$                   | $1,28 \cdot 10^0$                 | $7 \cdot 10^{-1}$                             |
| Os      | $6,73 \cdot 10^{-4}$           | —                                    | $4,45 \cdot 10^{-4}$                     | —                                  | $3,12 \cdot 10^{-4}$                   | —                                 | $3,5 \cdot 10^{-4}$                           |
| Ir      | $4,1 \cdot 10^{-1}$            | —                                    | —  | —                                  | —                                      | —                                 | —   |
| Pt      | $3,9 \cdot 10^{-1}$            | —                                    | —  | —                                  | $2,83 \cdot 10^{-3}$                   | —                                 | —   |
| Au      | $1,60 \cdot 10^0$              | $1,51 \cdot 10^{-1}$                 | $6,0 \cdot 10^{-2}$                      | —                                  | —                                      | —                                 | —   |
| Hg      | $1,35 \cdot 10^{-1}$           | $3,74 \cdot 10^{-3}$                 | $2,37 \cdot 10^{-3}$                     | —                                  | $1,98 \cdot 10^{-3}$                   | $5,97 \cdot 10^{-4}$              | $1,4 \cdot 10^{-2}$                           |
| Pb      | $2,34 \cdot 10^0$              | $7,37 \cdot 10^{-3}$                 | $5,24 \cdot 10^{-2}$                     | $4,3 \cdot 10^{-2}$                | $3,47 \cdot 10^{-2}$                   | $2,35 \cdot 10^{-1}$              | $4 \cdot 10^{-2}$                             |
| Tl      | $7,63 \cdot 10^{-4}$           | $7,22 \cdot 10^{-3}$                 | $1,14 \cdot 10^{-1}$                     | $2,64 \cdot 10^{-1}$               | $6,36 \cdot 10^{-1}$                   | $1,13 \cdot 10^{-1}$              | $4,6 \cdot 10^{-1}$                           |
| Bi      | $1,51 \cdot 10^{-1}$           | $7,13 \cdot 10^{-2}$                 | $4,51 \cdot 10^0$                        | $7,8 \cdot 10^0$                   | $8,38 \cdot 10^0$                      | $1,14 \cdot 10^0$                 | $7 \cdot 10^0$                                |
| Th      | $2,24 \cdot 10^{-3}$           | $7,06 \cdot 10^{-4}$                 | $3,91 \cdot 10^{-3}$                     | $5,16 \cdot 10^{-3}$               | $4,15 \cdot 10^{-3}$                   | $5,63 \cdot 10^{-3}$              | $4,4 \cdot 10^{-3}$                           |
| U       | $2,7 \cdot 10^{-2}$            | $3,16 \cdot 10^{-3}$                 | $1,51 \cdot 10^0$                        | $3,25 \cdot 10^0$                  | $6,73 \cdot 10^0$                      | $5,57 \cdot 10^0$                 | $5 \cdot 10^0$                                |
| U       | $9,84 \cdot 10^{-3}$           | $1,86 \cdot 10^{-3}$                 | $2,45 \cdot 10^{-1}$                     | $8,16 \cdot 10^{-1}$               | $1,27 \cdot 10^0$                      | $1,58 \cdot 10^0$                 | $9 \cdot 10^{-1}$                             |

приведены данные о среднем содержании элементов в главных типах горных пород в атомных единицах по отношению к  $10^6$  атомам кремния, что дает возможность сравнивать атомную распространенность элементов земных объектов с распространением их в космических телах (звездах, газовых туманностях, метеоритах и др.). Данные табл. 29 получены на основе перечислений значений табл. 28.

## РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Содержания элементов в горных породах (в вес. %;  $10^{-4}\%$ ;  $10^{-6}$  г/г) приведены в табл. 30. В отдельных случаях установлен только порядок распространенности данного элемента. В таблице приняты следующие условные обозначения.

*x* — порядок распространенности данного элемента.

*A* — элементы являются основными составными частями биосферы (живого вещества), гидросферы и атмосферы. Кислород, очевидно, наиболее важный элемент литосферы, в то время как углерод — важная составная часть осадочных горных пород.

*B* — редкие газы встречаются в атмосфере в следующем количестве (в объеме. %): He — 0,00052, Ne — 0,0018, Ar — 0,93, Kr — 0,0004, Xe — 0,000008; Ne — выделяется при радиоактивном распаде урана и тория, но одновременно теряется в мировое пространство:  $^{40}\text{Ar}$  образуется при превращении радиоактивного  $^{40}\text{K}$  и является ведущим в изотопном составе атмосферного аргона. Содержание аргона и гелия в породах зависит от возраста пород ввиду радиоактивного происхождения этих газов. Установлены следующие содержания редких газов в изверженных горных породах (в  $1\text{ см}^3$  на 1 г породы): He —  $6 \cdot 10^{-5}$ , Ne —  $77 \cdot 10^{-8}$ , Ar —  $2,2 \cdot 10^{-5}$ , Kr —  $4,2 \cdot 10^{-9}$ , Xe —  $3,4 \cdot 10^{-10}$ .

*C* — элементы в естественных условиях земной коры не встречаются.

*D* — данные по содержанию элементов в горных породах отсутствуют или скудны.

*E* — элементы присутствуют как недолговечные радиоактивные атомы от распада рядов урана и тория.

*F* — результат слабых процессов захвата нейтронов ураном.

## РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ЛУНЫ

В настоящее время благодаря полетам межпланетных станций «Аполлон-11, -12, -14, -15, -16, -17» и «Луна-16, -20» получен обширный каменный материал с поверхности Луны, который тщательно был изучен в различных лабораториях мира. Определение содержания редких элементов в лунных образцах производится рентгеноспектральным анализом, а также другими наиболее совершенными методами. В результате исследований получен материал по химическому и изотопному составу лунных образцов. Наиболее существенные данные по содержанию химических элементов в трех районах лунного шара (образцы, доставленные «Аполлон-11, -12», «Луна-16») приведены в табл. 31. Величины даны в весовых единицах (части на миллион,  $10^{-6}$  г/г, или граммы на тонну), в отдельных случаях наиболее распространенные элементы выражены в весовых процентах. Данные табл. 31 взяты из работ Б. Мэйсона и У. Мелсона и сборника «Лунный грунт из моря Изобилия».

## РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ В ГИДРОСФЕРЕ

Данные, характеризующие распространение элементов в воде мирового океана, а также данные о концентрации ведущих ионов в зависимости от солености и формы нахождения элементов в морской воде приведены в табл. 32—35.

Данные о содержании элементов в горных породах разного типа по К. Таркяну и К. Веденолоу  
(Turekian, Wedepohl, 1961)

| Z  | Элемент | Изверженные породы   |                      |                     |                      |                      | Осадочные породы    |                     |                      | Глубоководные осадки |                      |
|----|---------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|    |         | ультра-основные      | базаль-товые         | гранитоиды          |                      | сипениты             | глины               | песчаники           | карбо-натные         | извест-ковые         | глини-стые           |
|    |         |                      |                      | богатые Са          | бедные Са            |                      |                     |                     |                      |                      |                      |
| 1  | H       | A                    | A                    | A                   | A                    | A                    | A                   | A                   | A                    | A                    | A                    |
| 2  | He      | B                    | B                    | B                   | B                    | B                    | B                   | B                   | B                    | B                    | B                    |
| 3  | Li      | $x \cdot 10^{-4}$    | $1,7 \cdot 10^{-3}$  | $2,4 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-3}$    | $2,8 \cdot 10^{-3}$  | $6,6 \cdot 10^{-3}$ | $1,5 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-4}$    | $5 \cdot 10^{-4}$    | $5,7 \cdot 10^{-3}$  |
| 4  | Be      | $x \cdot 10^{-4}$    | $1 \cdot 10^{-4}$    | $2 \cdot 10^{-4}$   | $3 \cdot 10^{-4}$    | $1 \cdot 10^{-4}$    | $3 \cdot 10^{-4}$   | $x \cdot 10^{-5}$   | $x \cdot 10^{-5}$    | $x \cdot 10^{-5}$    | $2,6 \cdot 10^{-4}$  |
| 5  | B       | $3 \cdot 10^{-4}$    | $5 \cdot 10^{-4}$    | $9 \cdot 10^{-4}$   | $1 \cdot 10^{-3}$    | $9 \cdot 10^{-4}$    | $1 \cdot 10^{-3}$   | $3,5 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-3}$    | $5,5 \cdot 10^{-3}$  | $2,3 \cdot 10^{-2}$  |
| 6  | C       | A                    | A                    | A                   | A                    | A                    | A                   | A                   | A                    | A                    | A                    |
| 7  | N       | $6 \cdot 10^{-4}$    | $2 \cdot 10^{-3}$    | $2 \cdot 10^{-3}$   | $2 \cdot 10^{-3}$    | $3 \cdot 10^{-3}$    | A                   | A                   | A                    | A                    | A                    |
| 8  | O       | A                    | A                    | A                   | A                    | A                    | A                   | A                   | A                    | A                    | A                    |
| 9  | F       | $1 \cdot 10^{-4}$    | $4 \cdot 10^{-2}$    | $5,2 \cdot 10^{-2}$ | $8,5 \cdot 10^{-2}$  | $1,2 \cdot 10^{-1}$  | $7,4 \cdot 10^{-2}$ | $2,7 \cdot 10^{-2}$ | $3,3 \cdot 10^{-2}$  | $5,4 \cdot 10^{-3}$  | $1,3 \cdot 10^{-1}$  |
| 10 | Ne      | B                    | B                    | B                   | B                    | B                    | B                   | B                   | B                    | B                    | B                    |
| 11 | Na      | $4,2 \cdot 10^{-1}$  | 1,8                  | 2,84                | 2,58                 | 4,04                 | $9,6 \cdot 10^{-1}$ | $3,3 \cdot 10^{-1}$ | $4 \cdot 10^{-2}$    | 2,00                 | 4,00                 |
| 12 | Mg      | 20,5                 | 4,6                  | $9,4 \cdot 10^{-1}$ | $1,6 \cdot 10^{-1}$  | $5,8 \cdot 10^{-1}$  | 1,5                 | $7 \cdot 10^{-1}$   | 4,7                  | $4 \cdot 10^{-3}$    | 2,10                 |
| 13 | Al      | 2,0                  | 7,8                  | 8,2                 | 7,2                  | 8,8                  | 8,0                 | 2,5                 | 4,2                  | 2,0                  | 8,4                  |
| 14 | Si      | 20,5                 | 23,0                 | 31,4                | 34,7                 | 29,1                 | 7,3                 | 36,8                | 2,4                  | 3,2                  | 25,0                 |
| 15 | P       | $2,2 \cdot 10^{-2}$  | $1,1 \cdot 10^{-1}$  | $9,2 \cdot 10^{-2}$ | $1,6 \cdot 10^{-1}$  | $8 \cdot 10^{-2}$    | $7 \cdot 10^{-2}$   | $1,7 \cdot 10^{-2}$ | $4 \cdot 10^{-2}$    | $3,5 \cdot 10^{-2}$  | $1,5 \cdot 10^{-1}$  |
| 16 | S       | $3 \cdot 10^{-2}$    | $3 \cdot 10^{-2}$    | $3 \cdot 10^{-2}$   | $3 \cdot 10^{-2}$    | $3 \cdot 10^{-2}$    | $2,4 \cdot 10^{-1}$ | $2,4 \cdot 10^{-2}$ | $1,2 \cdot 10^{-1}$  | $1,3 \cdot 10^{-1}$  | $1,3 \cdot 10^{-1}$  |
| 17 | Cl      | $8,5 \cdot 10^{-3}$  | $6 \cdot 10^{-3}$    | $1,3 \cdot 10^{-2}$ | $2 \cdot 10^{-2}$    | $5,2 \cdot 10^{-2}$  | $1,8 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^{-3}$   | $1,5 \cdot 10^{-2}$  | 2,0                  | 2,0                  |
| 18 | Ar      | B                    | B                    | B                   | B                    | B                    | B                   | B                   | B                    | B                    | B                    |
| 19 | K       | $4 \cdot 10^{-3}$    | $8,3 \cdot 10^{-1}$  | 2,52                | 4,2                  | 4,8                  | 2,66                | 1,07                | $2,7 \cdot 10^{-1}$  | $2,9 \cdot 10^{-1}$  | $2,5 \cdot 10^{-1}$  |
| 20 | Ca      | 2,5                  | 7,6                  | 2,53                | $5,1 \cdot 10^{-1}$  | 1,8                  | 2,21                | 3,91                | 30,23                | 31,24                | 2,9                  |
| 21 | Sc      | $1,5 \cdot 10^{-3}$  | $3 \cdot 20^{-3}$    | $1,4 \cdot 10^{-3}$ | $7 \cdot 10^{-4}$    | $3 \cdot 10^{-4}$    | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $1 \cdot 10^{-4}$   | $1 \cdot 10^{-4}$    | $2 \cdot 10^{-4}$    | $1,9 \cdot 10^{-3}$  |
| 22 | Ti      | $3 \cdot 10^{-2}$    | 1,38                 | $3,4 \cdot 10^{-1}$ | $1,2 \cdot 10^{-1}$  | $3,5 \cdot 10^{-4}$  | $4,6 \cdot 10^{-1}$ | $1,5 \cdot 10^{-1}$ | $4 \cdot 10^{-2}$    | $7,7 \cdot 10^{-2}$  | $4,6 \cdot 10^{-1}$  |
| 23 | V       | $4 \cdot 10^{-3}$    | $2,5 \cdot 10^{-2}$  | $8,8 \cdot 10^{-3}$ | $4,4 \cdot 10^{-3}$  | $3 \cdot 10^{-3}$    | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-3}$   | $2 \cdot 10^{-3}$    | $2 \cdot 10^{-3}$    | $1,2 \cdot 10^{-2}$  |
| 24 | Cr      | $1,6 \cdot 10^{-1}$  | $1,7 \cdot 10^{-2}$  | $2,2 \cdot 10^{-3}$ | $4,1 \cdot 10^{-4}$  | $2 \cdot 10^{-4}$    | $9 \cdot 10^{-3}$   | $3,5 \cdot 10^{-3}$ | $1,1 \cdot 10^{-3}$  | $1,1 \cdot 10^{-3}$  | $9 \cdot 10^{-3}$    |
| 25 | Mn      | $1,62 \cdot 10^{-1}$ | $1,5 \cdot 10^{-1}$  | $5,4 \cdot 10^{-2}$ | $3,9 \cdot 10^{-2}$  | $8,5 \cdot 10^{-2}$  | $8,5 \cdot 10^{-2}$ | $x \cdot 10^{-4}$   | $1,1 \cdot 10^{-1}$  | $1 \cdot 10^{-1}$    | $6,7 \cdot 10^{-1}$  |
| 26 | Fe      | 9,43                 | 8,65                 | 2,96                | 1,42                 | 3,67                 | 4,72                | $9,8 \cdot 10^{-1}$ | $3,8 \cdot 10^{-1}$  | $9 \cdot 10^{-1}$    | 6,5                  |
| 27 | Co      | $1,5 \cdot 10^{-2}$  | $4,8 \cdot 10^{-3}$  | $7 \cdot 10^{-4}$   | $1 \cdot 10^{-4}$    | $1 \cdot 10^{-4}$    | $1,9 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-5}$   | $1 \cdot 10^{-5}$    | $7 \cdot 10^{-4}$    | $7,4 \cdot 10^2$     |
| 28 | Ni      | $2 \cdot 10^{-1}$    | $1,3 \cdot 10^{-2}$  | $1,5 \cdot 10^{-3}$ | $4,5 \cdot 10^{-4}$  | $4 \cdot 10^{-4}$    | $6,8 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-4}$   | $2 \cdot 10^{-3}$    | $3 \cdot 10^{-3}$    | $2,25 \cdot 10^{-2}$ |
| 29 | Cu      | $1 \cdot 10^{-3}$    | $8,7 \cdot 10^{-3}$  | $3 \cdot 10^{-3}$   | $1 \cdot 10^{-3}$    | $5 \cdot 10^{-4}$    | $4,5 \cdot 10^{-3}$ | $x \cdot 10^{-4}$   | $4 \cdot 10^{-4}$    | $3 \cdot 10^{-3}$    | $2,5 \cdot 10^{-2}$  |
| 30 | Zn      | $5 \cdot 10^{-3}$    | $1,05 \cdot 10^{-2}$ | $6 \cdot 10^{-3}$   | $3,9 \cdot 10^{-3}$  | $1,3 \cdot 10^{-2}$  | $9,5 \cdot 10^{-3}$ | $1,6 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-3}$    | $3,5 \cdot 10^{-3}$  | $1,65 \cdot 10^{-2}$ |
| 31 | Ga      | $1,5 \cdot 10^{-4}$  | $1,7 \cdot 10^{-3}$  | $1,7 \cdot 10^{-3}$ | $1,7 \cdot 10^{-3}$  | $3 \cdot 10^{-3}$    | $1,9 \cdot 10^{-3}$ | $1,2 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-4}$    | $1,3 \cdot 10^{-3}$  | $2 \cdot 10^{-3}$    |
| 32 | Ge      | $1,5 \cdot 10^{-4}$  | $1,3 \cdot 10^{-4}$  | $1,3 \cdot 10^{-4}$ | $1,3 \cdot 10^{-4}$  | $1 \cdot 10^{-4}$    | $1,6 \cdot 10^{-4}$ | $0,8 \cdot 10^{-4}$ | $0,2 \cdot 10^{-4}$  | $0,2 \cdot 10^{-4}$  | $2 \cdot 10^{-4}$    |
| 33 | As      | $1 \cdot 10^{-4}$    | $2 \cdot 10^{-4}$    | $1,9 \cdot 10^{-4}$ | $1,5 \cdot 10^{-4}$  | $1,4 \cdot 10^{-4}$  | $1,3 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-4}$   | $1 \cdot 10^{-4}$    | $1 \cdot 10^{-4}$    | $1,3 \cdot 10^{-3}$  |
| 34 | Se      | $5 \cdot 10^{-6}$    | $5 \cdot 10^{-6}$    | $5 \cdot 10^{-6}$   | $5 \cdot 10^{-6}$    | $5 \cdot 10^{-6}$    | $6 \cdot 10^{-5}$   | $5 \cdot 10^{-6}$   | $8 \cdot 10^{-6}$    | $1,7 \cdot 10^{-5}$  | $1,7 \cdot 10^{-5}$  |
| 35 | Br      | $1 \cdot 10^{-4}$    | $3,6 \cdot 10^{-4}$  | $4,5 \cdot 10^{-4}$ | $1,3 \cdot 10^{-4}$  | $2,7 \cdot 10^{-4}$  | $4 \cdot 10^{-4}$   | $1 \cdot 10^{-4}$   | $6,2 \cdot 10$       | $7 \cdot 10^{-3}$    | $7 \cdot 10^{-3}$    |
| 36 | Kr      | B                    | B                    | B                   | B                    | B                    | B                   | B                   | B                    | B                    | B                    |
| 37 | Rb      | $2 \cdot 10^{-5}$    | $3 \cdot 10^{-3}$    | $1,1 \cdot 10^{-2}$ | $1,7 \cdot 10^{-2}$  | $1,1 \cdot 10^{-2}$  | $1,4 \cdot 10^{-2}$ | $6 \cdot 10^{-3}$   | $3 \cdot 10^{-4}$    | $1 \cdot 10^{-3}$    | $1,1 \cdot 10^{-2}$  |
| 38 | Sr      | $1 \cdot 10^{-4}$    | $4,65 \cdot 10^{-2}$ | $4,4 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^{-2}$    | $2 \cdot 10^{-2}$    | $3 \cdot 10^{-2}$   | $2 \cdot 10^{-3}$   | $6,1 \cdot 10^{-2}$  | $2 \cdot 10^{-1}$    | $1,8 \cdot 10^{-2}$  |
| 39 | Y       | $x \cdot 10^{-5}$    | $2,1 \cdot 10^{-3}$  | $3,5 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-3}$    | $2 \cdot 10^{-3}$    | $2,6 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-3}$   | $3 \cdot 10^{-3}$    | $4,2 \cdot 10^{-3}$  | $9 \cdot 10^{-3}$    |
| 40 | Zr      | $4,5 \cdot 10^{-3}$  | $1,4 \cdot 10^{-2}$  | $1,4 \cdot 10^{-2}$ | $1,75 \cdot 10^{-2}$ | $5 \cdot 10^{-2}$    | $1,6 \cdot 10^{-2}$ | $2,2 \cdot 10^{-2}$ | $1,9 \cdot 10^{-3}$  | $2 \cdot 10^{-3}$    | $1,5 \cdot 10^{-2}$  |
| 41 | Nb      | $1,6 \cdot 10^{-3}$  | $1,9 \cdot 10^{-3}$  | $2 \cdot 10^{-3}$   | $2,1 \cdot 10^{-3}$  | $3,5 \cdot 10^{-3}$  | $1,1 \cdot 10^{-3}$ | $x \cdot 10^{-5}$   | $3 \cdot 10^{-5}$    | $4,6 \cdot 10^{-4}$  | $1,4 \cdot 10^{-3}$  |
| 42 | Mo      | $3 \cdot 10^{-5}$    | $1,5 \cdot 10^{-4}$  | $1 \cdot 10^{-4}$   | $1,3 \cdot 10^{-4}$  | $6 \cdot 10^{-5}$    | $2,6 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-5}$   | $4 \cdot 10^{-5}$    | $3 \cdot 10^{-5}$    | $2,7 \cdot 10^{-3}$  |
| 43 | Tc      | C                    | C                    | C                   | C                    | C                    | C                   | C                   | C                    | C                    | C                    |
| 44 | Ru      | D                    | D                    | D                   | D                    | D                    | D                   | D                   | D                    | D                    | D                    |
| 45 | Rh      | D                    | D                    | D                   | D                    | D                    | D                   | D                   | D                    | D                    | D                    |
| 46 | Pd      | $1,2 \cdot 10^{-5}$  | $2 \cdot 10^{-6}$    | $x \cdot 10^{-7}$   | $x \cdot 10^{-7}$    | $x \cdot 10^{-6}$    | $7 \cdot 10^{-6}$   | $x \cdot 10^{-6}$   | $x \cdot 10^{-6}$    | $x \cdot 10^{-6}$    | $1,1 \cdot 10^{-5}$  |
| 47 | Ag      | $6 \cdot 10^{-6}$    | $1,1 \cdot 10^{-5}$  | $5,1 \cdot 10^{-6}$ | $3,7 \cdot 10^{-6}$  | $x \cdot 10^{-6}$    | $3 \cdot 10^{-5}$   | $x \cdot 10^{-6}$   | $3,5 \cdot 10^{-6}$  | $x \cdot 10^{-6}$    | $4,2 \cdot 10^{-5}$  |
| 48 | Ca      | $x \cdot 10^{-5}$    | $2,2 \cdot 10^{-5}$  | $1,3 \cdot 10^{-5}$ | $1,3 \cdot 10^{-5}$  | $1,3 \cdot 10^{-5}$  | $3 \cdot 10^{-5}$   | $x \cdot 10^{-6}$   | $x \cdot 10^{-6}$    | $x \cdot 10^{-6}$    | $8 \cdot 10^{-6}$    |
| 49 | In      | $1 \cdot 10^{-6}$    | $2,2 \cdot 10^{-5}$  | $x \cdot 10^{-6}$   | $2,6 \cdot 10^{-5}$  | $x \cdot 10^{-6}$    | $1 \cdot 10^{-5}$   | $x \cdot 10^{-6}$   | $x \cdot 10^{-6}$    | $x \cdot 10^{-6}$    | $1,5 \cdot 10^{-4}$  |
| 50 | Sn      | $5 \cdot 10^{-5}$    | $1,5 \cdot 10^{-4}$  | $1,5 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$    | $x \cdot 10^{-4}$    | $6 \cdot 10^{-4}$   | $x \cdot 10^{-5}$   | $x \cdot 10^{-5}$    | $x \cdot 10^{-5}$    | $1,5 \cdot 10^{-4}$  |
| 51 | Sb      | $1 \cdot 10^{-5}$    | $2 \cdot 10^{-5}$    | $2 \cdot 10^{-5}$   | $2 \cdot 10^{-5}$    | $x \cdot 10^{-5}$    | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | $x \cdot 10^{-6}$   | $2 \cdot 10^{-5}$    | $1,5 \cdot 10^{-5}$  | $1 \cdot 10^{-4}$    |
| 52 | Te      | D                    | D                    | D                   | D                    | D                    | D                   | D                   | D                    | D                    | D                    |
| 53 | I       | $5 \cdot 10^{-5}$    | $5 \cdot 10^{-5}$    | $5 \cdot 10^{-5}$   | $5 \cdot 10^{-5}$    | $5 \cdot 10^{-5}$    | $2,2 \cdot 10^{-4}$ | $1,7 \cdot 10^{-4}$ | $1,2 \cdot 10^{-4}$  | $5 \cdot 10^{-6}$    | $1 \cdot 10^{-6}$    |
| 54 | Xe      | B                    | B                    | B                   | B                    | B                    | B                   | B                   | B                    | B                    | B                    |
| 55 | Cs      | $x \cdot 10^{-5}$    | $1,1 \cdot 10^{-5}$  | $2 \cdot 10^{-5}$   | $4 \cdot 10^{-4}$    | $6 \cdot 10^{-5}$    | $5 \cdot 10^{-4}$   | $x \cdot 10^{-5}$   | $x \cdot 10^{-5}$    | $4 \cdot 10^{-5}$    | $6 \cdot 10^{-4}$    |
| 56 | Ba      | $4 \cdot 10^{-5}$    | $3,3 \cdot 10^{-2}$  | $4,2 \cdot 10^{-2}$ | $8,4 \cdot 10^{-2}$  | $1,6 \cdot 10^{-1}$  | $5,8 \cdot 10^{-2}$ | $x \cdot 10^{-3}$   | $1 \cdot 10^{-3}$    | $1,9 \cdot 10^{-2}$  | $2,3 \cdot 10^{-1}$  |
| 57 | La      | $x \cdot 10^{-5}$    | $1,5 \cdot 10^{-3}$  | $4,5 \cdot 10^{-3}$ | $5,5 \cdot 10^{-3}$  | $7 \cdot 10^{-3}$    | $9,2 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-3}$   | $x \cdot 10^{-4}$    | $1 \cdot 10^{-3}$    | $1,15 \cdot 10^{-2}$ |
| 58 | Ce      | $x \cdot 10^{-5}$    | $4,8 \cdot 10^{-3}$  | $8,1 \cdot 10^{-3}$ | $9,2 \cdot 10^{-3}$  | $1,61 \cdot 10^{-2}$ | $5,9 \cdot 10^{-3}$ | $9,2 \cdot 10^{-3}$ | $1,15 \cdot 10^{-3}$ | $3,5 \cdot 10^{-3}$  | $3,45 \cdot 10^{-2}$ |
| 59 | Pr      | $x \cdot 10^{-5}$    | $4,6 \cdot 10^{-4}$  | $7,7 \cdot 10^{-4}$ | $8,8 \cdot 10^{-4}$  | $1,5 \cdot 10^{-3}$  | $5,6 \cdot 10^{-4}$ | $8,8 \cdot 10^{-4}$ | $1,1 \cdot 10^{-4}$  | $3,3 \cdot 10^{-4}$  | $3,3 \cdot 10^{-3}$  |
| 60 | Nd      | $x \cdot 10^{-5}$    | $2 \cdot 10^{-3}$    | $3,3 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$  | $6,5 \cdot 10^{-3}$  | $2,4 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ | $4,7 \cdot 10^{-4}$  | $1,4 \cdot 10^{-3}$  | $1,4 \cdot 10^{-2}$  |
| 61 | Pm      | C                    | C                    | C                   | C                    | C                    | C                   | C                   | C                    | C                    | C                    |
| 62 | Sm      | $x \cdot 10^{-5}$    | $5,3 \cdot 10^{-4}$  | $8,8 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-3}$    | $1,8 \cdot 10^{-3}$  | $6,4 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-3}$   | $1,3 \cdot 10^{-4}$  | $3,8 \cdot 10^{-4}$  | $3,8 \cdot 10^{-3}$  |
| 63 | Eu      | $x \cdot 10^{-5}$    | $8 \cdot 10^{-5}$    | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | $1,6 \cdot 10^{-4}$  | $2,8 \cdot 10^{-4}$  | $1 \cdot 10^{-4}$   | $1,6 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-5}$    | $6 \cdot 10^{-5}$    | $6 \cdot 10^{-4}$    |
| 64 | Gd      | $x \cdot 10^{-5}$    | $5,3 \cdot 10^{-4}$  | $8,8 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-3}$    | $1,8 \cdot 10^{-3}$  | $6,4 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-3}$   | $1,3 \cdot 10^{-4}$  | $3,8 \cdot 10^{-4}$  | $3,8 \cdot 10^{-3}$  |
| 65 | Tb      | $x \cdot 10^{-5}$    | $8 \cdot 10^{-5}$    | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | $1,6 \cdot 10^{-4}$  | $2,8 \cdot 10^{-4}$  | $1 \cdot 10^{-4}$   | $1,6 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-5}$    | $6 \cdot 10^{-5}$    | $6 \cdot 10^{-4}$    |



Распространенность элементов в образцах, доставленных  
«Аполлон-11 и -12» и «Луна-16», по сравнению с земным диабазом  
(W-1), эвкритами и углистым хондритом типа I

| Z  | Элемент | «Аполлон-11»           |         | «Аполлон-12»,<br>среднее | «Луна-16»,<br>среднее | Диабазы | Эвкриты | Углистые<br>хондриты |
|----|---------|------------------------|---------|--------------------------|-----------------------|---------|---------|----------------------|
|    |         | интервал значе-<br>ний | среднее |                          |                       |         |         |                      |
| 3  | Li      | 9—23                   | 12      | 11                       | 10,8                  | 12      | 8       | 1,3                  |
| 4  | Be      | 1—6                    | 2       | —                        | 2,5                   | 0,8     | 0,1     | 0,04                 |
| 5  | B       | 1—4                    | 2       | —                        | 4,4                   | 15      | 0,8     | 5                    |
| 6  | C       | 64—230                 | 140     | 110                      | —                     | —       | 700     | 3,4%                 |
| 7  | N       | 30—150                 | 100     | —                        | —                     | 14      | 30      | 2000                 |
| 8  | O       | 37,6—43,4%             | 40%     | —                        | —                     | 44,6%   | 42,7%   | 45,3%                |
| 9  | F       | 30—340                 | 140     | —                        | 200                   | 250     | 60      | 190                  |
| 11 | Na      | 2600—4000              | 3300    | 3000                     | —                     | 1,6%    | 3000    | 5500                 |
| 12 | Mg      | 3,4—5,1%               | 4,5%    | 7,2%                     | —                     | 4,0%    | 4,3%    | 9,6%                 |
| 13 | Al      | 3,7—7,8%               | 5,6%    | 7,4%                     | —                     | 7,9%    | 6,5%    | 8500                 |
| 14 | Si      | 17,7—20,6%             | 19,2%   | 19,6%                    | —                     | 24,9%   | 22,8%   | 10,3%                |
| 15 | P       | 200—900                | 500     | —                        | —                     | 610     | 400     | 1400                 |
| 16 | S       | 1200—2400              | 1700    | —                        | —                     | 1300    | 900     | 6,2%                 |
| 17 | Cl      | 3—30                   | 14      | —                        | 42                    | 200     | 20      | 260                  |
| 19 | K       | 400—2800               | 1400    | 1500                     | —                     | 5300    | 400     | 1400                 |
| 20 | Ca      | 7,2—9,0%               | 8,0%    | 7,1%                     | —                     | 7,8%    | 7,7%    | 1,1%                 |
| 21 | Sc      | 60—100                 | 75      | 47                       | 37,2                  | 34      | 35      | 5                    |
| 22 | Ti      | 4,3—7,4%               | 5,9%    | 1,9%                     | —                     | 6400    | 4600    | 420                  |
| 23 | V       | 20—100                 | 50      | 64                       | 67,5                  | 240     | 75      | 57                   |
| 24 | Cr      | 1300—2800              | 2100    | 2800                     | —                     | 120     | 2100    | 2200                 |
| 25 | Mn      | 1500—2400              | 1900    | 1900                     | —                     | 1300    | 3900    | 1700                 |
| 26 | Fe      | 11,8—15,6%             | 14,3%   | 13,2%                    | —                     | 7,7%    | 14,5%   | 18,4%                |
| 27 | Co      | 11—35                  | 25      | 42                       | 41                    | 50      | 4       | 480                  |
| 28 | Ni      | 3—200                  | —       | 200                      | 171                   | 78      | 13      | 1,0%                 |
| 29 | Cu      | 4—25                   | 11      | —                        | 37                    | 110     | 7       | 140                  |
| 30 | Zn      | 2—40                   | 15      | 5,4                      | 33,4                  | 82      | 2       | 320                  |
| 31 | Ga      | 3—6                    | 4,5     | 4,9                      | 4,5                   | 16      | 2       | 10                   |
| 32 | Ge      | 0,1—0,4                | —       | —                        | 1,25                  | 1,7     | 0,2     | 34                   |
| 33 | As      | 0,01—0,09              | 0,05    | —                        | 0,41                  | 2,4     | 0,05    | 2,0                  |
| 34 | Se      | 0,4—1,6                | 0,8     | 0,24                     | 0,36                  | 0,11    | 0,002   | 27                   |
| 35 | Br      | 0,01—0,4               | 0,1     | 0,13                     | 0,5                   | 0,4     | 0,4     | 5                    |
| 37 | Rb      | 0,00—6                 | 3,4     | 8,7                      | 1,9                   | 22      | 0,35    | 2,3                  |
| 38 | Sr      | 110—220                | 170     | 170                      | 220                   | 180     | 85      | 8                    |
| 39 | Y       | 70—170                 | 120     | 130                      | 70,4                  | 25      | 23      | 1,6                  |
| 40 | Zr      | 180—660                | 370     | 670                      | 294                   | 100     | 46      | 9                    |
| 41 | Nb      | 14—31                  | 21      | —                        | 15,9                  | 10      | —       | 0,5                  |
| 42 | Mo      | 0,4—0,7                | 0,5     | —                        | 5,3                   | 0,5     | —       | 0,6                  |
| 44 | Ru      | —                      | —       | —                        | 0,1                   | 0,4     | —       | 0,7                  |
| 45 | Rh      | —                      | —       | —                        | 0,15                  | 0,005   | —       | 0,2                  |
| 46 | Pd      | 0,001—0,023            | 0,006   | —                        | 0,38                  | 0,01    | —       | 0,6                  |
| 47 | Ag      | 0,001—0,024            | 0,008   | 0,005                    | 0,28                  | 0,05    | —       | 0,4                  |
| 48 | Cd      | 0,003—0,11             | 0,004   | 0,004                    | 0,52                  | 0,3     | 0,04    | 1,0                  |
| 49 | In      | 0,003—0,05             | 0,003   | 0,009                    | 1,7                   | 0,07    | 0,001   | 0,09                 |
| 50 | Sn      | 0,3—1,2                | 0,6     | —                        | 3,0                   | 3       | —       | 1,6                  |
| 51 | Sb      | 0,005—0,01             | 0,007   | —                        | 0,85                  | 1,1     | 0,01    | 0,15                 |
| 52 | Te      | 0,008—0,073            | 0,02    | 0,075                    | —                     | 0,2     | 0,0002  | 3,3                  |
| 53 | I       | 0,006—1,4              | —       | —                        | 0,4                   | 0,05    | 0,2     | 0,3                  |
| 55 | Cs      | 0,02—0,17              | 0,10    | 0,32                     | 0,09                  | 1,0     | 0,09    | 0,19                 |
| 56 | Ba      | 70—340                 | 200     | 420                      | 185                   | 180     | 35      | 4                    |
| 57 | La      | 7—29                   | 18      | —                        | 13,4                  | 12      | 3,7     | 0,19                 |
| 58 | Ce      | 23—83                  | 54      | —                        | 40,8                  | 23      | 9,7     | 0,19                 |

| Z  | Элемент | «Аполлон-11»      |         | «Аполлон-12»,<br>среднее | «Луна-16»,<br>среднее | Диабазы | Эвкриты | Углистые<br>хондриты |
|----|---------|-------------------|---------|--------------------------|-----------------------|---------|---------|----------------------|
|    |         | интервал значений | среднее |                          |                       |         |         |                      |
| 59 | Pr      | 5—16              | 11      | —                        | 8,6                   | 4       | 1,4     | 0,09                 |
| 60 | Nd      | 21—69             | 46      | —                        | 35,7                  | 27      | 6,9     | 0,42                 |
| 62 | Sm      | 8—23              | 15      | —                        | 15                    | 4       | 2,3     | 0,13                 |
| 63 | Eu      | 1,5—2,7           | 1,9     | —                        | 2,23                  | 1,1     | 0,72    | 0,05                 |
| 64 | Gd      | 12—29             | 20      | —                        | 10,0                  | 4       | 2,9     | 0,24                 |
| 65 | Tb      | 2,1—5,0           | 3,6     | —                        | 1,21                  | 0,8     | 0,57    | 0,04                 |
| 66 | Dy      | 14—36             | 25      | —                        | 12,5                  | 4       | 3,8     | 0,22                 |
| 67 | Ho      | 2,2—8,7           | 4,9     | —                        | 2,8                   | 1       | 0,80    | 0,06                 |
| 68 | Er      | 9—21              | 14      | —                        | 5,8                   | 3       | 2,3     | 0,14                 |
| 69 | Tm      | 1,2—2,8           | 1,9     | —                        | 0,97                  | 0,35    | 0,38    | 0,02                 |
| 70 | Yb      | 8—20              | 13      | —                        | 5,9                   | 2,2     | 1,9     | 0,13                 |
| 71 | Lu      | 1,2—2,9           | 1,7     | —                        | —                     | 0,7     | 0,1     | 0,02                 |
| 72 | Hf      | 7—18              | 13      | —                        | 7,8                   | 2       | 0,8     | 0,32                 |
| 73 | Ta      | 1,0—2,7           | 1,7     | —                        | —                     | 0,7     | 0,1     | 0,02                 |
| 74 | W       | 0,1—0,4           | 0,3     | —                        | —                     | 0,45    | —       | 0,14                 |
| 75 | Re      | 0,01              | —       | —                        | —                     | 0,0003  | 0,00005 | 0,04                 |
| 76 | Os      | 0,0003            | —       | —                        | 0,03                  | 0,0003  | 0,0005  | 0,45                 |
| 77 | Ir      | 0,0001—0,01       | 0,0007  | 0,009                    | 0,0012                | 0,0003  | 0,0002  | 0,40                 |
| 78 | Pt      | —                 | —       | —                        | 0,05                  | 0,02    | —       | 0,90                 |
| 79 | Au      | 0,0002—0,004      | 0,0004  | 0,002                    | 0,002                 | 0,005   | 0,001   | 0,18                 |
| 80 | Hg      | 0,003—0,013       | —       | —                        | 0,4                   | 0,1     | —       | 1 ?                  |
| 81 | Tl      | 0,003—0,003       | 0,0006  | 0,002                    | 0,002                 | 0,13    | 0,0007  | 0,14                 |
| 82 | Pb      | 0,3—1,8           | 1,2     | —                        | 4                     | 8       | 0,5     | 2,9                  |
| 83 | Bi      | 0,0001—0,001      | 0,0003  | 0,002                    | —                     | —       | —       | 0,13                 |
| 90 | Th      | 0,5—3,4           | 2,0     | 6,0                      | —                     | 2,4     | 0,4     | 0,04                 |
| 92 | U       | 0,6—0,9           | 0,5     | 1,5                      | —                     | 0,5     | 0,1     | 0,01                 |

Таблица 32

Главные ионы океанической воды по С. В. Бруевичу (1966)  
(на 1 кг океанической воды при  $S = 35,000/00$  и  $Cl = 19,3750/00$ )

| Катионы          |                  |            | Анионы                         |                  |            |
|------------------|------------------|------------|--------------------------------|------------------|------------|
| Компонент        | Количество,<br>г | Эквивалент | Компонент                      | Количество,<br>г | Эквивалент |
| Na <sup>1+</sup> | 10,7638          | 0,46806    | Cl <sup>1-</sup>               | 19,3534          | 0,54582    |
| Mg <sup>2+</sup> | 1,2970           | 0,10666    | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  | 2,7007           | 0,05623    |
| Ca <sup>2+</sup> | 0,4080           | 0,02035    | HCO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> | 0,1427           | 0,00234    |
| K <sup>1+</sup>  | 0,3875           | 0,00991    | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>  | (0,0702)         | (0,00234)  |
| Sr <sup>2+</sup> | 0,0136           | 0,00031    | Br <sup>1-</sup>               | 0,0659           | 0,00083    |
|                  |                  |            | F <sup>1-</sup>                | 0,0013           | 0,00007    |
|                  |                  |            | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> | 0,0265           | —          |

Концентрация (в г/кг) ведущих ионов в морской воде  
при разной солености  
по Дж. Райли и Г. Скирроу (Riley, Skirrow, 1965)

| Соленость,<br>‰ | Na <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Sr <sup>2+</sup> | B     | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Br <sup>-</sup> | F <sup>-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
|-----------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|------------------|-------|-----------------|-------------------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|
|                 | 10              | 3,074            | 0,370            | 0,118          | 0,411            | 0,002 | 0,001           | 5,530                         | 0,775           | 0,019          | 0,0004                        |
| 15              | 4,611           | 0,555            | 0,177            | 0,167          | 0,003            | 0,002 | 8,294           | 1,162                         | 0,029           | 0,0006         | 0,061                         |
| 20              | 6,148           | 0,739            | 0,236            | 0,221          | 0,004            | 0,002 | 11,059          | 1,550                         | 0,038           | 0,0008         | 0,081                         |
| 25              | 7,685           | 0,924            | 0,295            | 0,277          | 0,006            | 0,003 | 13,824          | 1,935                         | 0,048           | 0,0009         | 0,101                         |
| 30              | 9,222           | 1,109            | 0,354            | 0,332          | 0,007            | 0,003 | 16,589          | 2,324                         | 0,057           | 0,0011         | 0,122                         |
| 31              | 9 529           | 1,146            | 0,366            | 0,343          | 0,007            | 0,004 | 17,142          | 2,402                         | 0,059           | 0,0012         | 0,126                         |
| 32              | 9,837           | 1,183            | 0,377            | 0,354          | 0,007            | 0,004 | 17,695          | 2,479                         | 0,061           | 0,0012         | 0,130                         |
| 33              | 10,144          | 1,220            | 0,389            | 0,365          | 0,008            | 0,004 | 18,248          | 2,557                         | 0,063           | 0,0013         | 0,134                         |
| 34              | 10,452          | 1,257            | 0,401            | 0,376          | 0,008            | 0,004 | 18,801          | 2,634                         | 0,065           | 0,0013         | 0,138                         |
| 35              | 10,759          | 1,294            | 0,413            | 0,387          | 0,008            | 0,004 | 19,354          | 2,712                         | 0,067           | 0,0013         | 0,138                         |
| 36              | 11,066          | 1,331            | 0,424            | 0,398          | 0,008            | 0,004 | 19,907          | 2,789                         | 0,069           | 0,0014         | 0,146                         |
| 37              | 11,374          | 1,368            | 0,436            | 0,409          | 0,008            | 0,004 | 20,460          | 2,867                         | 0,071           | 0,0014         | 0,150                         |
| 38              | 11,681          | 1,405            | 0,448            | 0,420          | 0,009            | 0,004 | 21,012          | 2,944                         | 0,073           | 0,0014         | 0,154                         |
| 39              | 11,989          | 1,442            | 0,460            | 0,431          | 0,009            | 0,004 | 21,565          | 3,022                         | 0,075           | 0,0015         | 0,158                         |

Средний химический элементарный состав воды океанов  
по А. П. Виноградову (1967)  
(S = 35,00‰; Cl = 19,375‰)

| Элемент | Содержание           |           | Элемент | Содержание            |            |
|---------|----------------------|-----------|---------|-----------------------|------------|
|         | %                    | мг/л      |         | %                     | мг/л       |
| H       | —                    | —         | In      | (1·10 <sup>-9</sup> ) | 0,00001    |
| He      | —                    | 0,000005  | Sn      | 3·10 <sup>-7</sup>    | 0,003      |
| Li      | 1,5·10 <sup>-5</sup> | 0,15      | Sb      | 5·10 <sup>-8</sup>    | 0,0005     |
| Be      | 6·10 <sup>-11</sup>  | 0,0000006 | Te      | Не известно           | —          |
| B       | 4,6·10 <sup>-4</sup> | 4,6       | I       | 5·10 <sup>-6</sup>    | 0,05       |
| C       | —                    | 28        | Xe      | Не известно           | —          |
| N       | —                    | 0,5       | Cs      | 3,7·10 <sup>-8</sup>  | 0,00037    |
| O       | —                    | —         | Ba      | 2·10 <sup>-6</sup>    | 0,02       |
| F       | 1,3·10 <sup>-4</sup> | 1,3       | La      | 2,9·10 <sup>-10</sup> | 0,0000029  |
| Ne      | —                    | 0,0001    | Ce      | 1,3·10 <sup>-10</sup> | 0,0000013  |
| Na      | 1,03534              | 10,354    | Pr      | 6·10 <sup>-11</sup>   | 0,0000006  |
| Mg      | 0,1297               | 1,297     | Nd      | 2,3·10 <sup>-11</sup> | 0,0000023  |
| Al      | 1·10 <sup>-6</sup>   | 0,01      | Sm      | 4,2·10 <sup>-11</sup> | 0,00000042 |
| Si      | 3·10 <sup>-4</sup>   | 3,0       | Eu      | 1,1·10 <sup>-10</sup> | 0,0000011  |
| P       | 7·10 <sup>-6</sup>   | 0,07      | Gd      | 6·10 <sup>-11</sup>   | 0,0000006  |
| S       | 0,089                | 890       | Tb      | Не известно           | —          |
| Cl      | 1,93534              | 19 354    | Dy      | 7,3·10 <sup>-11</sup> | 0,00000073 |
| Ar      | —                    | 0,6       | Ho      | 2,2·10 <sup>-11</sup> | 0,00000022 |
| K       | 0,03875              | 387,5     | Er      | 6·10 <sup>-11</sup>   | 0,0000006  |

| Элемент | Содержание          |         | Элемент           | Содержание         |                    |
|---------|---------------------|---------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         | %                   | мг/л    |                   | %                  | мг/л               |
| Ca      | 0,0408              | 408     | Tm                | $1 \cdot 10^{-11}$ | 0,0000001          |
| Sc      | $4 \cdot 10^{-9}$   | 0,00004 | Yb                | $5 \cdot 10^{-11}$ | 0,00000052         |
| Ti      | $1 \cdot 10^{-7}$   | 0,001   | Lu                | $1 \cdot 10^{-10}$ | 0,0000012          |
| V       | $3 \cdot 10^{-7}$   | 0,003   | Hf                | Не известно        | —                  |
| Cr      | $2 \cdot 10^{-9}$   | 0,00002 | Ta                | »                  | —                  |
| Mn      | $2 \cdot 10^{-7}$   | 0,002   | W                 | $1 \cdot 10^{-5}$  | 0,0001             |
| Fe      | $1 \cdot 10^{-6}$   | 0,01    | Re                | Не известно        | —                  |
| Co      | $5 \cdot 10^{-8}$   | 0,0005  | Os                | »                  | —                  |
| Ni      | $2 \cdot 10^{-7}$   | 0,002   | Ir                | »                  | —                  |
| Cu      | $3 \cdot 10^{-7}$   | 0,003   | Pt                | »                  | —                  |
| Zn      | $1 \cdot 10^{-6}$   | 0,01    | Au                | $4 \cdot 10^{-10}$ | 0,000004           |
| Ga      | $3 \cdot 10^{-9}$   | 0,00003 | Hg                | $3 \cdot 10^{-9}$  | 0,00003            |
| Ge      | $6 \cdot 10^{-9}$   | 0,00006 | Tl                | $1 \cdot 10^{-9}$  | 0,00001            |
| As      | $1 \cdot 10^{-8}$   | 0,0001  | Pb                | $3 \cdot 10^{-9}$  | 0,00001            |
| Se      | $1 \cdot 10^{-8}$   | 0,0001  | Bi                | $2 \cdot 10^{-8}$  | 0,0002             |
| Br      | $6,6 \cdot 10^{-3}$ | 66      | Po                | Не известно        | —                  |
| Kr      | —                   | 0,0003  | At                | »                  | —                  |
| Rb      | $2 \cdot 10^{-5}$   | 0,2     | Rn                | $6 \cdot 10^{-20}$ | $6 \cdot 10^{-14}$ |
| Sr      | $8 \cdot 10^{-4}$   | 8,0     | Ra                | $1 \cdot 10^{-14}$ | $1 \cdot 10^{-10}$ |
| Y       | $3 \cdot 10^{-8}$   | 0,0003  | Ac                | $2 \cdot 10^{-20}$ | $2 \cdot 10^{-18}$ |
| Zr      | $5 \cdot 10^{-9}$   | 0,00005 | Th                | $1 \cdot 10^{-9}$  | 0,00001            |
| Nb      | $1 \cdot 10^{-9}$   | 0,00001 | Pa                | $5 \cdot 10^{-15}$ | $5 \cdot 10^{-11}$ |
| Mo      | $1 \cdot 10^{-6}$   | 0,01    | U                 | $3 \cdot 10^{-7}$  | 0,003              |
| Ru      | Не известно         | —       | Io                | $5 \cdot 10^{-14}$ | $5 \cdot 10^{-10}$ |
| Rh      | »                   | —       | Th <sup>228</sup> | $7 \cdot 10^{-19}$ | $7 \cdot 10^{-15}$ |
| Pd      | »                   | —       |                   |                    |                    |
| Ag      | $3 \cdot 10^{-8}$   | 0,0003  |                   |                    |                    |
| Cd      | $1 \cdot 10^{-8}$   | 0,0001  |                   |                    |                    |

Таблица 35

Химический состав морской воды и основные соединения  
для каждого элемента по Д. Гольдбергу (1963)

| Элемент | Концентрация, мг/л | Соединения, в форме которых элемент находится в морской воде   |
|---------|--------------------|--|
| H       | 108 000,0          | H <sub>2</sub> O   |
| He      | 0,000005           | He   |
| Li      | 0,2                | Li <sup>+</sup>  |
| Be      | 0,0000006          | Be(OH) <sup>1+</sup> ; Be(OH) <sub>2</sub>   |
| B       | 4,6                | B(OH) <sub>3</sub> ; B(OH) <sub>2</sub> O <sup>1-</sup>  |
| C       | 28,0               | HCO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> , H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> и органические соединения                |
| N       | 0,5                | NO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>1+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>1+</sup> , N <sub>2</sub> и органические соединения |
| O       | 857 000,0          | H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> и другие анионы   |
| F       | 1,3                | F <sup>1-</sup>  |
| Ne      | 0,0001             | Ne — газ   |

| Элемент | Концентрация, мг/л      | Соединения, в форме которых элемент находится в морской воде  |
|---------|-------------------------|---|
| Na      | 10,500                  | Na <sup>1+</sup>  |
| Mg      | 1,350                   | Mg <sup>2+</sup> , MgSO <sub>4</sub>  |
| Al      | 0,01                    |   |
| Si      | 3,0                     | Si(OH) <sub>4</sub> , Si(OH) <sub>3</sub> O <sup>-</sup>  |
| P       | 0,07                    | HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>1-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                    |
| S       | 885,0                   | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>   |
| Cl      | 19 000,0                | Cl <sup>1-</sup>  |
| Ar      | 0,6                     | Ar  |
| K       | 380,0                   | K <sup>1+</sup>   |
| Ca      | 400,0                   | Ca <sup>2+</sup> , CaSO <sub>4</sub>  |
| Sc      | 0,00004                 |   |
| Ti      | 0,001                   |   |
| V       | 0,002                   | VO <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> <sup>2-</sup>   |
| Cr      | 0,00005                 |   |
| Mn      | 0,002                   |   |
| Fe      | 0,01                    | Fe(OH) <sub>3</sub>   |
| Co      | 0,0005                  | Co <sup>2+</sup> ; CoSO <sub>4</sub>  |
| Ni      | 0,002                   | Ni <sup>2+</sup> ; NiSO <sub>4</sub>  |
| Cu      | 0,003                   | Cu <sup>2+</sup> ; CuSO <sub>4</sub>  |
| Zn      | 0,01                    | Zn <sup>2+</sup> ; ZnSO <sub>4</sub>  |
| Ga      | 0,00007                 |   |
| As      | 0,003                   | HAsO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ; H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>1-</sup> ; H <sub>3</sub> As <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ; H <sub>3</sub> AsO <sub>3</sub> |
| Se      | 0,004                   | SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  |
| Br      | 65,0                    | Br <sup>1-</sup>  |
| Kr      | 0,0003                  | Kr  |
| Rb      | 0,12                    | Rb <sup>1+</sup>  |
| Sr      | 8,0                     | Sr <sup>2+</sup> , SrSO <sub>4</sub>  |
| Y       | 0,0003                  |   |
| Nb      | 0,00001                 |   |
| Mo      | 0,01                    | MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  |
| Ag      | 0,0003                  | AgCl <sub>2</sub> <sup>1-</sup> ; AgCl <sub>3</sub> <sup>2-</sup>   |
| Cd      | 0,00011                 | Cd <sup>2+</sup> ; CdSO <sub>4</sub>  |
| In      | 0,02                    |   |
| Sn      | 0,0005                  |   |
| I       | 0,06                    | IO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> , I   |
| Xe      | 0,0001                  |   |
| Cs      | 0,0005                  | Cs <sup>1+</sup>  |
| Ba      | 0,03                    | Ba <sup>2+</sup> , BaSO <sub>4</sub>  |
| La      | 0,0003                  |   |
| Ce      | 0,0004                  |   |
| W       | 0,0001                  | WO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>   |
| Au      | 0,000004                | AuCl <sub>4</sub>   |
| Hg      | 0,00003                 | HgCl <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ; HgCl <sub>3</sub> <sup>1-</sup>   |
| Tl      | 0,00001                 | Tl  |
| Pb      | 0,0002                  |   |
| Rn      | 0,6 · 10 <sup>-15</sup> | Rn  |
| Ra      | 1 · 10 <sup>-10</sup>   |   |
| Th      | 0,0007                  |   |
| U       | 0,003                   | UO <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> <sup>4-</sup>   |

## РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ В ЖИВОМ ВЕЩЕСТВЕ

Данные о распространении элементов в организмах получены на основании химических анализов свыше 6000 видов животных и растений. Эти сведения обобщены А. П. Виноградовым в табл. 36. Сравнение данных распространения элементов в литосфере, почве и наземных растениях приведено в табл. 37.

Таблица 36

Средний состав живого вещества Земли по А. П. Виноградову (1954)

| Элемент | Вес. %            | Элемент | Вес. %            | Элемент | Вес. %              | Элемент | Вес. %             |
|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|---------------------|---------|--------------------|
| O       | 70,0              | Cl      | $2 \cdot 10^{-2}$ | Zn      | $5 \cdot 10^{-4}$   | As      | $3 \cdot 10^{-5}$  |
| C       | 18,0              | Fe      | $1 \cdot 10^{-2}$ | Rb      | $5 \cdot 10^{-4}$   | Co      | $2 \cdot 10^{-5}$  |
| H       | 10,5              | Al      | $5 \cdot 10^{-3}$ | Cu      | $2 \cdot 10^{-4}$   | Li      | $1 \cdot 10^{-5}$  |
| Ca      | $5 \cdot 10^{-1}$ | Ba      | $3 \cdot 10^{-3}$ | V       | $n \cdot 10^{-4}$   | Mo      | $1 \cdot 10^{-5}$  |
| K       | $3 \cdot 10^{-1}$ | Sr      | $2 \cdot 10^{-3}$ | Cr      | $n \cdot 10^{-4}$   | Y       | $1 \cdot 10^{-5}$  |
| N       | $3 \cdot 10^{-1}$ | Mn      | $1 \cdot 10^{-3}$ | Br      | $1,5 \cdot 10^{-4}$ | Cs      | $1 \cdot 10^{-5}$  |
| Si      | $2 \cdot 10^{-1}$ | B       | $1 \cdot 10^{-3}$ | Ge      | $10^{-4}$           | Se      | $< 10^{-6}$        |
| Mg      | $4 \cdot 10^{-2}$ | TR      | $n \cdot 10^{-3}$ | Ni      | $5 \cdot 10^{-5}$   | U       | $< 10^{-6}$        |
| P       | $7 \cdot 10^{-2}$ | Ti      | $8 \cdot 10^{-4}$ | Pb      | $5 \cdot 10^{-5}$   | Hg      | $n \cdot 10^{-7}$  |
| S       | $5 \cdot 10^{-2}$ | F       | $5 \cdot 10^{-4}$ | (Sn)    | $(5 \cdot 10^{-5})$ | Ra      | $n \cdot 10^{-12}$ |
| Na      | $2 \cdot 10^{-2}$ |         |                   |         |                     |         |                    |

Таблица 37

Распространенность элементов в литосфере, почве и наземных растениях по А. П. Виноградову (1962) и Д. П. Малюга (1963)

| Элемент | Литосфера           | Почва               | Растения (в золе)   |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Li      | $3,2 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-3}$   | $1,1 \cdot 10^{-3}$ |
| Be      | $3,8 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-4}$   | $2 \cdot 10^{-4}$   |
| B       | $1,2 \cdot 10^{-3}$ | $1 \cdot 10^{-3}$   | $4 \cdot 10^{-2}$   |
| F       | $6,6 \cdot 10^{-2}$ | $2 \cdot 10^{-2}$   | $1 \cdot 10^{-3}$   |
| Na      | 2,50                | 0,63                | 2,0                 |
| Mg      | 1,87                | 0,63                | 7,0                 |
| Al      | 8,05                | 7,13                | 1,40                |
| Si      | 29,5                | 33,0                | 15,0                |
| P       | $9,3 \cdot 10^{-2}$ | $8 \cdot 10^{-2}$   | 7,0                 |
| S       | $4,7 \cdot 10^{-2}$ | $8,5 \cdot 10^{-2}$ | 5,0                 |
| Cl      | $1,7 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^{-2}$   | $1 \cdot 10^{-2}$   |
| K       | 2,50                | 1,36                | 3,0                 |
| Ca      | 2,96                | 1,37                | 3,0                 |
| Ti      | 0,45                | 0,46                | 0,1                 |
| V       | $9 \cdot 10^{-3}$   | $1 \cdot 10^{-2}$   | $6,1 \cdot 10^{-3}$ |
| Cr      | $8,3 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-2}$   | $2,5 \cdot 10^{-2}$ |
| Mn      | $1 \cdot 10^{-1}$   | $8,5 \cdot 10^{-2}$ | $7,5 \cdot 10^{-1}$ |
| Fe      | 4,65                | 3,8                 | 4,0                 |
| Co      | $1,8 \cdot 10^{-3}$ | $1 \cdot 10^{-3}$   | $1,5 \cdot 10^{-3}$ |
| Ni      | $5,8 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-3}$   | $5 \cdot 10^{-3}$   |
| Cu      | $4,7 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-3}$   | $2 \cdot 10^{-2}$   |
| Zn      | $8,5 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-3}$   | $9 \cdot 10^{-2}$   |

| Элемент | Литосфера            | Почва               | Растения (в золе)   |
|---------|----------------------|---------------------|---------------------|
| As      | $1,7 \cdot 10^{-4}$  | $5 \cdot 10^{-4}$   | $3 \cdot 10^{-5}$   |
| Se      | $5 \cdot 10^{-6}$    | $1 \cdot 10^{-6}$   | —                   |
| Br      | $2,1 \cdot 10^{-4}$  | $5 \cdot 10^{-4}$   | $1,5 \cdot 10^{-2}$ |
| Rb      | $1,5 \cdot 10^{-2}$  | $6 \cdot 10^{-3}$   | $1 \cdot 10^{-2}$   |
| Sr      | $3,4 \cdot 10^{-2}$  | $3 \cdot 10^{-2}$   | $3 \cdot 10^{-2}$   |
| Zr      | $1,7 \cdot 10^{-2}$  | $3 \cdot 10^{-2}$   | —                   |
| Mo      | $1,1 \cdot 10^{-4}$  | $2 \cdot 10^{-4}$   | $2 \cdot 10^{-3}$   |
| Ag      | $7 \cdot 10^{-6}$    | $(1 \cdot 10^{-5})$ | $1 \cdot 10^{-4}$   |
| Cd      | $1,3 \cdot 10^{-5}$  | $5 \cdot 10^{-5}$   | $1 \cdot 10^{-6}$   |
| Sn      | $2,5 \cdot 10^{-4}$  | $1 \cdot 10^{-3}$   | $5 \cdot 10^{-4}$   |
| I       | $4 \cdot 10^{-5}$    | $5 \cdot 10^{-4}$   | $5 \cdot 10^{-3}$   |
| Cs      | $3,7 \cdot 10^{-4}$  | $5 \cdot 10^{-4}$   | $n \cdot 10^{-4}$   |
| Ba      | $6,5 \cdot 10^{-2}$  | $5 \cdot 10^{-2}$   | $n \cdot 10^{-2}$   |
| Au      | $4,3 \cdot 10^{-7}$  | —                   | $1 \cdot 10^{-4}$   |
| Hg      | $8,3 \cdot 10^{-6}$  | $1 \cdot 10^{-6}$   | $1 \cdot 10^{-7}$   |
| Pb      | $1,6 \cdot 10^{-3}$  | $1 \cdot 10^{-3}$   | $1 \cdot 10^{-3}$   |
| Ra      | $8,3 \cdot 10^{-11}$ | $8 \cdot 10^{-11}$  | $2 \cdot 10^{-11}$  |
| Th      | $1,3 \cdot 10^{-3}$  | $6 \cdot 10^{-4}$   | —                   |
| U       | $2,5 \cdot 10^{-4}$  | $1 \cdot 10^{-4}$   | $5 \cdot 10^{-5}$   |

Качественно в организмах обнаружены инертные газы, Be, Sc, Ga, Y, Zr, Ag, Cd, Zn, Sb, Te, Hf, Ta, W, Re, Au, Tl, Bi, Th и элементы платиновой группы. Основная масса живого вещества — растительность моря и суши. На материках преобладают растения, а в океане животные. Общая масса живого вещества на Земле (биомасса) по данным Н. И. Базилевича, Л. Е. Родина и Н. Н. Розова составляет  $2,4232 \cdot 10^{12}$  т. Распределение биомассы организмов Земли показано в табл. 38.

Таблица 38

## Биомасса организмов Земли

| Сухое вещество | Континенты          |                           |                      | Океан                   |                           |                         | Всего                   |
|----------------|---------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                | Зеленые растения    | Животные и микроорганизмы | Итого                | Зеленые растения        | Животные и микроорганизмы | Итого                   |                         |
| Тонны          | $2,4 \cdot 10^{12}$ | $0,02 \cdot 10^{12}$      | $2,42 \cdot 10^{12}$ | $0,0002 \times 10^{12}$ | $0,003 \times 10^{12}$    | $0,0032 \times 10^{12}$ | $2,4232 \times 10^{12}$ |
| Проценты       | 99,2                | 0,8                       | 100                  | 6,3                     | 93,7                      | 100                     |                         |

## СОСТАВ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Наиболее точные измерения состава атмосферного воздуха были выполнены Г. Дамкелером (1935 г.) и Ф. Панетом (1937 г.) и Е. Глюкауфом (1946 г.). В составе атмосферы следует различать две группы газов: группу постоянных и группу переменных составляющих. Первая группа составляет почти 100% приземной атмосферы. Вторая группа составляет в общем ничтожную долю, кроме воды и пара, объем которых может иногда составлять 2—3%. Ко второй группе

Таблица 39

Средний химический состав атмосферы (сухой воздух)  
по Ф. Панету (Paneth, 1937) с уточнениями В. Миртова (1961)

| Газ              | Содержание |          | Общая масса, $10^{20}$ г |
|------------------|------------|----------|--------------------------|
|                  | объемн. %  | вес. %   |                          |
| N <sub>2</sub>   | 78,0900    | 75,5100  | 38,648                   |
| O <sub>2</sub>   | 20,9500    | 23,1500  | 11,841                   |
| Ar               | 0,9300     | 1,2800   | 0,655                    |
| CO <sub>2</sub>  | 0,0300     | 0,0460   | 0,0233                   |
| Ne               | 0,0018     | 0,00125  | 0,000636                 |
| He               | 0,00052    | 0,000072 | 0,000037                 |
| CH <sub>4</sub>  | 0,00022    | 0,00012  | 0,000062                 |
| Kr               | 0,0001     | 0,00029  | 0,000146                 |
| N <sub>2</sub> O | 0,0001     | 0,00015  | 0,000077                 |
| H <sub>2</sub>   | 0,00005    | 0,000003 | 0,000002                 |
| Xe               | 0,000008   | 0,000036 | 0,000038                 |
| O <sub>3</sub> * | 0,000001   | 0,000036 | 0,000031                 |

\* Содержание увеличивается с высотой.

Таблица 40

Среднее содержание примесей в атмосфере

| Газ              | Объемн. %                             | Газ             | Объемн. %                             |
|------------------|---------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|
| H <sub>2</sub> O | 0,1—2,8                               | O <sub>3</sub>  | $1 \cdot 10^{-6}$ — $1 \cdot 10^{-5}$ |
| CH <sub>4</sub>  | $1,5 \cdot 10^{-4}$                   | NO <sub>2</sub> | $5 \cdot 10^{-8}$ — $2 \cdot 10^{-6}$ |
| CO               | $6 \cdot 10^{-6}$ — $1 \cdot 10^{-4}$ | Rn              | $6 \cdot 10^{-18}$                    |
| SO <sub>2</sub>  | $1 \cdot 10^{-4}$                     | NO              |                                       |
| N <sub>2</sub> O | $5 \cdot 10^{-5}$                     |                 |                                       |

Таблица 41

Количество газов и паров, содержащихся или продуцированных мантией  
и дегазированных в атмосферу и гидросферу Земли  
за  $(4,7-5) \cdot 10^9$  лет по расчетам А. П. Виноградова (1962)

| Компоненты       | Содержание                    |  |                     |
|------------------|-------------------------------|--|---------------------|
|                  | в мантии, $4 \cdot 10^{27}$ г | в атмосфере ( $5 \cdot 10^{21}$ )<br>и гидросфере ( $1,5 \cdot 10^{24}$ ), г | %                   |
| H <sub>2</sub> O | $2 \cdot 10^{25}$             | $1,5 \cdot 10^{24}$  | 7,5                 |
| N <sub>2</sub>   | $8 \cdot 10^{23}$             | $3,8 \cdot 10^{21}$  | 5,0                 |
| C                | $2 \cdot 10^{24}$             | $5 \cdot 10^{22}$  | 2,5                 |
| Cl               | $4 \cdot 10^{23}$             | $3 \cdot 10^{22}$  | 7,5                 |
| S                | $(7 \cdot 10^{26})$           | $3 \cdot 10^{22}$  | $5 \cdot 10^{-3}$   |
|                  | Продуцировано                 |  |                     |
| <sup>40</sup> Ar | $5,3 \cdot 10^{22}$           | $6,5 \cdot 10^{19}$  | 0,1                 |
| <sup>4</sup> He  | $1,7 \cdot 10^{19}$           | $(3,5 \cdot 10^{15})$  | $(2 \cdot 10^{-2})$ |

относятся озон, содержание которого ощутимо лишь на больших высотах, метан, углекислота и др. Поэтому, характеризуя химический состав атмосферы, следует учитывать состав сухого воздуха (табл. 39). Б. А. Миртов (1961) считает, что данные табл. 39 наиболее точно характеризуют состав приземной атмосферы. Содержание примесей в атмосфере приведено в табл. 40. Результаты приближенных расчетов вековой дегазации Земли даны в табл. 41. Вопросы эволюции атмосферы и океана рассмотрены в работах А. П. Виноградова (1964, 1967), А. Б. Рогова (1964), П. Бранказио и А. Камерона (Brancazio, Cameron, 1964).

### СРЕДНИЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЛИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Исходя из средних оценок геофизических параметров относительно «базальтовой» и «гранитной» оболочек земной коры, были вычислены вероятные количественные соотношения главных типов горных пород. Основываясь на этих данных и многочисленных анализах главных типов горных пород, некоторые авторы дали новую оценку среднего элементарного химического состава литосферы в целом и ее отдельных оболочек (осадочной, «гранитной», «базальтовой»). Наиболее существенные результаты в этом отношении получены были А. Б. Роговым и А. А. Ярошевским (1967), а в последнее время А. А. Беусом (1972). В табл. 42 приведен средний состав литосферы и ее оболочек согласно расчетам А. А. Беуса.

Т а б л и ц а 42

Средний состав литосферы и ее оболочек (вес. %)

| Элемент | Осадочная оболочка континентов | «Гранитная» оболочка | «Базальтовая» оболочка континентов | Литосфера — континентальная кора (без осадочной оболочки) | Литосфера — вся кора (без осадочной оболочки) |
|---------|--------------------------------|----------------------|------------------------------------|---|---|
| O       | 48,9                           | 48,0                 | 46,0                               | 46,6  | 46,3  |
| Si      | 24,3                           | 30,9                 | 26,2                               | 27,7  | 26,7  |
| Al      | 6,0                            | 8,0                  | 8,1                                | 8,1   | 8,1   |
| Fe      | 3,9                            | 3,6                  | 6,7                                | 5,7   | 6,0   |
| Mg      | 2,0                            | 1,2                  | 3,0                                | 2,4   | 3,0   |
| Mn      | 0,07                           | 0,07                 | 0,1                                | 0,09  | 0,09  |
| Ca      | 8,0                            | 2,5                  | 5,1                                | 4,3   | 5,0   |
| Na      | 1,3                            | 2,2                  | 2,4                                | 2,3   | 2,3   |
| K       | 1,8                            | 2,64                 | 1,5                                | 1,8   | 1,6   |
| Ti      | 0,4                            | 0,33                 | 0,7                                | 0,6   | 0,6   |
| H       | 0,3 *                          | 0,12                 | 0,1                                | 0,1   | 0,1   |
| P       | 0,07                           | 0,08                 | 0,1                                | 0,1   | 0,08  |

\* Без учета поровой воды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аллер Л. Распространенность химических элементов. М., Изд-во иностр. лит., 1963. 358 с.  
 Беус А. А. Геохимия литосферы. М., «Недра», 1972. 296 с.  
 Бруевич С. В. (редактор). Химия Тихого океана. — В кн.: Тихий океан. М., 1966, с. 108—116.  
 Виноградов А. П. Примечание редактора. — В кн.: В. И. Вернадский. Избр. соч. Т. I. М., 1954, с. 361—367.  
 Виноградов А. П. Атомные распространенности химических элементов Солнца и каменных метеоритов. — «Геохимия», 1962, № 4, с. 291—296.  
 Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. — «Геохимия», 1962, № 7, с. 555—571.

- Виноградов А. П. Происхождение оболочек Земли. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1962, № 11, с. 3—19.
- Виноградов А. П. Газовый режим Земли. «Химия земной коры». 1964, т. II, с. 5—21.
- Виноградов А. П. Образование океана. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1967, № 4, с. 3—21.
- Виноградов А. П. Введение в геохимию океана. М., «Наука», 1967. 216 с.
- Гольдберг Э. Д. Геохимия моря. — В кн.: Геохимия литогенеза. Пер. с англ. М., 1963, с. 113—124.
- Зюсс Г. и Юри Г. Распространенность элементов. — «Успехи физических наук», 1957, вып. 1, с. 2—16.
- Малюга Д. П. Биогеохимический метод поисков рудных месторождений. М., Изд-во АН СССР, 1963. 214 с.
- Миртов Б. А. Газовый состав атмосферы Земли и методы его анализа. М., Изд-во АН СССР, 1961. 320 с.
- Ронов А. Б. Общие тенденции в эволюции состава земной коры, океана и атмосферы. — «Геохимия», 1964, № 8, с. 3—18.
- Ронов А. Б., Ярошевский А. А. Химическое строение земной коры. — «Геохимия», 1967, № 11, с. 1285—1309.
- Чердынцев В. В. Распространенность химических элементов. М., Гостехиздат, 1956. 360 с.
- Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. М., «Мир», 1965. 280 с.
- Brancaster P. J. and Cameron A. G. W. The Origin and Evolution of Atmospheres and Oceans. New York — London, 1964, 314 p.
- Clarke F. M. and Washington H. S. The composition of the earth's crust. — U. S. Dep. Interior. Geol. Survey. Profess. Paper, 1924, p. 127—140.
- Goles G. G. Cosmic Abundances. — In Handbook of Geochemistry (Wedepohl K. editor), Springer Verlag Berlin — Heidelberg — New York, 1969, p. 116—134.
- Faneth F. A. Composition of Atmosphere. — «Quart. Journal Roy. Meteorology Society», 1937, 63, p. 433—440.
- Riley J. and Skirrow G. (Editors). Chemical Oceanography. Acad. Press, London, 1965, vol. 1, 712 p.
- Taylor S. R. Trace elements abundances and chondritic Earth model. — «Geochimic et Cosmochimica Acta», 1964, vol. 28, p. 1989—1998.
- Turekian K. K. and Wedepohl K. H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. — «Bull. Geol. Soc. of Amer.», 1961, vol. 72, No 2, p. 175—190.
- Wasserburg G. J., Mac-Donald J. F., Hoyle F. Relative contribution of uranium, thorium and potassium to heat production on the Earth. — «Science», 1964, vol. 143, No 3605, p. 465—467.

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ГОРНЫХ ПОРОД И ДРУГИХ ПРИРОДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Химический состав различных природных тел, приводимых в таблицах этой главы, касается в основном лишь их главных составных частей. Химический состав горных пород выражен преимущественно в оксидах, как это принимается в петрохимических исследованиях. В таблицах приводятся сведения по содержанию ведущих химических элементов в метеоритах разных типов и их минеральный состав, данные по составу лунных пород, а также по химическому составу различных наиболее распространенных земных горных пород. Особое место занимают таблицы, характеризующие химический состав природных вод материков, данные о материковом стоке вод в океан. Приведены подробные сведения об элементарном составе некоторых живых организмов и ископаемых углей.

### ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ МЕТЕОРИТОВ

Многочисленные анализы метеоритов позволили получить достоверные сведения о содержании в них наиболее распространенных химических элементов, таких, как Fe, Ni, S, Mg, Si, Ca, Al, O. Их соотношение определяет минеральный состав метеоритов. Наиболее существенные различия в составе наблюдаются между тремя основными типами метеоритов: каменными, железо-каменными и железными. В первом приближении состав этих метеоритов можно рассматривать, как сочетание трех основных фаз: металлической, сульфидной (троилитовой) и силикатной. Средний состав этих трех фаз метеоритного вещества приведен в табл. 43. Каменные метеориты (хондриты и ахондриты) состоят главным образом из O, Si, Mg, Fe, Ca, железные метеориты почти целиком состоят из

Таблица 43

Средний состав разных фаз метеоритного вещества по В. Гольдшмидту

| Элемент | Металлическая фаза | Сульфидная фаза, троилит | Силикатная фаза | Средний состав метеоритного вещества |
|---------|--------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------------|
| O       | —                  | —                        | 43,12           | 32,30                                |
| Fe      | 90,78              | 61,1                     | 13,23           | 28,80                                |
| Si      | —                  | —                        | 21,61           | 16,30                                |
| Mg      | —                  | —                        | 16,62           | 12,30                                |
| S       | —                  | 34,3                     | —               | 2,12                                 |
| Ni      | 8,59               | 2,88                     | 0,39            | 1,57                                 |
| Al      | —                  | —                        | 1,83            | 1,38                                 |
| Ca      | —                  | —                        | 2,07            | 1,33                                 |
| Na      | —                  | —                        | 0,82            | 0,60                                 |
| Cr      | —                  | 0,120                    | 0,36            | 0,34                                 |
| Mn      | —                  | 0,046                    | 0,31            | 0,21                                 |
| K       | —                  | —                        | 0,21            | 0,15                                 |
| Ti      | —                  | —                        | 0,10            | 0,13                                 |
| Co      | 0,63               | 0,208                    | 0,02            | 0,12                                 |
| P       | —                  | 0,305                    | 0,17            | 0,11                                 |

никелистого железа, а железо-каменные — приблизительно из равных количеств никелистого железа, кислорода, магния и кремния.

Классификация метеоритов основывается на их химическом и минеральном составе. Наиболее распространена классификация Г. Прайора, предложенная в 1920 г. В обобщенном виде с некоторыми изменениями, внесенными Б. Мейсоном, эта классификация приведена в табл. 44.

Т а б л и ц а 44

Классификация метеоритов

| Группа          | Класс  | Главные минералы   |
|-----------------|--|--|
| Хондриты        | Энстатитовые хондриты<br>Оливин-бронзитовые<br><br>Оливин-гиперстеновые<br><br>Оливин-пиконитовые<br>Углистые хондриты | Энстатит, никелистое железо<br>Оливин, бронзит, никелистое железо<br>Оливин, гиперстен, никелистое железо<br>Оливин, пиконит<br>Серпентин, органическое вещество |
| Ахондриты       | Обриты<br>Диогениты<br>Шассиньиты<br>Уреилиты<br><br>Ангриты<br>Наклиты<br>Эвкриты и говардиты                         | Энстатит<br>Гиперстен<br>Оливин<br>Оливин, пиконит, никелистое железо<br>Авгит<br>Диопсид, оливин<br>Пироксен, плагиоклаз  |
| Железо-каменные | Палласиты<br>Сидерофиты<br>Лодраниты<br>Мезосидериты   | Оливин, никелистое железо<br>Ортопироксен, никелистое железо<br>Ортопироксен, оливин, никелистое железо<br>Пироксен, плагиоклаз, никелистое железо               |
| Железные        | Гексаэдриты<br>Октаэдриты<br>Богатые никелем атакситы  | Камасит<br>Камасит, тэнит<br>Тэнит   |

Новые данные по составу каменных метеоритов позволили более обстоятельно и четко провести химическую классификацию наиболее обширной и многочисленной группы — хондритов. Так, согласно Г. Юри, Г. Крейгу и другим исследователям, можно различать: 1) энстатитовые хондриты; 2) обычные или обыкновенные хондриты; 3) углистые хондриты. В зависимости от химического состава хондритовые метеориты подразделяются на пять классов (табл. 45).

По степени метаморфизма хондритовые метеориты подразделяются на шесть петрологических типов. Однако далеко не все представители известных химических классов хондритов охватывают все эти шесть типов.

## Классификация хондритов

| Класс          | Fe <sup>o</sup> : Fe | Fe : Si     | Mg : Si     | Число известных падений |     |
|----------------|----------------------|-------------|-------------|-------------------------|-----|
| Энстатитовые E | 0,80±0,10            | 0,83 ± 0,32 | 0,79 ± 0,06 | 17                      |     |
| Обычные        | { Н много Fe         | 0,63 ± 0,07 | 0,83 ± 0,08 | 0,96 ± 0,03             | 413 |
|                | { L мало Fe          | 0,33 ± 0,07 | 0,59 ± 0,05 | 0,94 ± 0,03             | 504 |
|                | { LL очень мало Fe   | 0,08 ± 0,07 | 0,53 ± 0,03 | 0,94 ± 0,03             | 49  |
| Углистые C     | Мало                 | 0,83 ± 0,08 | 1,05 ± 0,03 | 36                      |     |

В метеоритах встречены минералы различных классов, которые перечисляются ниже.

**Простые вещества:** аварунит, алмаз, графит, железо ( $\alpha$ ), камасит, лонсдейлит (гексагональный алмаз), медь, сера ( $\alpha$ ), тэнит, чаоит, золото.

**Карбиды, силициды, нитриды, фосфиды:** барринджерит, карлсбергит, когенит, муассанит\*, осборнит, перриит, рабдит, синюит, хэксонит, шрейберзит.

**Сульфиды:** адабандин, борнит, бравоит, бржезианит, валериит, виоларит, вуртцит, джентнерит, джерфшерит, кубанит (халькопирротин), макьюит, найнингерит, ольдагамит, пентландит, пирит, пирротин, сфалерит, троилит, ферроалабандин, хайдеит, халькопирит, хизлеудит.

**Окислы и гидроксиды:** акагенит, гематит, герцинит (феррошпинель), гегит, гидроникейт, ибонит, ильменит, иоцит (вюстит), кварц, кристобалит, лепидокрокит, маггемит, магнетит, перовскит, ривезит, рутил, тридимит, хромит, шпинель.

**Силикаты:** авгит, альбит, алмадин, анортит, антигорит, битовнит, бронзит, волластонит, геленит, гиперстен, гортонолит, гриналит, гроссуляр, диоксид, калиевый полевой шпат, калий-натровый полевой шпат, клинобронзит, клиногиперстен, клинохризотил, клиноэнстатит, кордиерит, космохлор (юрнит), криновит, лабрадор, маскелинит (плагноклазовое стекло), меджорит, мелилит, меррихейт, монтчеллит, монтмориллонит, нефелин, оливин, олигоклаз, паллгорскит, пижонит, плагноклаз, реддерит, рингвудит, ришидолит (прохлорит), рихтерит, ронит, сениолоит, серпентин, содалит, фассаит, ферроавгит, фаялит, форстерит, хромдиоксид, циркон, шамозит, энстатит, ягит.

**Фосфаты:** брианит, витлокит (мериллит), гидросилапатит, графтонит, панетит, саркопсид, станфильдит, фаррингтонит, хлорапатит.

**Сульфаты:** астраханит, гипс, эпсомит, ярозит.

**Карбонаты:** брейнерит, вевеллит, доломит, кальцит, магнезит, сидерит.

**Хлориды:** лауренсит.

Некоторые из перечисленных минералов (в частности, некоторые гидроксиды и сульфаты) образовались в результате выветривания первичных минералов метеоритов в земных условиях.

Наиболее распространенными главными породообразующими минералами метеоритов являются лишь немногие: никелистое железо, (камасит и тэнит), оливин, энстатит, бронзит, гиперстен, диоксид, авгит, троилит, плагноклаз. В метеоритах встречен ряд минералов, совершенно неизвестных в земных условиях (табл. 46).

Средний минеральный состав метеоритов приведен в табл. 47.

Химический состав хондритовых метеоритов показывает широкие вариации состояния окисления вещества — от сильно окисленных углистых хондритов, в которых все железо находится в составе окислов либо силикатов, до сильно восстановленных энстатитовых хондритов, где все железо находится

\* Сомнительные или недостаточно строго установленные находки.

## Минералы, найденные только в метеоритах

| Минерал  | Химический состав   | Кристаллическая система (сингония)  |
|--|---|---|
| Простые вещества   |   |   |
| Камасит<br>Тэнит   | $\alpha - (\text{Fe}, \text{Ni})$<br>$\gamma - (\text{Fe}, \text{Ni})$  | Кубическая<br>»   |
| Нитриды, фосфиды, карбиды, хлориды   |   |   |
| Карлсбергит<br>Осборнит<br>Баринджерит<br>Шрейберзит<br>Перриит<br>Синоит<br>Хэксонит<br>Лауренсит | CrN<br>TiN<br>$(\text{Fe}, \text{Ni})_2\text{P}$<br>$(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co})_3\text{P}$<br>$(\text{Ni}, \text{Fe})_x(\text{Si}, \text{P})_y$<br>$\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$<br>$(\text{Fe}, \text{Ni})_{23}\text{C}_6$<br>$\text{FeCl}_2$   | Кубическая<br>»<br>Гексагональная<br>Тетрагональная<br>Кубическая<br>Ромбическая<br>—<br>Тригональная |
| Сульфиды   |   |   |
| Бржезиннит<br>Ольдгамит<br>Джентнерит<br>Добреелит<br>Дирфшерит<br>Найнинггерит<br>Хайдеит         | $\text{Cr}_3\text{S}_4$<br>CaS<br>$\text{Cu}_8\text{Fe}_3\text{Cr}_{11}\text{S}_{18}$<br>$\text{FeCr}_2\text{S}_4$<br>$\text{K}_3(\text{Na}, \text{Cu})(\text{Fe}, \text{Ni})_{12}\text{S}_{11}$<br>$(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Co})\text{S}$<br>$(\text{Fe}, \text{Cr})_{1+x}(\text{Ti}, \text{Fe})_2\text{S}_4$  | Кубическая<br>»<br>»<br>»<br>»<br>Кубическая<br>»   |
| Фосфаты  |   |   |
| Фаррингтонит<br>Меррилит (витлокит)<br>Брианит<br>Паветит<br>Станфильдит                           | $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$<br>$\text{Na}_2\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{O}$<br>$\text{Na}_2\text{CaMg}(\text{PO}_4)_2$<br>$\text{NaKMgCaFeMn}(\text{PO}_4)_2$<br>$\text{MgCaFeMn}(\text{PO}_4)_2$   | Моноклиная<br>»<br>Ромбическая<br>Моноклиная<br>»   |
| Силикаты   |   |   |
| Меррихелл<br>Роддерит<br>Ягнит<br>Юриит (космохлор)<br>Криновит<br>Меджорит<br>Рингвудит           | $(\text{K}, \text{Na})_2(\text{Fe}, \text{Mg})_5\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$<br>$(\text{Na}, \text{K})_2(\text{Fe}, \text{Mg})_5\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$<br>$(\text{Na}, \text{K})\text{Mg}_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ti}, \text{Al})(\text{Si}_{10}\text{Al}_2)\text{O}_{30}$<br>$\text{NaCrSi}_2\text{O}_6$<br>$\text{NaMg}_3\text{CrSi}_2\text{O}_{10}$<br>$\text{Mg}_3(\text{Fe}, \text{Si})(\text{SiO}_4)_3$<br>$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4 - \text{Si}(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{O}_4$ | Гексагональная<br>»<br>»<br>Моноклиная<br>»   |

Средний минеральный состав метеоритов (вес. %) разных классов по Р. Дэли (1936)

| Минералы          | Железистые | Палласиты |             | Мезосидериты |             | Хондриты |             | Ахондриты |             |
|-------------------|------------|-----------|-------------|--------------|-------------|----------|-------------|-----------|-------------|
|                   |            | Общий     | Без металла | Общий        | Без металла | Общий    | Без металла | Общий     | Без металла |
| Никелистое железо | 98,34      | 50,0      | —           | 45,0         | —           | 10,58    | —           | 1,57      | —           |
| Оливин            | —          | 48,0      | 96,0        | 1,5          | 2,7         | 42,31    | 47,34       | 12,82     | 13,03       |
| Пироксены         | —          | —         | —           | 30,6         | 55,6        | 28,91    | 32,40       | 62,25     | 63,24       |
| Анортит           | —          | —         | —           | 16,4         | 30,0        | 3,34     | 3,73        | 13,23     | 13,44       |
| Альбит            | —          | —         | —           | —            | —           | 7,37     | 8,20        | 5,83      | 5,92        |
| Ортоклаз          | —          | —         | —           | —            | —           | 1,11     | 1,24        | 1,69      | 1,72        |
| Троилит           | 0,12       | 0,3       | 0,6         | 3,1          | 5,6         | 5,01     | 5,58        | 1,53      | 1,55        |
| Шрейберзит        | 1,12       | 0,2       | 0,4         | 2,6          | 4,7         | —        | —           | 0,40      | 0,41        |
| Хромит            | —          | —         | —           | 0,8          | 1,4         | 0,70     | 0,78        | 0,68      | 0,69        |
| Когенит           | 0,42       | 11,5      | 3,0         | —            | —           | —        | —           | —         | —           |
| Апатит            | —          | —         | —           | —            | —           | 0,67     | 0,73        | —         | —           |

Таблица 48

## Химический состав хондритов

| Компонент                      | Энстагитовый хондрит | Обычный Н-хондрит | Обычный L-хондрит | Углистые хондриты |        |        |
|--------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------|--------|
|                                |                      |                   |                   | Тип III           | Тип II | Тип I  |
| Fe                             | 23,70                | 15,15             | 6,27              | 4,02              | 0,00   | 0,00   |
| Ni                             | 1,78                 | 1,88              | 1,34              | 1,43              | 0,00   | 0,00   |
| Co                             | 0,12                 | 0,13              | 0,05              | 0,09              | 0,00   | 0,00   |
| FeS                            | 8,00                 | 6,11              | 5,89              | 5,12              | 3,66   | 5,65   |
| SiO <sub>2</sub>               | 38,47                | 36,55             | 39,93             | 34,82             | 27,81  | 21,74  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,12                 | 0,14              | 0,14              | 0,15              | 0,08   | 0,07   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,78                 | 1,91              | 1,86              | 2,18              | 2,15   | 1,59   |
| MnO                            | 0,02                 | 0,34              | 0,33              | 0,20              | 0,21   | 0,18   |
| FeO                            | 0,23                 | 10,21             | 15,44             | 24,34             | 27,34  | 22,86  |
| MgO                            | 21,63                | 23,47             | 24,71             | 23,57             | 19,46  | 15,24  |
| CaO                            | 1,03                 | 2,41              | 1,70              | 2,17              | 1,66   | 1,18   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,64                 | 0,78              | 0,74              | 0,69              | 0,63   | 0,71   |
| K <sub>2</sub> O               | 0,16                 | 0,20              | 0,13              | 0,23              | 0,05   | 0,07   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | с.                   | 0,30              | 0,31              | 0,20              | 0,30   | 0,27   |
| H <sub>2</sub> O               | 0,34                 | 0,21              | 0,27              | 0,10              | 12,86  | 19,17  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,23                 | 0,52              | 0,54              | 0,58              | 0,36   | 0,35   |
| NiO                            | 0,11                 | —                 | —                 | 0,00              | 1,53   | 1,19   |
| CoO                            | —                    | —                 | —                 | 0,00              | 0,07   | 0,06   |
| C                              | 0,32                 | —                 | 0,03              | 0,19              | 2,48   | 2,99   |
|                                |                      |                   |                   |                   |        | 6,71 * |

\* Органическое вещество

## Химический состав ахондритов

| Компонент                      | Моноклинный<br>пиконито-пла-<br>гиноклазовый | Полимитовый<br>ортопироксен-<br>пиконито-пла-<br>гиноклазовый | Диоксид оливи-<br>новый | Авгитовый | Оливин-пико-<br>нитовый | Оливиновый | Бронзитовый | Энстатитовый |
|--------------------------------|--|---|-------------------------|-----------|-------------------------|------------|-------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 48,17  | 49,75   | 48,96                   | 44,58     | 40,83                   | 37,12      | 52,11       | 54,01        |
| MgO                            | 7,10   | 16,40   | 12,01                   | 10,50     | 37,43                   | 32,05      | 25,85       | 35,92        |
| FeO                            | 15,99  | 13,26   | 19,63                   | 8,50      | 12,16                   | 26,82      | 16,05       | 0,97         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,17   | 2,62  | 1,29                    | 1,81      | —                       | —          | —           | —            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13,91  | 8,71  | 1,74                    | 8,86      | 0,54                    | 1,26       | 1,48        | 0,67         |
| CaO                            | 10,94  | 6,53  | 15,17                   | 24,51     | 0,87                    | 0,56       | 1,41        | 0,91         |
| Na <sub>2</sub> O              | (0,67)                                       | (0,95)  | (0,41)                  | (0,26)    | 0,11                    | 0,19       | 0,004       | 1,32         |
| K <sub>2</sub> O               | (0,13)                                       | (0,28)  | (0,14)                  | (0,19)    | 0,04                    | 0,09       | 0,001       | 0,10         |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,39   | 0,42  | 0,33                    | —         | 0,85                    | 0,88       | 0,80        | 0,06         |
| MnO                            | 0,46   | 0,78  | 0,09                    | —         | 0,40                    | 0,49       | 0,32        | 0,14         |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,51   | 0,11  | 0,38                    | —         | 0,15                    | 0,16       | 0,19        | 0,06         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,11   | 0,07  | —                       | —         | 0,08                    | 0,10       | 0,01        | 0,22         |
| H <sub>2</sub> O               | 0,44   | 0,25  | 0,24                    | —         | —                       | 0,24       | 0,14        | 1,14         |
| Fe                             | 0,80   | 0,33  | —                       | —         | 3,94                    | —          | 0,79        | 2,29         |
| Ni                             | —  | 0,11  | —                       | —         | 0,11                    | 0,06       | 0,03        | 0,7          |
| Co                             | —  | —   | —                       | —         | 0,05                    | —          | —           | —            |
| FeS                            | 0,4  | 0,73  | 0,06                    | 1,26      | 1,66                    | 0,60       | 1,12        | 1,25         |
| C                              | —  | —   | —                       | —         | 2,23                    | —          | —           | —            |
| Общий металл                   | —  | 0,44  | —                       | —         | 4,10                    | —          | 0,82        | 2,46         |

в металлическом состоянии. Состав наиболее типичных представителей хондритов по Б. Мэйсону (1965) дан в табл. 48.

Состав и структура ахондритов близки к изверженным породам земных условий образования (табл. 49).

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЛУННЫХ ПОРОД

Наши знания о химическом и минеральном составе горных пород относятся к восьми участкам поверхности Луны. Минералы, слагающие лунные породы, условно можно разделить на главные (свыше 10%), второстепенные (1—10%) и акцессорные (менее 1%). Главные: пироксен, плагиоклаз, ильменит; второстепенные: оливин, кристобалит (высокотемпературный), пироксферроит, тридимит; акцессорные: медь, железо, никелистое железо, когенит, прейберзит, тронит, калиевый полевой шпат, кварц, армалколит, ульвошпинель, хромит, шпинель, перовскит, рутил, бадделит, циркон, апатит, витлокит, транквилитит.

Часть перечисленных минералов (железо, никелистое железо, когенит, прейберзит и др.) вероятно метеоритного происхождения. Кроме того в лунных породах открыты новые минералы: армалколит (Fe, Mg)Ti<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; транквилитит (Fe, Y, Ca, Mn)(Ti, Si, Zr, Cr)O<sub>3</sub>; пироксферроит CaFe<sub>6</sub>(SiO<sub>3</sub>)<sub>7</sub>. Эти минералы отражают повышенное распространение тугоплавких литофильных элементов (титана, хрома, марганца и циркония) в лунных породах.

Коренные лунные породы магматического происхождения. Лунные моря сложены главным образом базальтовыми породами; возвышенные материковые районы — преимущественно авортозитами и близкими им породами. Химический состав лунных пород приведен в табл. 50 и 51 («Лунный грунт из Моря Изобилия», 1974).

## Химический состав лунных базальтов

| Компонент                      | Среднее по морским базальтам Океана Бурь, «Аполлон-12» | Среднее по реголиту Океана Бурь, «Аполлон-12» | Среднее по базальтам Моря Спокойствия, «Аполлон-11» | Базальт из Моря Изобилия, «Луна-16» | Реголит из Моря Изобилия, «Луна-16» | Базальт из района Кратера Литтров, «Аполлон-17» |
|--------------------------------|--|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| SiO <sub>2</sub>               | 45,03  | 46,4  | 40,30   | 43,8                                | 41,7                                | 41,27   |
| TiO <sub>2</sub>               | 3,36   | 3,0   | 11,49   | 4,90                                | 3,39                                | 10,17   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9,17   | 14,1  | 8,72  | 13,65                               | 15,33                               | 9,75  |
| FeO                            | 21,60  | 10,6  | 19,55   | 19,35                               | 16,64                               | 18,24   |
| MnO                            | —  | —   | —   | 0,20                                | 0,21                                | 0,29  |
| MgO                            | 10,89  | 10,3  | 7,64  | 7,05                                | 8,78                                | 6,84  |
| CaO                            | 9,81   | 10,0  | 10,45   | 10,4                                | 12,49                               | 12,30   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,29   | 0,40  | 0,52  | 0,38                                | 0,34                                | 0,44  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,58   | 0,20  | 0,30  | 0,15                                | 0,10                                | 0,09  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,40   | 0,21  | 0,18  | —                                   | —                                   | 0,07  |
| S                              | —  | —   | —   | —                                   | —                                   | 0,19  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | —  | —   | —   | 0,28                                | 0,28                                | 0,27  |

Таблица 51

## Химический состав лунных анортозитов

| Компонент                      | Среднее из восьми анализов анортозитов Океана Бурь | Среднее из шести анализов анортозитов Моря Спокойствия | Анортозит, «Луна-20» | Реголит, «Луна-20» | Анортозит № 78155 из района Кратера Литтров | Дунитовый обломок № 72415, «Аполлон-17» |
|--------------------------------|--|--|----------------------|--------------------|---|---|
| SiO <sub>2</sub>               | 48,41  | 73,5   | 44,2                 | 44,4               | 45,57                                       | 39,93                                   |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,66   | 0,5  | 0,52                 | 0,56               | 0,27  | 0,03                                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20,13  | 12,2   | 19,1                 | 22,9               | 25,94                                       | 1,53                                    |
| FeO                            | 8,14   | 0,9  | 6,91                 | 7,03               | 5,82  | 11,34                                   |
| MnO                            | —  | —  | 0,12                 | 0,12               | 0,10  | 0,13                                    |
| MgO                            | 7,41   | 0,4  | 13,37                | 9,70               | 6,33  | 43,61                                   |
| CaO                            | 11,03  | 1,2  | 13,30                | 15,20              | 15,18                                       | 1,14                                    |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,89   | 1,4  | 0,48                 | 0,55               | 0,33  | 0,02                                    |
| K <sub>2</sub> O               | 0,88   | 6,9  | 0,47                 | 0,10               | 0,08  | 0,00                                    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 1,2  | —  | 0,17                 | 0,14               | 0,04  | 0,04                                    |
| S                              | —  | —  | 0,03                 | 0,08               | 0,04  | 0,34                                    |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | —  | —  | —                    | —                  | 0,14  | 0,34                                    |

## СОСТАВ ИЗВЕРЖЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

О химическом составе изверженных горных пород можно судить на основании валового анализа породы. Результаты анализов дают нам отношения главных компонентов в весовых процентах, которые легко можно пересчитать в молекулярные и атомные количества. Многие тысячи анализов изверженных горных пород, полученные до настоящего времени, принципиально не внесли ничего нового в сведения о химическом составе наиболее распространенных пород, которые были обобщены в работах Р. Дэли (1936) и А. Н. Заварицкого (1955).

Приближенный минеральный состав (в %) главных типов изверженных пород по Э. Ларсену (1949)

| Минерал                | Гранит | Сиенит | Гранодиорит | Кварцевый диорит | Диорит | Габбро | Оливиновый диабаз | Диабаз | Дунит |
|------------------------|--------|--------|-------------|------------------|--------|--------|-------------------|--------|-------|
| Кварц                  | 25     | —      | 21          | 20               | 2      | —      | —                 | —      | —     |
| Ортоклаз и микропертит | 40     | 72     | 15          | 6                | 3      | —      | —                 | —      | —     |
| Олигоклаз              | 26     | 12     | —           | —                | —      | —      | —                 | —      | —     |
| Андезин                | —      | —      | 46          | 59               | 64     | —      | —                 | —      | —     |
| Лабрадор               | —      | —      | —           | —                | —      | 65     | 63                | 62     | —     |
| Биотит                 | 5      | 2      | 3           | 4                | 5      | 1      | —                 | 1      | —     |
| Амфибол                | 1      | 7      | 13          | 8                | 12     | 3      | —                 | 1      | —     |
| Ортопироксен           | —      | —      | —           | 1                | 3      | 6      | —                 | —      | 2     |
| Клинопироксен          | —      | 4      | —           | 3                | 8      | 24     | 21                | 29     | —     |
| Оливин                 | —      | —      | —           | —                | —      | 7      | 12                | 3      | 95    |
| Магнетит               | 2      | 2      | 1           | 2                | 2      | 2      | 2                 | 2      | 3     |

Поэтому основные данные по составу изверженных пород, приводимые в табл. 52—67, принимаются преимущественно на основании сводок этих авторов с небольшими дополнениями.

Результаты анализов изверженных горных пород СССР, полученные за последнее время, систематизированы в сводке В. Ф. Морковкиной (1964).

Таблица 54

## Химический состав ультраосновных изверженных горных пород

| Оксиды                         | Дунит | Гортонолитовый дунит | Верит | Гарцбургит | Амфиболитовый перидотит | Слюдяной перидотит | Диалмагит | Цикрит | Кимберлит | Меймечит (среднее из двух) | Эклогит |
|--------------------------------|-------|----------------------|-------|------------|-------------------------|--------------------|-----------|--------|-----------|----------------------------|---------|
| SiO <sub>2</sub>               | 40,49 | 34,25                | 45,07 | 40,91      | 40,91                   | 33,94              | 46,80     | 42,80  | 34,73     | 35,38                      | 46,5    |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,02  | 0,05                 | 0,64  | 0,11       | 0,65                    | 4,95               | 0,97      | 1,62   | 1,62      | 1,41                       | 0,5     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,86  | 1,45                 | 5,75  | 1,25       | 5,00                    | 10,28              | 6,37      | 10,55  | 2,88      | 2,73                       | 15,6    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,84  | 2,90                 | 3,43  | 2,53       | 4,64                    | 4,59               | 4,08      | 6,62   | 6,10      | 6,91                       | 4,2     |
| FeO                            | 5,54  | 35,55                | 9,53  | 6,15       | 7,97                    | 11,12              | 10,85     | 9,16   | 3,13      | 6,06                       | 7,6     |
| MnO                            | 0,16  | 0,40                 | 0,26  | 0,18       | 0,07                    | 0,16               | 0,20      | 0,24   | —         | —                          | —       |
| MgO                            | 46,32 | 22,00                | 22,88 | 42,36      | 30,82                   | 20,45              | 12,13     | 12,48  | 31,41     | 31,82                      | 10,5    |
| CaO                            | 0,70  | 2,35                 | 7,48  | 1,29       | 4,41                    | 5,35               | 16,03     | 11,67  | 5,79      | 5,99                       | 12,3    |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,10  | 0,20                 | 1,14  | 0,29       | 0,58                    | 0,48               | 0,82      | 1,89   | 0,33      | 0,27                       | 2,3     |
| K <sub>2</sub> O               | 0,04  | —                    | 0,57  | 0,13       | 0,36                    | 4,90               | 0,49      | 1,00   | 1,17      | 0,09                       | 0,5     |
| H <sub>2</sub> O               | 2,88  | 0,55                 | 3,10  | 5,02       | 4,56                    | 2,96               | 1,01      | 1,73   | 9,20      | 9,06                       | —       |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,005 | —                    | 0,15  | 0,04       | 0,03                    | 0,82               | 0,22      | 0,20   | 3,64      | —                          | —       |

Среднее значение (в вес. %) из химических анализов некоторых типов изверженных пород по Р. Дэли (1936)

| Описаны                        | Гранит (546) * | Сленит (50) | Гранодиорит (40) | Кварцевый диорит (55) | Диорит (70) | Габбро (85) | Оливиновый диабаз (12) | Диабаз (90) | Дунит (10) | Верлит, перидотит несвежий (5) | Лерцолит, перидотит (13) | Плагиобазальт (33) | Среднее для кристаллического комплекса (сильный) (Финляндия) | Средний для гранита (Финляндия) |
|--------------------------------|----------------|-------------|------------------|-----------------------|-------------|-------------|------------------------|-------------|------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------|--|---------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 70,18          | 60,19       | 65,05            | 61,59                 | 56,77       | 48,84       | 48,54                  | 50,48       | 40,49      | 45,07                          | 43,95                    | 48,80              | 67,70  | 69,42                           |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,39           | 0,67        | 0,56             | 0,66                  | 0,84        | 0,97        | 1,31                   | 1,45        | 0,02       | 0,64                           | 0,10                     | 2,19               | 0,41   | 0,39                            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14,47          | 16,28       | 15,94            | 16,21                 | 16,67       | 17,88       | 15,24                  | 15,34       | 0,86       | 5,75                           | 4,82                     | 13,98              | 14,69  | 14,70                           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,57           | 2,74        | 1,74             | 2,54                  | 3,16        | 3,16        | 3,06                   | 3,84        | 2,84       | 3,43                           | 2,20                     | 3,59               | 1,27   | 1,08                            |
| FeO                            | 1,78           | 3,28        | 2,65             | 3,77                  | 4,40        | 5,95        | 8,88                   | 7,78        | 5,54       | 9,53                           | 6,34                     | 9,78               | 3,14   | 2,49                            |
| MnO                            | 0,12           | 0,14        | 0,07             | 0,10                  | 0,13        | 0,13        | 0,21                   | 0,20        | 0,16       | 0,26                           | 0,19                     | 0,17               | 0,04   | 0,03                            |
| MgO                            | 0,88           | 2,49        | 1,91             | 2,80                  | 4,17        | 7,51        | 8,08                   | 5,79        | 46,32      | 22,88                          | 36,81                    | 6,70               | 1,69   | 2,02                            |
| CaO                            | 1,99           | 4,30        | 4,42             | 5,38                  | 6,74        | 10,99       | 9,38                   | 8,94        | 0,70       | 7,48                           | 3,57                     | 9,38               | 3,40   | 1,44                            |
| Na <sub>2</sub> O              | 3,48           | 3,98        | 3,70             | 3,37                  | 3,39        | 2,55        | 2,69                   | 3,07        | 0,10       | 1,14                           | 0,63                     | 2,59               | 3,07   | 3,24                            |
| K <sub>2</sub> O               | 4,11           | 4,49        | 2,75             | 2,10                  | 2,12        | 0,89        | 0,97                   | 0,97        | 0,04       | 0,57                           | 0,21                     | 0,69               | 3,56   | 4,46                            |
| H <sub>2</sub> O               | 0,84           | 1,16        | 1,04             | 1,22                  | 1,36        | 1,45        | 1,35                   | 1,89        | 2,88       | 3,10                           | 1,08                     | 1,80               | 0,79   | 0,66                            |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,19           | 0,28        | 0,20             | 0,26                  | 0,25        | 0,28        | 0,28                   | 0,25        | 0,05       | 0,15                           | 0,10                     | 0,33               | 0,11   | 0,07                            |

\* В скобках указано число анализов, из которых выведено среднее значение.

## Химический состав габбро

| Оксиды                         | Габбро (всобще) | Габбро без оливина | Норит без оливина | Оливино-вый норит | Тылант | Анортозит | Эвкрит | Оссипит |
|--------------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------|-----------|--------|---------|
| SiO <sub>2</sub>               | 48,24           | 49,50              | 46,49             | 50,39             | 45,09  | 50,40     | 48,05  | 47,82   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,97            | 0,84               | 0,17              | 1,43              | —      | 0,15      | 0,49   | 2,0     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17,88           | 18,00              | 17,73             | 16,06             | 10,81  | 28,30     | 15,35  | 19,99   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,16            | 2,80               | 3,66              | 2,43              | 5,83   | 1,06      | 1,86   | 2,10    |
| FeO                            | 5,95            | 5,80               | 6,17              | 7,86              | 7,94   | 1,12      | 7,53   | 6,48    |
| MnO                            | 0,13            | 0,12               | 0,17              | 0,17              | Следы  | 0,05      | 0,28   | Следы   |
| MgO                            | 7,51            | 6,62               | 8,86              | 8,08              | 13,47  | 1,25      | 12,53  | 4,94    |
| CaO                            | 10,99           | 10,64              | 11,48             | 9,20              | 15,21  | 12,46     | 11,02  | 11,65   |
| Na <sub>2</sub> O              | 2,55            | 2,82               | 2,16              | 2,61              | 1,39   | 3,67      | 1,26   | 3,51    |
| K <sub>2</sub> O               | 0,89            | 0,98               | 0,78              | 0,79              | 0,16   | 0,74      | 0,19   | 0,67    |
| H <sub>2</sub> O               | 1,45            | 1,60               | 1,04              | 0,79              | 0,46   | 0,75      | 0,60   | 0,28    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,28            | 0,28               | 0,29              | 0,20              | —      | 0,05      | —      | 0,56    |

## Химический состав трапцовой формации и жильных пород габбро-базальтовой группы

| Оксиды                         | Сибирский трапп (среднее) | Долериты Карру (среднее) | Диабаз (среднее) | Диабаз с микрогематитом | Оливиновое габбро | Одинит | Микрогаббро беембаит | Гаренатит | Исилт | Диабаз (геохимический стандарт) |
|--------------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------|-------------------------|-------------------|--------|----------------------|-----------|-------|---------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 48,58                     | 52,51                    | 50,48            | 50,42                   | 49,88             | 46,69  | 46,29                | 42,80     | 37,80 | 52,46                           |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,23                      | 1,07                     | 1,45             | 2,25                    | 1,19              | 0,91   | 1,21                 | —         | 1,27  | 1,07                            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25,88                     | 15,38                    | 15,34            | 13,35                   | 18,55             | 17,63  | 17,46                | 3,60      | 12,90 | 15,03                           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,80                      | 1,00                     | 3,84             | 3,92                    | 2,06              | 2,81   | 2,57                 | 5,69      | 7,09  | 1,41                            |
| FeO                            | 8,74                      | 9,17                     | 7,78             | 12,00                   | 8,37              | 5,78   | 9,87                 | 8,48      | 14,02 | 8,74                            |
| MnO                            | 0,13                      | 0,53                     | 0,20             | 0,35                    | 0,09              | 0,30   | —                    | —         | —     | 0,16                            |
| MgO                            | 6,48                      | 7,08                     | 5,79             | 3,99                    | 5,77              | 6,75   | 7,79                 | 24,60     | 7,12  | 6,62                            |
| CaO                            | 9,98                      | 10,60                    | 8,94             | 7,99                    | 9,70              | 9,32   | 12,04                | 11,41     | 15,02 | 10,96                           |
| Na <sub>2</sub> O              | 2,10                      | 1,52                     | 3,07             | 2,77                    | 2,59              | 4,91   | 2,21                 | 0,61      | 1,85  | 2,07                            |
| K <sub>2</sub> O               | 1,02                      | 0,87                     | 0,97             | 1,35                    | 0,68              | 1,49   | 0,16                 | 0,42      | 0,95  | 0,64                            |
| H <sub>2</sub> O               | 1,98                      | —                        | 1,89             | 1,04                    | 1,04              | 1,97   | 0,51                 | 1,80      | 2,46  | 0,69                            |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,10                      | 0,27                     | 0,25             | 0,15                    | 0,16              | 0,97   | —                    | —         | —     | 0,14                            |
| CO <sub>2</sub>                | —                         | —                        | —                | —                       | —                 | —      | —                    | —         | —     | 0,05                            |

## Химический состав горных пород базальтовой группы

| Окислы                         | Все базальты | Базальты | Додециты | Мелалфиты | Плагио-<br>зальт | Базальт<br>Деканского<br>плато | Кварцевый<br>базальт |
|--------------------------------|--------------|----------|----------|-----------|------------------|--------------------------------|----------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 49,06        | 48,78    | 49,94    | 50,60     | 48,80            | 50,18                          | 55,46                |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,36         | 1,39     | 1,57     | 0,68      | 2,19             | 2,20                           | 0,88                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15,70        | 15,85    | 14,50    | 17,40     | 13,98            | 13,70                          | 16,85                |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,38         | 5,37     | 3,74     | 4,57      | 3,59             | 3,72                           | 2,13                 |
| FeO                            | 6,37         | 6,34     | 8,01     | 6,29      | 9,78             | 9,08                           | 4,86                 |
| MnO                            | 0,31         | 0,29     | 0,33     | 0,46      | 0,17             | 0,21                           | 0,22                 |
| MgO                            | 6,17         | 6,03     | 6,93     | 4,89      | 6,70             | 6,58                           | 6,31                 |
| CaO                            | 8,95         | 8,91     | 9,71     | 8,09      | 9,38             | 11,44                          | 7,86                 |
| Na <sub>2</sub> O              | 3,11         | 3,18     | 2,65     | 3,23      | 2,59             | 1,70                           | 3,30                 |
| K <sub>2</sub> O               | 1,52         | 1,63     | 0,97     | 1,76      | 0,69             | 0,73                           | 1,40                 |
| H <sub>2</sub> O               | 1,62         | 1,76     | 1,28     | 1,83      | 1,80             | —                              | 0,58                 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,45         | 0,47     | 0,37     | 0,20      | 0,33             | —                              | 0,15                 |

Продолжение табл. 57

| Окислы                         | Сакалавит | Базальт Га-<br>вайских<br>островов<br>(среднее) | Оксанит | Анкармит | Тулейский<br>платобазальт | Непорфи-<br>ровый<br>базальт<br>(среднее) | Порфировый<br>тип базальта | Спилит |
|--------------------------------|-----------|---|---------|----------|---------------------------|---|----------------------------|--------|
| SiO <sub>2</sub>               | 50,74     | 50,29   | 45,6    | 43,82    | 48,33                     | 51,94                                     | 47,78                      | 48,78  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,71      | 3,03  | 1,7     | 3,32     | 2,76                      | 2,01                                      | 0,93                       | 1,77   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12,89     | 12,92   | 8,3     | 8,81     | 14,14                     | 13,55                                     | 21,70                      | 14,58  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,97      | 1,48  | 2,3     | 3,08     | 3,65                      | 4,05                                      | 3,30                       | 1,89   |
| FeO                            | 7,49      | 9,77  | 10,2    | 8,01     | 9,55                      | 9,16                                      | 4,85                       | 7,65   |
| MnO                            | —         | 0,14  | 0,1     | —        | 0,22                      | 0,31                                      | 0,22                       | 0,46   |
| MgO                            | 4,74      | 8,07  | 21,7    | 15,50    | 6,94                      | 5,12                                      | 5,48                       | 6,36   |
| CaO                            | 9,42      | 10,84   | 7,5     | 13,50    | 10,00                     | 9,52                                      | 13,10                      | 9,80   |
| Na <sub>2</sub> O              | 2,48      | 2,26  | 1,3     | 1,51     | 2,94                      | 2,76                                      | 2,09                       | 4,02   |
| K <sub>2</sub> O               | 1,04      | 0,46  | 0,4     | 0,81     | 1,03                      | 1,28                                      | 0,40                       | 0,43   |
| H <sub>2</sub> O               | 1,96      | 0,38  | 0,6     | 1,17     | —                         | —   | —                          | 2,93   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,19      | 0,36  | 0,3     | 0,41     | 0,44                      | 0,30                                      | 0,15                       | 0,19   |

Таблица 58

## Химический состав диоритов по Р. Дэли (1936)

| Окислы                         | Диорит       |           | Окислы                        | Диорит       |           |
|--------------------------------|--------------|-----------|-------------------------------|--------------|-----------|
|                                | Бескварцевый | Кварцевый |                               | Бескварцевый | Кварцевый |
| SiO <sub>2</sub>               | 56,77        | 61,59     | MgO                           | 4,17         | 2,80      |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,84         | 0,66      | CaO                           | 6,74         | 5,38      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16,67        | 16,21     | Na <sub>2</sub> O             | 3,39         | 3,37      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,16         | 2,54      | K <sub>2</sub> O              | 2,12         | 2,10      |
| FeO                            | 4,40         | 3,77      | H <sub>2</sub> O              | 1,36         | 1,22      |
| MnO                            | 0,13         | 0,10      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 0,25         | 0,26      |

Таблица 59

## Химический состав лампрофировых жильных диоритовых пород

| Окислы                         | Керсантит<br>(среднее) | Малахит | Спессартит<br>(среднее) | Одинит |
|--------------------------------|------------------------|---------|-------------------------|--------|
| SiO <sub>2</sub>               | 50,79                  | 56,22   | 53,52                   | 46,69  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,02                   | 1,19    | 1,24                    | 0,91   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15,26                  | 17,59   | 14,57                   | 17,63  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,29                   | 2,78    | 3,52                    | 2,81   |
| FeO                            | 5,54                   | 5,05    | 5,29                    | 5,78   |
| MnO                            | 0,07                   | —       | 0,38                    | 0,30   |
| MgO                            | 6,33                   | 3,96    | 6,60                    | 6,75   |
| CaO                            | 5,73                   | 6,47    | 7,03                    | 9,32   |
| Na <sub>2</sub> O              | 3,12                   | 3,68    | 3,48                    | 4,91   |
| K <sub>2</sub> O               | 2,79                   | 1,33    | 2,28                    | 1,49   |
| H <sub>2</sub> O               | 5,71                   | 0,95    | 1,75                    | 1,97   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,35                   | 0,11    | 0,34                    | 0,97   |

Таблица 60

## Химический состав андезитов по Р. Дэли (1936)

| Окислы                         | Андезиты<br>(вообще) | Авгитовые<br>андезиты | Гиперсте-<br>новые<br>андезиты | Роговооб-<br>мажные<br>андезиты | Слюдавые<br>андезиты |
|--------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 59,59                | 57,50                 | 59,48                          | 61,12                           | 62,25                |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,77                 | 0,79                  | 0,48                           | 0,42                            | 1,65                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17,31                | 17,33                 | 17,38                          | 17,65                           | 16,10                |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,33                 | 3,78                  | 2,96                           | 2,89                            | 3,62                 |
| FeO                            | 3,13                 | 3,62                  | 3,67                           | 3,40                            | 2,20                 |
| MnO                            | 0,18                 | 0,22                  | 0,15                           | 0,15                            | 0,21                 |
| MgO                            | 2,75                 | 2,86                  | 3,28                           | 2,44                            | 2,03                 |
| CaO                            | 5,80                 | 5,83                  | 6,61                           | 5,80                            | 4,05                 |
| Na <sub>2</sub> O              | 3,53                 | 3,53                  | 3,41                           | 3,83                            | 3,55                 |
| K <sub>2</sub> O               | 2,03                 | 2,36                  | 1,64                           | 1,72                            | 2,44                 |
| H <sub>2</sub> O               | 1,26                 | 1,88                  | 0,74                           | 1,43                            | 1,50                 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,26                 | 0,30                  | 0,20                           | 0,15                            | 0,40                 |

Таблица 61

## Химический состав гранитов и гранодиоритов

| Окислы                         | Щелочно-<br>земельные<br>граниты | Щелочные<br>граниты | Грано-<br>диорит | Трондь-<br>мит | Кварце-<br>вый ди-<br>орит | Стандарт-<br>ный гра-<br>нит G-1 |
|--------------------------------|----------------------------------|---------------------|------------------|----------------|----------------------------|----------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 69,21                            | 73,30               | 65,01            | 69,30          | 61,59                      | 72,41                            |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,41                             | 0,11                | 0,57             | 0,23           | 0,66                       | 0,26                             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14,41                            | 12,33               | 15,94            | 16,81          | 16,21                      | 14,27                            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,98                             | 2,58                | 1,74             | 0,28           | 2,54                       | 0,87                             |
| FeO                            | 1,67                             | 1,28                | 2,65             | 1,26           | 3,77                       | 0,98                             |
| MnO                            | 0,12                             | 0,02                | 0,07             | —              | 0,10                       | 0,03                             |
| MgO                            | 1,15                             | 0,26                | 1,91             | 1,08           | 2,80                       | 0,41                             |
| CaO                            | 2,19                             | 0,46                | 4,42             | 3,34           | 5,38                       | 1,39                             |

| Окислы                        | Щелочно-земельные граниты | Щелочные граниты | Гранодиорит | Трондьемит | Кварцевый диорит | Стандартный гранит G-1 |
|-------------------------------|---------------------------|------------------|-------------|------------|------------------|------------------------|
| Na <sub>2</sub> O             | 3,48                      | 4,55             | 3,70        | 6,00       | 3,37             | 3,32                   |
| K <sub>2</sub> O              | 4,23                      | 4,20             | 2,75        | 1,39       | 2,10             | 5,45                   |
| H <sub>2</sub> O              | 0,85                      | 0,86             | 1,04        | 0,50       | 1,22             | 0,40                   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 0,30                      | 0,05             | 0,80        | 0,03       | 0,26             | 0,09                   |
| CO <sub>2</sub>               | —                         | —                | —           | —          | —                | 0,08                   |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> | —                         | —                | —           | —          | —                | 0,34                   |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup> | —                         | —                | —           | —          | —                | 0,06                   |

Таблица 62

## Химический состав жильных гранитных пород по Р. Дэли (1936)

| Окислы                         | Гранитовый аплит |         |          | Пэзанит                       |                  |         | Грорудит |  |  |
|--------------------------------|------------------|---------|----------|-------------------------------|------------------|---------|----------|--|--|
|                                | Гранитовый аплит | Пэзанит | Грорудит | Окислы                        | Гранитовый аплит | Пэзанит | Грорудит |  |  |
| SiO <sub>2</sub>               | 75,00            | 73,32   | 70,91    | MgO                           | 0,30             | 0,14    | 0,11     |  |  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,30             | 0,20    | 0,48     | CaO                           | 1,13             | 0,42    | 0,39     |  |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13,14            | 12,36   | 11,50    | Na <sub>2</sub> O             | 3,54             | 4,70    | 4,08     |  |  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,58             | 1,80    | 4,48     | K <sub>2</sub> O              | 4,80             | 4,71    | 4,08     |  |  |
| FeO                            | 0,40             | 1,66    | 1,88     | H <sub>2</sub> O              | 0,71             | 0,58    | 0,25     |  |  |
| MnO                            | 0,07             | 0,08    | 0,39     | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 0,03             | 0,03    | —        |  |  |

Таблица 63

## Химический состав кислых эффузивных изверженных пород по Р. Дэли (1936)

| Окислы                         | Риолиты и лавариты | Кварцевые порфиры | Комендит | Кварцевый кератофир | Пантеллерит | Кварцевый латит | Дацит |
|--------------------------------|--------------------|-------------------|----------|---------------------|-------------|-----------------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 72,80              | 72,36             | 73,51    | 75,45               | 68,63       | 62,43           | 65,68 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,33               | 0,33              | 0,29     | 0,17                | 0,35        | 0,85            | 0,57  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13,49              | 14,17             | 11,43    | 13,11               | 10,30       | 16,15           | 16,25 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,45               | 1,55              | 2,97     | 1,14                | 5,60        | 4,04            | 2,38  |
| FeO                            | 0,88               | 1,01              | 1,08     | 0,66                | 2,61        | 1,20            | 1,90  |
| MnO                            | 0,08               | 0,09              | 0,04     | 0,29                | 0,21        | 0,09            | 0,06  |
| MgO                            | 0,38               | 0,52              | 0,16     | 0,34                | 0,37        | 1,74            | 1,41  |
| CaO                            | 1,20               | 1,38              | 0,28     | 0,83                | 1,07        | 4,24            | 3,46  |
| Na <sub>2</sub> O              | 3,38               | 2,85              | 4,65     | 5,88                | 6,14        | 3,34            | 3,97  |
| K <sub>2</sub> O               | 4,46               | 4,56              | 4,53     | 1,26                | 4,17        | 3,75            | 2,67  |
| H <sub>2</sub> O               | 1,47               | 1,09              | 1,02     | 0,69                | 0,53        | 1,90            | 1,50  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,08               | 0,09              | 0,04     | 0,18                | 0,02        | 0,27            | 0,15  |

Химический состав сиенитов по Р. Дэли (1936)

| Окислы                         | Роговообманковый сиенит известково-щелочный | Слюдяной сиенит известково-щелочный | Авгитовый сиенит известково-щелочный | Сиенит известково-щелочный (вообще) | Нордмарит | Пуласит | Умтеит | Асегит | Дарвинит | Моноцит |
|--------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------|---------|--------|--------|----------|---------|
| SiO <sub>2</sub>               | 60,79                                       | 59,25                               | 51,59                                | 58,65                               | 64,36     | 61,58   | 61,96  | 62,00  | 57,45    | 56,12   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,80  | 0,79                                | 0,61                                 | 0,86                                | 0,45      | 0,33    | 0,99   | 0,57   | —        | 1,10    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16,10                                       | 15,28                               | 18,77                                | 16,38                               | 16,81     | 18,37   | 17,07  | 17,44  | 21,11    | 16,96   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,21  | 2,59                                | 6,11                                 | 3,65                                | 1,08      | 2,28    | 2,35   | 2,06   | 2,89     | 2,93    |
| FeO                            | 2,92  | 3,47                                | 3,26                                 | 3,09                                | 2,71      | 1,71    | 3,37   | 2,68   | 2,39     | 4,01    |
| MnO                            | 0,11  | —                                   | 0,24                                 | 0,15                                | 0,15      | 0,11    | 0,09   | 0,12   | —        | 0,16    |
| MgO                            | 2,20  | 5,07                                | 4,11                                 | 3,06                                | 0,72      | 0,69    | 1,38   | 0,91   | 1,06     | 3,27    |
| CaO                            | 3,87  | 3,68                                | 7,35                                 | 4,45                                | 1,55      | 1,77    | 3,41   | 2,26   | 4,10     | 6,50    |
| Na <sub>2</sub> O              | 3,37  | 3,10                                | 4,35                                 | 3,48                                | 5,76      | 6,45    | 4,65   | 5,86   | 5,89     | 3,67    |
| K <sub>2</sub> O               | 5,43  | 4,41                                | 2,99                                 | 4,79                                | 5,62      | 5,70    | 3,80   | 5,17   | 3,87     | 3,76    |
| H <sub>2</sub> O               | 0,90  | 2,06                                | 0,26                                 | 1,13                                | 0,70      | 0,80    | 0,93   | 0,79   | 0,70     | 1,05    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,30  | 0,30                                | 0,36                                 | 0,31                                | 0,09      | 0,21    | —      | 0,17   | 0,54     | 0,47    |

Таблица 65

Химический состав жильных пород сиенитовой группы

| Окислы                         | Востонит (среднее) | Сельсберит (среднее) | Гаутенит | Минетта (среднее) | Нагровая минетта | Проверсит | Вогезит (среднее) | Дурбахит |
|--------------------------------|--------------------|----------------------|----------|-------------------|------------------|-----------|-------------------|----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 61,32              | 62,16                | 54,15    | 49,45             | 51,95            | 50,41     | 52,62             | 51,05    |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,89               | 0,31                 | —        | 1,23              | 1,95             | 1,47      | 0,54              | 1,76     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 18,43              | 17,58                | 18,25    | 14,41             | 14,95            | 12,30     | 14,84             | 14,49    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,84               | 3,05                 | 3,68     | 3,39              | 4,05             | 5,71      | 3,60              | 4,16     |
| FeO                            | 1,60               | 1,80                 | 2,09     | 5,01              | 5,70             | 3,06      | 4,18              | 4,37     |
| MnO                            | 0,01               | 0,18                 | —        | 0,13              | 0,30             | 0,15      | 0,84              | —        |
| MgO                            | 0,46               | 0,48                 | 2,56     | 8,26              | 3,54             | 8,69      | 8,55              | 8,16     |
| CaO                            | 1,45               | 1,11                 | 4,89     | 6,73              | 6,10             | 7,08      | 5,86              | 5,11     |
| Na <sub>2</sub> O              | 5,75               | 7,30                 | 4,43     | 2,54              | 5,43             | 0,97      | 3,21              | 1,85     |
| K <sub>2</sub> O               | 4,95               | 4,95                 | 6,56     | 4,69              | 4,45             | 7,53      | 2,83              | 7,24     |
| H <sub>2</sub> O               | 1,31               | 1,04                 | 3,69     | 3,04              | 1,10             | 2,26      | 2,70              | 1,05     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | —                  | 0,04                 | 0,41     | 1,12              | 1,15             | 0,46      | 0,21              | 0,70     |

Таблица 66

Химический состав трахитов и родственных им пород по Р. Дэли (1936)

| Окислы                         | Трахит | Трахит известково-щелочный | Трахит щелочный | Кератофир | Ромбенпорфир | Латит | Трахандезит | Бавакит |
|--------------------------------|--------|----------------------------|-----------------|-----------|--------------|-------|-------------|---------|
| SiO <sub>2</sub>               | 60,68  | 63,91                      | 62,63           | 61,51     | 56,36        | 57,65 | 57,84       | 52,04   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,38   | 0,59                       | 0,62            | 0,45      | 0,48         | 1,00  | 1,11        | 0,76    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17,74  | 15,88                      | 17,06           | 17,37     | 20,10        | 16,68 | 17,24       | 17,65   |

| Окислы                         | Трахит | Трахит известково-щелочный | Трахит щелочный | Кератофир | Ромбенпорфир | Латит | Трахитандезит | Банакит |
|--------------------------------|--------|----------------------------|-----------------|-----------|--------------|-------|---------------|---------|
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,64   | 3,22                       | 3,01            | 1,92      | 2,86         | 2,29  | 3,97          | 4,66    |
| FeO                            | 2,62   | 2,23                       | 1,98            | 3,35      | 2,01         | 4,07  | 3,18          | 2,75    |
| MnO                            | 0,06   | 0,01                       | 0,13            | 0,01      | 0,01         | 0,10  | 0,05          | 0,13    |
| MgO                            | 1,12   | 1,14                       | 0,63            | 1,26      | 1,15         | 3,22  | 1,25          | 3,33    |
| CaO                            | 3,09   | 2,81                       | 1,51            | 1,08      | 2,73         | 5,74  | 4,20          | 5,11    |
| Na <sub>2</sub> O              | 4,43   | 3,08                       | 6,26            | 5,23      | 7,65         | 3,59  | 5,67          | 4,10    |
| K <sub>2</sub> O               | 5,74   | 5,80                       | 5,37            | 5,29      | 4,97         | 4,39  | 3,62          | 5,03    |
| H <sub>2</sub> O               | 1,26   | 1,28                       | 0,71            | 2,45      | 1,20         | 0,91  | 1,30          | 3,74    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,24   | 0,05                       | 0,09            | 0,08      | 0,48         | 0,36  | 0,57          | 0,70    |

Таблица 67

## Химический состав жильных пород группы нефелиновых сиенитов

| Окислы                         | Нефелиновый аплит | Тингуаит (среднее) | Тингуаит из Сьерра-де-Тингуа | Лейцитовый тингуаит Магнет-Ков | Нефелиновый ромбенпорфир | Суссекит | Берешит |
|--------------------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------|---------|
| SiO <sub>2</sub>               | 54,92             | 55,02              | 53,10                        | 52,91                          | 56,04                    | 45,18    | 47,25   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,43              | 0,36               | —                            | —                              | 0,65                     | —        | 0,56    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20,81             | 20,42              | 19,07                        | 19,49                          | 21,50                    | 23,31    | 23,66   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,28              | 3,06               | 5,57                         | 4,78                           | 1,06                     | 6,11     | 4,79    |
| FeO                            | 1,36              | 1,82               | —                            | 3,08                           | 3,28                     | —        | 3,28    |
| MnO                            | —                 | 0,22               | —                            | 0,44                           | —                        | —        | 0,20    |
| MgO                            | 0,37              | 0,59               | 0,17                         | 0,29                           | 1,12                     | 1,45     | 0,80    |
| CaO                            | 0,95              | 1,67               | 1,33                         | 2,47                           | 2,42                     | 4,62     | 4,30    |
| Na <sub>2</sub> O              | 8,95              | 8,63               | 9,41                         | 7,13                           | 8,39                     | 11,17    | 8,94    |
| K <sub>2</sub> O               | 7,26              | 5,38               | 6,84                         | 7,88                           | 5,03                     | 5,95     | 2,60    |
| H <sub>2</sub> O               | 1,34              | 2,77               | 3,98                         | 1,19                           | 0,67                     | 1,14     | 4,18    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | —                 | 0,06               | —                            | —                              | —                        | —        | —       |

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Химический состав осадочных пород выражается в окислах отдельных компонентов. Состав важнейших типов осадочных пород, а также пелагических осадков приводится в табл. 68—76.

Сравнение химического состава горных пород

| Компоненты                     | По Ф. Кларку (Clarke, 1924) |           |          |            |                           | По Суйковскому (Sujkowski, 1952) |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------|----------|------------|---------------------------|----------------------------------|
|                                | Изверженные (в среднем)     | Глинистые | Песчаные | Известняки | Все осадочные (в среднем) | Все осадочные (в среднем)        |
| SiO <sub>2</sub>               | 59,44                       | 58,40     | 78,33    | 5,19       | 57,95                     | 59,17                            |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,05                        | 0,65      | 0,25     | 0,06       | 0,57                      | 0,77                             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15,34                       | 15,40     | 4,77     | 0,81       | 13,39                     | 14,47                            |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | —                           | —         | —        | —          | —                         | 0,03                             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,08                        | 4,02      | 1,07     | 0,54       | 3,47                      | 6,32                             |
| FeO                            | 3,80                        | 2,45      | 0,30     | —          | 2,08                      | 0,99                             |
| NiO                            | —                           | —         | —        | —          | —                         | 0,02                             |
| MnO                            | —                           | —         | —        | —          | —                         | 0,80                             |
| MgO                            | 3,49                        | 2,44      | 1,16     | 7,89       | 2,65                      | 1,85                             |
| CaO                            | 5,08                        | 3,11      | 5,50     | 42,57      | 5,89                      | 9,90                             |
| BaO                            | 0,06                        | 0,05      | 0,05     | 1,13       | 1,0                       | 0,12                             |
| SrO                            | —                           | —         | —        | —          | —                         | 0,04                             |
| Na <sub>2</sub> O              | 3,84                        | 1,30      | 0,45     | 0,05       | 1,13                      | 1,76                             |
| K <sub>2</sub> O               | 3,13                        | 3,24      | 1,31     | 0,33       | 2,86                      | 2,77                             |
| H <sub>2</sub> O               | 1,15                        | 5,00      | 1,63     | 0,77       | 3,23                      | —                                |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,30                        | 0,17      | 0,08     | 0,04       | 0,13                      | 0,22                             |
| ZrO <sub>2</sub>               | —                           | —         | —        | —          | —                         | —                                |
| CO <sub>2</sub>                | 0,10                        | 2,63      | 5,03     | 41,54      | 5,38                      | —                                |
| SO <sub>3</sub>                | —                           | 0,64      | 0,07     | 0,05       | 0,54                      | —                                |
| C                              | —                           | 0,80      | —        | —          | 0,66                      | —                                |

Таблица 69

Соотношение трех главных групп осадочных горных пород (в %)

| Автор, год | Глинистые | Песчаные | Карбонатные |
|------------|-----------|----------|-------------|
|------------|-----------|----------|-------------|

Данные, полученные вычислениями

|                       |    |      |     |
|-----------------------|----|------|-----|
| К. Лиз и В. Мид, 1915 | 82 | 12   | 6   |
| У. Линдгрен, 1923     | 77 | 11,3 | 5,9 |
| Ф. Кларк, 1925        | 80 | 15   | 5   |
| А. Холмс, 1937        | 70 | 16   | 14  |
| Ф. Питтиджон, 1949    | 58 | 22   | 20  |

Данные, полученные при изучении разрезов

|                       |       |    |       |
|-----------------------|-------|----|-------|
| К. Лиз и В. Мид, 1915 | 46    | 32 | 22    |
| Ч. Шухерт, 1931       | 44    | 37 | 19    |
| Ф. Кюнел, 1941        | 56    | 14 | 29    |
| П. Крынин, 1943       | 40—42 | 40 | 15—18 |
| А. Б. Ронов, 1949     |       | 80 | 20    |

Примечание. Наиболее достоверные соотношения глинистых, песчаных и карбонатных пород 5 : 3 : 2 (Рухин, 1958).

Средний химический состав глинистых толщ Русской платформы  
по А. П. Виноградову, А. Б. Ронову (1956)

| Система, группа | Число проб<br>и анализов | Число образ-<br>цов в пробах | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | CaO   |
|-----------------|--------------------------|------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|
| Рифей           | 17                       | 765                          | 58,21            | 18,34                          | 8,37                           | 0,88             | 0,55  |
| Кембрий         | 14                       | 436                          | 60,36            | 17,83                          | 6,71                           | 0,84             | 0,83  |
| Ордовик         | 8                        | 198                          | 43,77            | 11,82                          | 5,25                           | 0,64             | 12,82 |
| Силур           | 6                        | 531                          | 49,58            | 12,62                          | 5,46                           | 0,60             | 8,99  |
| Девон           | 94                       | 2543                         | 47,34            | 15,00                          | 6,64                           | 0,87             | 8,69  |
| Карбон          | 36                       | 508                          | 52,45            | 17,24                          | 6,51                           | 0,84             | 4,32  |
| Пермь           | 28                       | 730                          | 42,97            | 11,45                          | 5,78                           | 0,57             | 12,94 |
| Палеозой        | 203                      | 5720                         | 49,38            | 15,21                          | 6,56                           | 0,80             | 7,41  |
| Триас           | 4                        | 121                          | 50,74            | 14,72                          | 6,12                           | 0,71             | 10,10 |
| Юра             | 16                       | 328                          | 55,12            | 16,55                          | 6,24                           | 0,77             | 4,78  |
| Мел             | 12                       | 255                          | 56,09            | 16,00                          | 5,90                           | 0,74             | 5,90  |
| Мезозой         | 32                       | 704                          | 54,94            | 16,11                          | 6,09                           | 0,75             | 5,81  |
| Третичная       | 12                       | 352                          | 57,10            | 11,59                          | 6,14                           | 0,59             | 7,25  |
| Четвертичная    | 5                        | 28                           | 59,65            | 13,54                          | 5,97                           | 0,67             | 4,93  |
| Кайнозой        | 17                       | 380                          | 57,85            | 12,16                          | 6,09                           | 0,62             | 6,57  |

## Продолжение табл. 70

| Система, группа | MgO  | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | CO <sub>2</sub> | П. п. п. | Сумма  |
|-----------------|------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------|--------|
| Рифей           | 2,26 | 3,96             | 0,76              | 0,11            | 1,17            | 5,65     | 100,26 |
| Кембрий         | 2,17 | 4,82             | 0,49              | 0,15            | 0,70            | 5,03     | 99,93  |
| Ордовик         | 3,40 | 3,40             | 3,95              | 0,16            | 11,13           | 6,21     | 99,94  |
| Силур           | 4,99 | 4,42             | 0,69              | 0,15            | 7,37            | 5,38     | 100,25 |
| Девон           | 3,58 | 3,61             | 0,59              | 1,05            | 7,23            | 5,50     | 100,10 |
| Карбон          | 2,92 | 3,87             | 0,63              | 0,31            | 4,12            | 7,04     | 100,32 |
| Пермь           | 5,67 | 2,71             | 1,30              | 1,55            | 11,34           | 3,90     | 100,18 |
| Палеозой        | 3,57 | 3,68             | 0,72              | 0,78            | 6,44            | 5,56     | 100,11 |
| Триас           | 3,68 | 2,29             | 1,03              | 0,09            | 7,42            | 3,73     | 100,63 |
| Юра             | 3,98 | 3,12             | 1,40              | 0,15            | 3,69            | 6,03     | 99,83  |
| Мел             | 1,80 | 2,42             | 1,28              | 0,17            | 4,40            | 5,60     | 99,99  |
| Мезозой         | 2,12 | 2,76             | 1,31              | 0,15            | 4,42            | 5,58     | 100,04 |
| Третичная       | 2,16 | 2,32             | 1,18              | 0,32            | 5,69            | 5,67     | 100,01 |
| Четвертичная    | 3,07 | 3,15             | 0,74              | 0,00            | 4,06            | 4,31     | 100,09 |
| Кайнозой        | 2,42 | 2,56             | 1,05              | 0,22            | 5,21            | 5,27     | 100,02 |

Химический состав аркозовых песчаников Приуралья  
(верхняя пермь) по Л. В. Пустовалову (1940)

| Компоненты                     | Аркозовый<br>песчаник | Аркозовый<br>песчаник с<br>известковым<br>цементом | Компоненты                           | Аркозовый<br>песчаник | Аркозовый<br>песчаник с<br>известковым<br>цементом |
|--------------------------------|-----------------------|--|--------------------------------------|-----------------------|--|
| SiO <sub>2</sub>               | 60,83                 | 51,78  | CaO                                  | 3,93                  | 19,04  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,46                  | 0,21   | MgO                                  | 2,28                  | 1,27   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13,63                 | 6,57   | SO <sub>3</sub>                      | 0,12                  | 0,32   |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,09                  | 0,10   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>        | 0,04                  | —  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,08                  | 2,27   | K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O | 1,54                  | 1,12   |
| FeO                            | 1,64                  |  |                                      |                       |  |
| MnO                            | 0,52                  | 0,75   | П. п. п.                             | 4,34                  | 16,57  |

Таблица 72

Химический состав кремнистых пород по Г. И. Бушинскому (1958)

| Компоненты                     | Диатомит пресноводный, неоген, с. Кислятиб, Грузинская ССР | Диатомит морской, палеоген, г. Сенгилей, Ульяновская область | Радолярит, о. Калимантан | Спонголит, олигоцен, Грузинская ССР | Трепел палевый, турон, Жиздра, Калужская область | Опока черная, турон, Калужская область | Яшма легочная, пос. Калиновка, Орск | Яшма сургуучная, пос. Калиновка, Орск | Яшма белая, пос. Калиновка, Орск | Кремень черный из писчего мела, Краматорск | Гейзерит, Камчатка |
|--------------------------------|--|--|--------------------------|-------------------------------------|--|--|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|--|--------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 95,23  | 85,26  | 94,90                    | 88,02                               | 81,31  | 88,92                                  | 63,55                               | 86,30                                 | 90,65                            | 96,88                                      | 91,63              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,82   | 4,40   | 2,31                     | 3,32                                | 3,83   | 4,28                                   | 7,40                                | 4,65                                  | 5,21                             | 0,44                                       | 1,34               |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,25   | 2,03   | 1,19                     | 2,08                                | 4,21   | 2,03                                   | 11,45                               | 6,15                                  | 2,92                             | 1,00                                       | 0,04               |
| FeO                            | —  | —  | —                        | —                                   | 0,16   | 0,50                                   | —                                   | —                                     | —                                | —  | —                  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,04   | 0,22   | 0,10                     | —                                   | 0,28   | 0,16                                   | —                                   | —                                     | —                                | —  | 0,02               |
| CaO                            | 0,79   | 1,40   | 0,30                     | 1,53                                | 1,10   | 0,43                                   | 8,38                                | 1,16                                  | 0,21                             | 0,36                                       | 1,33               |
| MgO                            | 0,16   | 0,50   | 0,30                     | 0,54                                | 0,84   | 0,44                                   | 0,26                                | 0,13                                  | 0,11                             | 0,20                                       | 0,03               |
| MnO                            | 0,01   | —  | —                        | —                                   | 0,03   | 0,05                                   | 7,73                                | Следы 0,70                            | —                                | —  | —                  |
| CuO                            | —  | —  | —                        | —                                   | —  | —                                      | 0,70                                | —                                     | —                                | —  | —                  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,11   | 0,21   | 0,50                     | —                                   | 0,31   | 0,26                                   | —                                   | —                                     | —                                | 0,03                                       | —                  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,05   | —  | —                        | —                                   | 0,07   | 0,08                                   | —                                   | —                                     | —                                | —  | 0,02               |
| CO <sub>2</sub>                | 0,15   | —  | —                        | —                                   | 0,59   | 0,21                                   | —                                   | —                                     | —                                | —  | 0,02               |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,12   | 0,16   | Следы                    | —                                   | 0,20   | 0,17                                   | —                                   | —                                     | —                                | —  | 0,02               |
| SO <sub>3</sub>                | 0,31   | 0,34   | —                        | 0,82                                | 0,15   | 0,08                                   | —                                   | —                                     | —                                | 0,03                                       | 0,02               |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 1,80   | 4,81   | 1,35                     | 3,02                                | 2,02   | 2,10                                   | 0,38                                | 0,61                                  | 0,33                             | 0,98                                       | 5,19               |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 1,07   | —  | —                        | —                                   | 0,96   | 0,73                                   | 0,25                                | 0,15                                  | 0,14                             | —  | 5,07               |

## Химический состав карбонатных пород по В. Н. Домниковскому (1958)

| Компоненты                          | Кальцит, теоретический состав | Средний состав известняков | Чистый известняк, нижний кембрий, Тува | Оолитовый известняк, палеоген, Фергана | Волорослевый известняк, палеоген, Фергана | Мел, кампан, Белгород | Доломит, теоретический состав | Доломит, кембрий, р. Юлама, Восточная Сибирь | Доломит известковистый, кембрий, р. Лена | Известняк доломитовый пермь, Поволжье |   |
|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--|--|---|-----------------------|-------------------------------|--|--|---------------------------------------|---|
| Нерастворимый остаток               | —                             | 5,19                       | —                                      | 2,40                                   | —   | —                     | —                             | —  | 1,26                                     | 1,95                                  |   |
| SiO <sub>2</sub>                    | —                             | 0,06                       | 1,24                                   | —                                      | 0,61                                      | 0,7                   | —                             | 0,70   | —  | —                                     |   |
| TiO <sub>2</sub>                    | —                             | 0,81                       | —                                      | —                                      | —   | —                     | —                             | —  | —  | —                                     |   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | —                             | 0,54                       | 0,65                                   | —                                      | —   | 0,2                   | —                             | 0,29   | 0,40                                     | 0,43                                  |   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | —                             |                            | 0,34                                   | —                                      | —   | 0,1                   | —                             | 0,30   |  |                                       |   |
| FeO                                 | —                             | —                          | —                                      | —                                      | —   | —                     | —                             | 0,41   | —  | —                                     |   |
| MnO                                 | —                             | 0,05                       | —                                      | —                                      | —   | —                     | —                             | Следы  | —  | —                                     |   |
| MgO                                 | —                             | 7,90                       | 1,74                                   | 0,29                                   | 2,69                                      | 0,2                   | 21,7                          | 21,06  | 14,30                                    | 11,43                                 |   |
| CaO                                 | 56,00                         | 42,61                      | —                                      | 52,49                                  | 48,45                                     | 55,5                  | 30,4                          | 30,34  | 38,34                                    | 40,03                                 |   |
| Na <sub>2</sub> O                   | —                             | 0,05                       | —                                      | —                                      | —   | —                     | }                             | 0,34   | —  | —                                     |   |
| K <sub>2</sub> O                    | —                             | 0,33                       | —                                      | —                                      | —   | —                     |                               | —  | —  | —                                     | — |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>       | —                             | 0,21                       | —                                      | —                                      | 0,28                                      | —                     |                               | —  | 0,03                                     | —                                     | — |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>       | —                             | 0,56                       | —                                      | —                                      | —   | —                     | —                             | —  | —  | —                                     |   |
| CO <sub>2</sub>                     | 44,00                         | 41,58                      | —                                      | —                                      | 42,01                                     | —                     | 47,9                          | 46,81  | 45,60                                    | —                                     |   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>       | —                             | 0,04                       | —                                      | —                                      | —   | —                     | —                             | —  | —  | —                                     |   |
| S                                   | —                             | 0,09                       | —                                      | —                                      | —   | —                     | —                             | —  | —  | —                                     |   |
| SO <sub>3</sub>                     | —                             | 0,05                       | —                                      | —                                      | —   | —                     | —                             | 0,17   | —  | 0,32                                  |   |
| Cl                                  | —                             | 0,02                       | —                                      | —                                      | —   | —                     | —                             | —  | —  | —                                     |   |
| CaCO <sub>3</sub>                   | —                             | 56,6                       | 92,4                                   | 92,92                                  | 79,82                                     | 98,8                  | 100,0                         | 0,90   | 33,58                                    | 42,35                                 |   |
| CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | —                             | 36,4                       | 8,0                                    | 1,31                                   | 12,29                                     | 0,9                   | —                             | 97,57  | 64,60                                    | 52,57                                 |   |

Таблица 74

## Химический состав медистых пород по В. С. Домареву (1958)

| Компоненты                     | Медистые сланцы, Мансфельд | Медистый песчанник, Мангышлак | Медистый аргиллит, Кугитанг | Медистые песчаники, Донбасс |          |               |
|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------|---------------|
|                                |                            |                               |                             | Горелый                     | Картамыш | Киселев бугор |
| SiO <sub>2</sub>               | 33,15                      | 50,81                         | 44,83                       | 68,57                       | 59,76    | 63,19         |
| TiO <sub>2</sub>               | —                          | 0,69                          | —                           | —                           | —        | —             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17,30                      | 13,66                         | 15,22                       | 9,35                        | 8,91     | 7,89          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | —                          | 0,41                          | 2,10                        | —                           | —        | —             |
| FeO                            | —                          | 6,86                          | 2,17                        | 3,78                        | 4,16     | 4,34          |
| Fe                             | 2,6                        | —                             | —                           | —                           | —        | —             |
| MnO                            | —                          | 0,25                          | 0,09                        | 1,42                        | 1,22     | 1,06          |

| Компоненты            | Медистые сланцы, Мансфельд | Медистый песчанник Мангышлак | Медистый аргиллит, Кугитан | Медистые песчаники, Донбасс |           |               |
|-----------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------|---------------|
|                       |                            |                              |                            | Горелый                     | Картамыш  | Киселев бугор |
| CaO                   | 10,4                       | 10,53                        | 6,08                       | 2,18                        | 6,64      | 5,84          |
| MgO                   | 1,0                        | 3,16                         | 10,29                      | 1,49                        | 1,86      | 1,32          |
| Na <sub>2</sub> O     | 1,0                        | 1,16                         | 0,62                       | —                           | —         | —             |
| K <sub>2</sub> O      | 3,0                        | 1,19                         | 3,36                       | —                           | —         | —             |
| CO <sub>2</sub>       | 9,24                       | —                            | 7,78                       | 4,72                        | 9,16      | 8,68          |
| H <sub>2</sub> O      | 1,7                        | 0,19                         | 1,94                       | 5,69                        | 4,87      | 6,24          |
| П. п.                 | —                          | 9,37                         | 4,77                       | —                           | —         | —             |
| Cu                    | 2,75                       | 1,22                         | —                          | 2,05                        | 1,73      | 2,56          |
| Co                    | 0,04                       | —                            | —                          | —                           | —         | —             |
| Pb                    | 1,5                        | —                            | —                          | —                           | —         | —             |
| Ag                    | 0,014                      | —                            | —                          | —                           | —         | —             |
| S                     | 2,31                       | —                            | —                          | —                           | —         | —             |
| SO <sub>3</sub>       | —                          | —                            | 0,10                       | —                           | 0,15—0,97 | —             |
| Органическое вещество | 5,7—11,3                   | —                            | 0,09                       | —                           | 2,40—7,49 | —             |

Таблица 75

**Химический состав основных типов пелагических осадков по С. К. Эл-Векил и Дж. П. Райли (1965)**

| Компоненты                     | Красная глина | Известковый ил | Кремнистый ил | Компоненты                           | Красная глина | Известковый ил | Кремнистый ил |
|--------------------------------|---------------|----------------|---------------|--------------------------------------|---------------|----------------|---------------|
|                                |               |                |               |                                      |               |                |               |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,96          | 0,25           | 0,59          | H <sub>2</sub> O                     | 6,30          | 3,31           | 6,33          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17,46         | 6,60           | 11,33         | CaCO <sub>3</sub>                    | 0,39          | 56,73          | 1,52          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8,53          | 2,43           | 3,40          | MgCO <sub>3</sub>                    | 0,44          | 1,78           | 1,21          |
| FeO                            | 0,45          | 0,64           | 1,42          | O <sub>2</sub> активный              | 0,11          | 0,050          | —             |
| MnO                            | 0,78          | 0,31           | 0,19          | Сорг                                 | 0,13          | 0,30           | 0,26          |
| CaO                            | 1,34          | 0,20           | 0,89          | Норг                                 | 0,016         | 0,017          | —             |
| MgO                            | 4,35          | 1,07           | 1,71          | Общая сумма                          | 100,20        | 100,17         | 100,10        |
| Na <sub>2</sub> O              | 1,27          | 0,75           | 1,64          | Общее Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9,02          | 3,14           | 4,98          |
| K <sub>2</sub> O               | 3,65          | 1,40           | 2,15          |                                      |               |                |               |

**ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРИРОДНЫХ ВОД**

Из огромного количества анализов природных вод здесь приведены наиболее существенные данные по крупным озерам, рекам, минеральным, почвенным и атмосферным водам (табл. 77—79).

Химический состав марганцевых конкреций (% по сухому весу)  
со дна Тихого и Атлантического океанов по Дж. Л. Меро (1965)

| Элемент  | Тихий океан, 54 образца |         |         | Атлантический океан, 4 образца |         |         |
|----------|-------------------------|---------|---------|--------------------------------|---------|---------|
|          | Максимум                | Минимум | Среднее | Максимум                       | Минимум | Среднее |
| B        | 0,06                    | 0,007   | 0,029   | 0,05                           | 0,009   | 0,03    |
| Na       | 4,7                     | 1,5     | 2,6     | 3,5                            | 1,4     | 2,3     |
| Mg       | 2,4                     | 1,0     | 1,7     | 2,4                            | 1,4     | 1,7     |
| Al       | 6,9                     | 0,8     | 2,9     | 5,8                            | 1,4     | 3,1     |
| Si       | 20,1                    | 1,3     | 9,4     | 19,6                           | 2,8     | 11,0    |
| K        | 3,1                     | 0,3     | 0,8     | 0,8                            | 0,6     | 0,7     |
| Ca       | 4,4                     | 0,8     | 1,9     | 3,4                            | 1,5     | 2,7     |
| Sc       | 0,003                   | 0,001   | 0,001   | 0,003                          | 0,002   | 0,002   |
| Ti       | 1,7                     | 0,11    | 0,67    | 1,3                            | 0,3     | 0,8     |
| V        | 0,11                    | 0,021   | 0,054   | 0,11                           | 0,02    | 0,07    |
| Cr       | 0,007                   | 0,001   | 0,001   | 0,003                          | 0,001   | 0,002   |
| Mn       | 50,1                    | 8,2     | 24,2    | 21,5                           | 12,0    | 16,3    |
| Fe       | 26,6                    | 2,4     | 14,0    | 25,9                           | 9,1     | 17,5    |
| Co       | 2,3                     | 0,014   | 0,35    | 0,68                           | 0,06    | 0,31    |
| Ni       | 2,0                     | 0,16    | 0,99    | 0,54                           | 0,31    | 0,42    |
| Cu       | 1,6                     | 0,028   | 0,53    | 0,41                           | 0,05    | 0,20    |
| Zn       | 0,08                    | 0,04    | 0,047   | —                              | —       | —       |
| Ga       | 0,003                   | 0,0002  | 0,001   | —                              | —       | —       |
| Sr       | 0,16                    | 0,024   | 0,081   | 0,14                           | 0,04    | 0,09    |
| Y        | 0,045                   | 0,033   | 0,016   | 0,024                          | 0,008   | 0,018   |
| Zr       | 0,12                    | 0,009   | 0,063   | 0,064                          | 0,044   | 0,054   |
| Mo       | 0,15                    | 0,01    | 0,052   | 0,056                          | 0,013   | 0,035   |
| Ag       | 0,0006                  | —       | 0,0003  | —                              | —       | —       |
| Ba       | 0,64                    | 0,08    | 0,18    | 0,36                           | 0,10    | 0,17    |
| La       | 0,024                   | 0,009   | 0,016   | —                              | —       | —       |
| Yb       | 0,0066                  | 0,0013  | 0,0031  | 0,007                          | 0,002   | 0,004   |
| Pb       | 0,36                    | 0,02    | 0,09    | 0,14                           | 0,08    | 0,10    |
| И. п. п. | 39,0                    | 15,5    | 25,8    | 30,0                           | 17,5    | 23,8    |

Таблица 77

## Химический состав минеральной части внутренних вод материков по Ф. Кларку

| Компоненты                           | Внутренние воды  |               |        |       |        | Среднее |
|--------------------------------------|------------------|---------------|--------|-------|--------|---------|
|                                      | Северной Америки | Южной Америки | Европы | Азии  | Африки |         |
| CO <sub>3</sub>                      | 33,40            | 32,48         | 39,98  | 36,61 | 32,75  | 35,15   |
| SO <sub>4</sub>                      | 15,31            | 8,04          | 11,97  | 13,03 | 8,67   | 12,14   |
| Cl                                   | 7,44             | 5,75          | 3,44   | 5,30  | 5,66   | 5,68    |
| NO <sub>3</sub>                      | 1,15             | 0,62          | 0,90   | 0,98  | 0,58   | 0,90    |
| Ca                                   | 19,36            | 18,92         | 23,19  | 21,23 | 19,00  | 20,39   |
| Mg                                   | 4,87             | 2,59          | 2,35   | 3,42  | 2,68   | 3,41    |
| Na                                   | 7,46             | 5,03          | 4,32   | 5,98  | 4,90   | 5,79    |
| K                                    | 1,77             | 1,95          | 2,75   | 1,98  | 2,35   | 2,12    |
| (Fe, Al) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,64             | 5,74          | 2,40   | 1,96  | 5,52   | 2,75    |
| SiO <sub>2</sub>                     | 8,60             | 18,88         | 8,70   | 9,51  | 17,89  | 11,67   |

Таблица 78

## Ионный состав материкового стока в океан по О. А. Алекину (1953)

|                                    | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na+K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Cl <sup>1-</sup> | Сумма |
|------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------|-------|
| мг/л                               | 13,9             | 3,3              | 6,1               | 47,6                           | 11,9                          | 6,4              | 89,2  |
| мг-экв/л                           | 0,694            | 0,271            | 0,244             | 0,78                           | 0,248                         | 0,181            | 2,418 |
| %-экв                              | 28,7             | 11,2             | 10,1              | 32,3                           | 10,2                          | 7,5              | 100   |
| Сухой остаток, %                   | 15,6             | 3,7              | 6,8               | 53,4                           | 13,3                          | 7,2              | 100   |
| Ежегодный вынос в океан,<br>млн. т | 494              | 117              | 217               | 1692                           | 423                           | 228              | 3171  |

Примечание. В речных водах отношение Na : K = 3

Таблица 79

## Химический состав воды некоторых крупных озер и рек по О. А. Алекину (1953)

| Источник воды            | мг/л             |                  |                   |                               |                               |                    |                      |
|--------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|
|                          | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na+K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Cl+Br <sup>-</sup> |                      |
| <b>Озера</b>             |                  |                  |                   |                               |                               |                    |                      |
| Байкал (глубина 1000 м)  | 15,2             | 4,2              | 6,1               | 59                            | 4,9                           | 15,8               |                      |
| Ладожское (поверхность)  | 7,1              | 1,9              | 8,6               | 40,2                          | 2,5                           | 7,7                |                      |
| Гурон                    | 24,1             | 7,03             | 4,43              | 51,1                          | 6,23                          | 2,61               |                      |
| Женевское                | 42,3             | 3,39             | 4,22              | 51,4                          | 40,5                          | 0,79               |                      |
| Иссык-Куль               | 114,0            | 294,0            | 1475,0            | 240,0                         | 2115,0                        | 1585               |                      |
| Мертвое море             | 9,09             | 25,52            | 25,94             | —                             | 0,49                          | 131,09             |                      |
| Кара-Богаз-Гол           | 0,29             | 19,9             | 81,2              | —                             | 46,9                          | 142,5              |                      |
| <b>Реки</b>              |                  |                  |                   |                               |                               |                    |                      |
| Амазонка (Обидос)        | 5,4              | 0,3              | 3,3               | 18,1                          | 0,8                           | 2,6                |                      |
| Миссисипи (Новый Орлеан) | 34,1             | 8,8              | 13,8              | 118,0                         | 25,6                          | 10,3               |                      |
| Днепр (с. Разумовка)     | 55,7             | 11,8             | 2,3               | 195,2                         | 12,9                          | 9,2                |                      |
| Волга (г. Вольск)        | 80,4             | 22,3             | 12,5              | 210,4                         | 112,3                         | 19,9               |                      |
| Лена (с. Кюсюр)          | 18,0             | 3,8              | 18,8              | 66,4                          | 21,2                          | 15,2               |                      |
| Енисей (г. Красноярск)   | 19,3             | 4,0              | 1,5               | 73,2                          | 4,0                           | 2,6                |                      |
| Источник воды            | % - экв          |                  |                   |                               |                               |                    | Сумма ионов,<br>мг/л |
|                          | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na+K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Cl+Br <sup>-</sup> |                      |
| <b>Озера</b>             |                  |                  |                   |                               |                               |                    |                      |
| Байкал (глубина 1000 м)  | 28,1             | 13,0             | 8,9               | 43,3                          | 4,5                           | 2,2                | 91,4                 |
| Ладожское (поверхность)  | 18,8             | 8,6              | 22,6              | 35,5                          | 4,7                           | 11,8               | 68,0                 |
| Гурон                    | 30,8             | 14,9             | 4,3               | 44,8                          | 3,4                           | 1,8                | 95,5                 |

| Источник воды            | %—экв            |                  |                                 |                               |                               |                                  | Сумма ионов<br>мг/л |
|--------------------------|------------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------|
|                          | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Cl <sup>-</sup> +Br <sup>-</sup> |                     |
| Женевское                | 41,1             | 5,4              | 3,5                             | 33,3                          | 16,3                          | 0,4                              | 142,6               |
| Иссык-Куль               | 3,1              | 13,0             | 33,9                            | 2,1                           | 23,8                          | 24,1                             | —                   |
| Мертвое море             | 6,3              | 29,0             | 14,7                            | —                             | 0,1                           | 49,9                             | —                   |
| Кара-Богаз-Гол           | 0,2              | 16,1             | 33,7                            | —                             | 9,8                           | 40,2                             | 280,8               |
| Р е к и                  |                  |                  |                                 |                               |                               |                                  |                     |
| Амазонка (Обидос)        | 26,0             | 39,9             | 20,1                            | 27,9                          | 15,4                          | 6,7                              | —                   |
| Миссисипи (Новый Орлеан) | 31,0             | 13,2             | 5,4                             | 35,5                          | 9,6                           | 5,3                              | 210,6               |
| Днепр (с. Разумовка)     | 36,4             | 12,6             | 1,3                             | 41,5                          | 5,1                           | 3,4                              | 287                 |
| Волга (г. Вольск)        | 31,7             | 14,4             | 3,9                             | 27,2                          | 18,4                          | 4,4                              | 458                 |
| Лена (с. Кюсюр)          | 22,9             | 7,9              | 19,2                            | 27,8                          | 11,2                          | 11,0                             | 143                 |
| Енисей (г. Красноярск)   | 35,5             | 12,2             | 2,3                             | 44,4                          | 3,0                           | 2,6                              | 104,6               |

### СОСТАВ НЕКОТОРЫХ ОРГАНИЗМОВ, ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ И ВУЛКАНИЧЕСКИХ ГАЗОВ

Основные данные, характеризующие состав живых организмов, горючих веществ и других природных образований, приведены в табл. 80—83.

Таблица 80

Элементарный состав (в вес. %) некоторых растений и организма человека  
(Bertrand, 1950; Hutchison, 1943)

| Копецода<br>( <i>Calanus finmarchicus</i> ) | Люцерна                   | Человек                  |
|---|---------------------------|--------------------------|
| O 79,99                                     | O 77,90                   | O 62,81                  |
| H 10,21                                     | C 11,34                   | C 19,37                  |
| C 6,10                                      | H 8,72                    | H 9,31                   |
| N 1,52                                      | N 8,25                    | N 5,14                   |
| Cl 1,05                                     |                           | Ca 1,38                  |
| Na 5,4 · 10 <sup>-1</sup>                   | P 7,06 · 10 <sup>-1</sup> | S 6,4 · 10 <sup>-1</sup> |
| K 2,9                                       | Ca 5,80                   | P 6,3                    |
| S 1,4                                       | K 1,70                    | Na 2,6                   |
| P 1,3                                       | S 1,037                   | K 2,2                    |
|   |                           | Cl 1,8                   |
| Ca 4 · 10 <sup>-2</sup>                     | Mg 8,2 · 10 <sup>-2</sup> | Mg 4 · 10 <sup>-2</sup>  |
| Mg 3  | Cl 7,0                    |                          |
| Fe 7 · 10 <sup>-3</sup>                     | Si 9,3 · 10 <sup>-3</sup> | Fe 5 · 10 <sup>-3</sup>  |
| Si 7  | Fe 2,7                    | Si 4                     |
|   | Al 2,5                    | Zn 2,5                   |
| Br 9 · 10 <sup>-4</sup>                     | B 7 · 10 <sup>-4</sup>    | Rb 9 · 10 <sup>-4</sup>  |
| I 2   | Rb 4,6                    | Cu 4                     |
|   | Mn 3,6                    | Br 2                     |
|   | Zn 3,5                    | Sn 2                     |

| Копепода<br>(Calanus finmarchians) | Люцерна   | Человек   |
|------------------------------------|---|---|
|                                    | Cu 2,5<br>F 1,5<br>Mo 1<br>Ti $9 \cdot 10^{-5}$<br>Ni 5<br>Br 5<br>Tl 4,6<br>V 1,6<br>I $2,5 \cdot 10^{-6}$<br>Co 2<br>H <sub>2</sub> O 75,1<br>Органическое вещество<br>22,45<br>Зола 2,45 | Mn 1<br>I 1<br>Al $5 \cdot 10^{-5}$<br>Pb 5<br>Mo 2<br>B 2<br>As $5 \cdot 10^{-6}$<br>Co 4<br>Li 3<br>V 2,6<br>Ni 2,5<br>H <sub>2</sub> O 60<br>Органическое вещество<br>35,7<br>Зола 4,3 |

Примечание. Содержание воды, органического вещества и золы даны в процентах.

Таблица 81

## Средний состав горючих веществ

|           | С     | Н    | N    | О     |
|-----------|-------|------|------|-------|
| Древесина | 49,65 | 6,23 | 0,92 | 43,20 |
| Торф      | 55,44 | 6,28 | 1,72 | 36,56 |
| Лигнит    | 72,95 | 5,24 | 1,31 | 20,50 |
| Уголь     | 84,24 | 5,55 | 1,52 | 8,69  |
| Антрацит  | 93,50 | 2,81 | 0,97 | 2,72  |

Таблица 82

Редкие элементы в золах углей (в г/т) по В. М. Гольдшмидту  
и К. Петерсу (1938)

| Элемент | Содержание   |         |               | Коэффициент обогащения |         |
|---------|--------------|---------|---------------|------------------------|---------|
|         | максимальное | среднее | в земной коре | максимальный           | средний |
| B       | 3 000        | 600     | 3             | 1000                   | 200     |
| Ge      | 11 000       | 500     | 7             | 1600                   | 70      |
| As      | 8 000        | 500     | 5             | 1600                   | 100     |
| Bi      | 200          | 20      | 0,2           | 1000                   | 100     |

| Элемент | Содержание   |         |               | Коэффициент обогащения |         |
|---------|--------------|---------|---------------|------------------------|---------|
|         | максимальное | среднее | в земной коре | максимальный           | средний |
| Be      | 1 000        | 300     | 5             | 180                    | 50      |
| Co      | 1 500        | 300     | 40            | 35                     | 8       |
| Ni      | 8 000        | 700     | 100           | 80                     | 7       |
| Zn      | 10 000       | 200     | 40            | 250                    | 5       |
| Cd      | 50           | 5       | 0,5           | 100                    | 10      |
| Pb      | 1 000        | 100     | 16            | 60                     | 6       |
| Ag      | 5—10         | 2       | 0,1           | 50—100                 | 20      |
| Au      | 0,2—0,5      | —       | 0,005         | 40—100                 | —       |
| Pt      | 0,7          | —       | 0,005         | 120                    | —       |
| Li      | 500          | —       | 65            | 8                      | —       |
| Se      | 400          | 60      | 5             | 80                     | 3—12    |
| Ga      | 400          | 100     | 15            | 27                     | 7       |
| I       | 800          | 100     | 31            | 26                     | 3       |
| Zr      | 5 000        | —       | 190           | 26                     | —       |
| Mo      | 500          | 200     | 15            | 33                     | 15      |
| In      | 2            | —       | 0,1           | 13                     | —       |
| Sn      | 500          | 200     | 40            | 13                     | 5       |
| Tl      | 5            | 1       | 0,3           | 17                     | —       |

Таблица 83

## Состав вулканических газов Килауэа (Shepherd, 1938)

| Компоненты       | Содержание<br>(при $t=1200^{\circ}\text{C}$ ,<br>$p=760$ мм рт. ст.),<br>объемн. % | Среднее<br>содержание |        | Компоненты      | Содержание<br>(при $t=1200^{\circ}\text{C}$ ,<br>$p=760$ мм рт. ст.),<br>объемн. % | Среднее<br>содержание |        |
|------------------|--|-----------------------|--------|-----------------|--|-----------------------|--------|
|                  |  | объемн.<br>%          | вес. % |                 |  | объемн.<br>%          | вес. % |
| H <sub>2</sub> O | 17.97—97.09  | 67.68                 | 45.12  | Ar              | 0.00—0.56  | 0.20                  | 0.30   |
| CO <sub>2</sub>  | 1.42—47.68   | 12.71                 | 20.71  | SO <sub>2</sub> | 0.00—29.83   | 7.03                  | 16.67  |
| CO               | 0.00—3.92  | 0.67                  | 0.69   | S <sub>2</sub>  | 0.00—8.61  | 1.04                  | 2.47   |
| H <sub>2</sub>   | 0.00—4.22  | 0.75                  | 0.06   | SO <sub>3</sub> | 0.00—5.51  | 1.86                  | 5.51   |
| N <sub>2</sub>   | 0.68—37.84   | 7.65                  | 7.93   | Cl <sub>2</sub> | 0.00—4.08  | 0.41                  | 0.54   |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексин О. А. Основы гидрохимии. Л., Гидрометеиздат, 1953, с. 296.  
 Барт Т. Теоретическая петрология. М., Изд-во иностр. лит. 1956, с. 414.  
 Бчицкий Г. И. Вокситы. — В кн.: Справочное руководство по петрографии осадочных пород. Т. 2, М., 1958, с. 203—214.  
 Видулова М. Ф. Глинястые породы. — В кн.: Справочное руководство по петрографии осадочных пород. Т. 2, М., 1958, с. 155—180.  
 Виноградов А. П. и Ронов А. Б. Эволюция химического состава глин Русской платформы. — «Геохимия», 1956, № 2, с. 3—19.  
 Виноградов А. П. Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-16». — «Геохимия», 1971, № 3, с. 268—273.  
 Виноградов А. П. Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-20». — «Геохимия», 1972, № 7, с. 763—774.  
 Гольдшмидт В. М. и Петерс К. О накоплении редких элементов в каменных углях. В кн.: Сб. статей по геохимии редких элементов. М.—Л., 1938, с. 214—220.  
 Дожарев В. С. Медистые породы. — В кн.: Справочное руководство по петрографии осадочных пород. Т. 2, М., 1958, с. 206—218.

- Доминиковский В. Н. Известково-магнезиальные осадочные породы. — В кн.: Справочное руководство по петрографии осадочных пород. Т. 2. М., 1958, с. 250—275.
- Дали Р. А. Изверженные породы и глубины Земли. М., Изд-во ОНТИ, 1936. 405 с.
- Заварицкий А. Н. Петрография Бердяшского плутона. — «Тр. ЦНИГРИ», 1937, вып. 96, с. 136—150.
- Заварицкий А. Н. Введение в петрохимию. М., Изд-во АН СССР, 1944. 300 с.
- Заварицкий А. Н. Изверженные горные породы. М., Изд-во АН СССР, 1955. 480 с.
- Зульфугаров Д. И. Распространение микроэлементов в вулканобийтах, организмах, осадочных породах и пластовых водах. Баку, Изд-во Азерб. ун-та, 1960. 117 с.
- Ковда В. А. Происхождение и режим засоленных почв. Ч. 1. М., Изд-во АН СССР, 1946. 312 с.
- Колодяжная А. А. Режим химического состава атмосферных осадков и их метаморфизма в зоне аэрации. М., Изд-во АН СССР, 1963. 150 с.
- Котляцкий В. К., Шейнман Ю. М. Ультраосновные породы бассейна р. Меймчи. — «Бюлл. техн. информ.», 1945, № 3—4, с. 10—11.
- Кринов Е. Л. Основы метеоритики. М., Техтеоретиздат, 1955. 392 с.
- Куплетский Б. М. Щелочные проявления в области сибирских траптов (северо-западная часть). — «Недра Арктики», 1947, № 2, с. 36—54.
- Ларсен Э. С. Данные о составе изверженных пород. — В кн.: Справочник для геологов по физическим константам. М., 1949, с. 250—260.
- Литный грунт из Моря Изобилия. М., «Наука», 1974. 624 с.
- Лучицкий В. И. Петрография. Т. 2. М., Госгеолиздат, 1949. 438 с.
- Меро Дж. Л. Марганцевые конкреции со дна океана. — В кн.: Вопросы геохимии и геохронологии океана. М., 1965, с. 118—130.
- Морозевич И. А. Об одном крайнем члене семейства нефелиновых сиенитов — мариуполите — и связанных с ними породах Мариупольского уезда. — «Зап. Всероссийского минер. о-ва», 1901, с. 39—46.
- Морковкина В. Ф. Химические анализы изверженных горных пород и породообразующих минералов. М., Изд-во АН СССР, 1964. 250 с.
- Мэйсон Б. Метеориты. М., «Мир», 1965, 308 с.
- Пустовалов Л. В. Петрография осадочных пород. М., Госгостехиздат, 1950, ч. I, 476 с.; ч. II, 420 с.
- Рачковский И. П. К вопросу о породах щелочного ряда юго-западной части Енисейской губернии. — «Зап. СПб минералог. о-ва», 1912, сер. 2, с. 48—55.
- Розенбург Г. Описательная петрография. М., Изд-во ОНТИ, 1934. 500 с.
- Рухин Л. Б. Распределение и состав осадочных пород. — В кн.: Справочное руководство по петрографии осадочных пород. Т. 1. М., 1958, с. 35—47.
- Струве Э. А. Сборник анализов изверженных и метаморфических горных пород СССР. М., Изд-во АН СССР, 1940. 590 с.
- Червицкий П. Н. Средний химико-минералогический состав метеоритов. «Метеоритика», 1952, вып. X, с. 15—25.
- Эл-Векил С. К. и Райли Дж. П. Химические и минералогические исследования глубоководных осадков. — В кн.: Вопросы геохимии и геохронологии океана. Пер. с англ. М., 1965, с. 111—120.
- Bertrand D. Survey of contemporary knowledge of biogeochemistry. — «Bull. Amer. Museum Nat. History», 1950, 94, p. 403—456.
- Clarke F. W. The Data of Geochemistry (fifth edition). U. S. Geol. Surv. Bull. 770, 1924. 841 p.
- Farrington O. C. Meteorites. Chicago, 1915. 233 p.
- Fleischer M. and Stevens R. Summary of new data on rock samples G—1 and W—1. — «Geochimica et Cosmochimica Acta». 1962, 26, p. 525—543.
- Goldschmidt V. M. Geologisch — petrographische Studien im Hochgebirge des südlichen Norvegens. Skrifter Videnskap Selsk. M. N. Kl. Kristiania. 1916. 75 p.
- Goldschmidt V. M. Geochemistry. Oxford at the Clarendon Press, 1954. 73 p.
- Hutchinson G. E. The biogeochemistry of aluminium and certain related elements. — «Qart. Rev. Biol.», 18, 1943, p. 1—29, 129—253, 242—262, 331—363.
- Keil K. Meteorite Composition. — In Handbook of Geochemistry (Editor K. H. Wedepohl). Springer Verlag, Berlin — Heidelberg — New York, 1969, p. 78—115.
- Pettijohn F. J. Sedimentary Rocks. New-York, 1949. 450 p.
- Shepherd E. S. Volcanic gases. — «Amer. Journal of Science», 1938, 35 A, p. 312—320.
- Sukhovski L. L. Average chemical composition of the sedimentary rocks. — «Amer. Journ. of Science», 1952, v. 250, No 3, p. 115—120.

# Глава V

## ИЗОТОПЫ В ГЕОХИМИИ

### ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗОТОПОВ

Различные атомы известных химических элементов характеризуются определенным сочетанием элементарных частиц (нуклонов), которые обозначаются  $Z$ ,  $N$ ,  $A$ .

$Z$  — порядковый номер элемента в таблице Д. И. Менделеева, равный числу протонов в ядре или числу орбитальных электронов в нейтральном атоме; изменяется от 1 (H) до 105.

$N$  — число нейтронов в ядре; изменяется от 1 (нейтрон) до 150 и более (трансурановые изотопы).

$A$  — полное число нуклонов в ядре — массовое число. Очевидно массовое число — сумма протонов и нейтронов.

Между величинами  $Z$ ,  $N$  и  $A$  имеются простые соотношения:  $A = Z + N$ ;  $N = A - Z$ ;  $Z = A - N$ . Разность  $N - Z$  — избыток нейтронов.

Большинство известных ядерных видов неустойчиво. Но из 340 ядерных видов, слагающих нашу земную природу, 273 относится к стабильным, из которых очень небольшая часть обладает чрезвычайно слабой радиоактивностью.

Атомы данного элемента с одинаковым числом протонов в ядре, занимающие одну и ту же клетку в таблице Д. И. Менделеева, называются изотопами. Изотопы одного и того же элемента имеют разное число нейтронов. Атомы с одинаковым массовым числом  $A$ , но разными  $N$  и  $Z$  называются изобарами; а с одинаковыми  $N$ , но разными  $Z$  и  $A$  — изотонами.

Все известные изотопы (точнее, ядерные виды или нуклиды) могут быть разделены на четыре типа в зависимости от четного или нечетного числа протонов и нейтронов в их составе: четно-четный  ${}^2_0\text{O}$ ; четно-нечетный  ${}^3_2\text{He}$ ; нечетно-четный  ${}^7_3\text{Li}$ ; нечетно-нечетный  ${}^{10}_5\text{B}$ .

Количественные соотношения ядерных видов различного типа приведены в табл. 84.

Таблица 84

Классификация изотопов

| Тип              | Z        | N        | A        | Число изотопов |
|------------------|----------|----------|----------|----------------|
| Четно-четный     | Четное   | Четное   | Четное   | 166            |
| Четно-нечетный   | Четное   | Нечетное | Нечетное | 55             |
| Нечетно-четный   | Нечетное | Четное   | Нечетное | 47             |
| Нечетно-нечетный | Нечетное | Нечетное | Четное   | 5              |

По данным табл. 84 нетрудно заключить, что изотопы с четным  $Z$  и  $N$  преобладают над изотопами с нечетными  $Z$  и  $N$ . В то же время ядерные виды четно-четного типа в природе наиболее распространены и наиболее стабильны. К ним относится пять изотопов:  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ ,  ${}^{28}_{14}\text{Si}$ ,  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ , которые входят в число восьми главных химических элементов изверженных пород верхних частей литосферы. Все они имеют массовое число кратное четырем.

Ядерные виды с четным  $A$  более многочисленны, чем с нечетным  $A$ . Всего известно пять стабильных изотопов нечетно-нечетного типа:  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^6_3\text{Li}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ ,  ${}^{14}_7\text{N}$ ,  ${}^{50}_{23}\text{V}$ . Не исключена возможность, что  ${}^{50}_{23}\text{V}$  окажется слаборадиоактивным. Все

другие известные нечетно-нечетные ядерные виды (например  $^{40}\text{K}$ ) с  $A > 14$  радиоактивны и испытывают  $\beta$ -распад. Стабильность (устойчивость) атомных ядер в значительной мере обусловлена определенным сочетанием нейтронов и протонов.

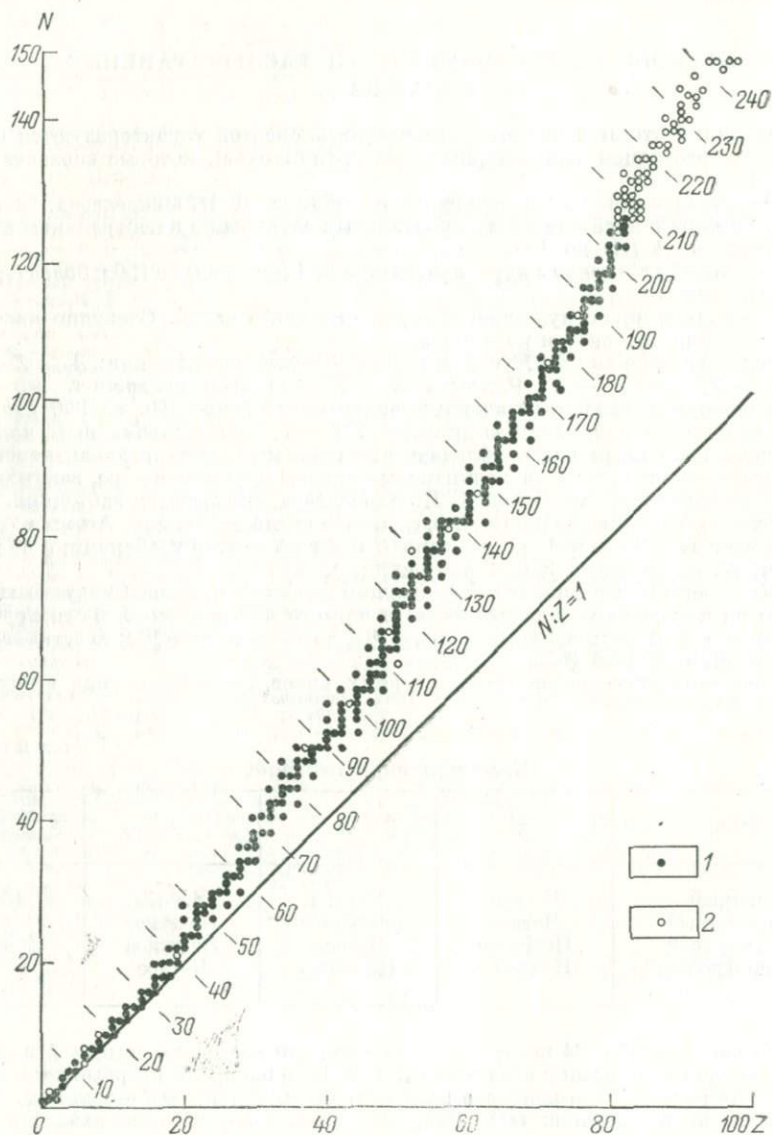


Рис. 4. Нейтронно-протонная диаграмма (по К. Ранкама).  
1 — стабильные изотопы; 2 — радиоактивные изотопы

На рис. 4 изображена нейтронно-протонная диаграмма, на которой помещены известные природные изотопы. На графике они образуют довольно узкую полосу устойчивости, которая разделяет поле графика на две части. Если ядро

по своему нейтронно-протоонному составу находится влево от этой полосы, то оно будет испытывать  $\beta$ -распад до тех пор, пока не войдет в полосу устойчивости. Если ядро находится справа, то оно испытывает  $\beta$ -распад (позитронный) или в определенных случаях электронный захват (Е-захват).

Все тяжелые изотопы с  $Z > 82$  радиоактивны, многие из них испытывают  $\alpha$ -распад. Они группируются в четыре радиоактивных ряда: ториевый, нептуниевый, урановый и актино-урановый. При распаде изотопов этих рядов массовое число уменьшается на четыре после каждого акта  $\alpha$ -распада. При этом типы изотопов не изменяются (табл. 85).

В современную эпоху на Земле отсутствует нептуниевый ряд. Изотопы этого ряда получены искусственно. Кроме членов радиоактивных рядов, очень слабую  $\alpha$ -радиоактивность испытывают некоторые изотопы в интервале от церия ( $Z = 58$ ) до свинца ( $Z = 82$ ). Средняя относительная распространенность изотопов приведена в табл. 86.

Т а б л и ц а 85

Радиоактивные изотопы

| Ряд              | Родоначальный изотоп   | Конечный продукт       | Признак делимости на 4 | Тип изотопов   |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------|
| Ториевый         | $^{232}_{90}\text{Th}$ | $^{208}_{82}\text{Pb}$ | $4n$                   | Четно-четный   |
| Нептуниевый      | $^{237}_{93}\text{Np}$ | $^{209}_{83}\text{Bi}$ | $4n + 1$               | Нечетно-четный |
| Урановый         | $^{238}_{92}\text{U}$  | $^{206}_{82}\text{Pb}$ | $4n + 2$               | Четно-четный   |
| Актинно-урановый | $^{235}_{92}\text{U}$  | $^{207}_{82}\text{Pb}$ | $4n + 3$               | Четно-нечетный |

Основные закономерности относительной распространенности изотопов (точнее, ядерных видов), вытекающие из табл. 86, следующие:

1) элементы с четным значением  $Z$  имеют значительно больше изотопов, чем элементы с нечетным  $Z$ ;

2) наибольшее число изотопов у олова ( $Z = 50$ ) и равно 10.

У легких элементов с четным значением  $Z$  более распространены самые легкие изотопы, чем тяжелые. В то время для более тяжелых элементов (с  $Z > 32$ ) характерно повышенное распространение тяжелых стабильных изотопов, а самые легкие изотопы встречаются в незначительном количестве. У элементов с четным  $Z$  среди легких элементов, очевидно, преобладает изотоп с минимальным значением  $N$ . Среди тяжелых элементов обычно отсутствует резко доминирующий изотоп. Преобладающий изотоп составляет не более 60%. Наиболее распространены средние и тяжелые изотопы. Эти особенности яснее всего выражены у ядерных видов с четным  $N$ . Изотопы с нечетным  $N$  относительно мало распространены, за исключением  $^9\text{Be} = 100$  ( $N = 5$ ) и  $^{195}\text{Pt} = 33,7\%$  ( $N = 117$ ). Сумма изотопов с нечетным  $N$  не превышает 30%, за исключением  $^{129}\text{Xe} + ^{131}\text{Xe} = 47,6\%$  и  $^{161}\text{Dy} + ^{163}\text{Dy} = 43,85\%$ . Из трех последовательных смежных изотопов средний изотоп с нечетным значением  $N$  обычно меньше распространен по сравнению с соседними изотопами с четным  $N$ .

У элементов с нечетным значением  $Z$  число стабильных изотопов не превышает двух. Нечетный калий сложен тремя изотопами, однако средний изотоп  $^{40}\text{K}$  является радиоактивным. У двухизотопных элементов преобладает изотоп с четным значением  $N$ . В группе средних и легких элементов до серебра включительно ( $Z = 47$ ) преобладает более легкий изотоп, у остальных, более тяжелых нечетных элементов изотоп с нечетным значением  $N$  значительно менее распространен, чем изотоп с четным  $N$ . Исключение представляет изотоп  $^{14}\text{N}$ , имеющий семь нейтронов и относительное распространение 99,63%.

**Природные изотопы**  
(Фридлендер, Кевнеди, Миллер, 1967)

| Z  | Элемент  | Символ | N  | A  | Относительное распространение, % |
|----|----------|--------|----|----|----------------------------------|
| 0  | Нейтрон  | n      | 1  | 1  | —                                |
| 1  | Водород  | H      | 0  | 1  | 99,9844                          |
|    | Дейтерий | D      | 1  | 2  | 0,0156                           |
|    | Тритий   | T      | 2  | 3  | —                                |
| 2  | Гелий    | He     | 1  | 3  | $1,3 \cdot 10^{-4}$              |
|    |          |        | 2  | 4  | 99,9999                          |
| 3  | Литий    | Li     | 3  | 6  | 7,42                             |
|    |          |        | 4  | 7  | 92,58                            |
| 4  | Бериллий | Be     | 5  | 9  | 100,00                           |
| 5  | Бор      | B      | 5  | 10 | 19,61                            |
|    |          |        | 6  | 11 | 80,39                            |
| 6  | Углерод  | C      | 6  | 12 | 98,893                           |
|    |          |        | 7  | 13 | 1,107                            |
| 7  | Азот     | N      | 7  | 14 | 99,634                           |
|    |          |        | 8  | 15 | 0,366                            |
| 8  | Кислород | O      | 8  | 16 | 99,759                           |
|    |          |        | 9  | 17 | 0,0374                           |
|    |          |        | 10 | 18 | 0,2039                           |
| 9  | Фтор     | F      | 10 | 19 | 100,0                            |
| 10 | Неон     | Ne     | 10 | 20 | 90,92                            |
|    |          |        | 11 | 21 | 0,257                            |
|    |          |        | 12 | 22 | 8,82                             |
| 11 | Натрий   | Na     | 12 | 23 | 100,0                            |
| 12 | Магний   | Mg     | 12 | 24 | 78,70                            |
|    |          |        | 13 | 25 | 10,13                            |
|    |          |        | 14 | 26 | 11,17                            |
| 13 | Алюминий | Al     | 14 | 27 | 100,0                            |
| 14 | Кремний  | Si     | 14 | 28 | 92,21                            |
|    |          |        | 15 | 29 | 4,70                             |
|    |          |        | 16 | 30 | 3,09                             |
| 15 | Фосфор   | P      | 16 | 31 | 100,0                            |
| 16 | Сера     | S      | 16 | 32 | 95,0                             |
|    |          |        | 17 | 33 | 0,76                             |
|    |          |        | 18 | 34 | 4,22                             |
|    |          |        | 20 | 36 | 0,014                            |
| 17 | Хлор     | Cl     | 18 | 35 | 75,53                            |
|    |          |        | 20 | 37 | 24,47                            |
| 18 | Аргон    | Ar     | 18 | 36 | 0,337                            |
|    |          |        | 20 | 38 | 0,063                            |
|    |          |        | 22 | 40 | 99,600                           |
| 19 | Калий    | K      | 20 | 39 | 93,10                            |
|    |          |        | 21 | 40 | 0,0118                           |
|    |          |        | 22 | 41 | 6,88                             |
| 20 | Кальций  | Ca     | 20 | 40 | 96,97                            |
|    |          |        | 22 | 42 | 0,64                             |
|    |          |        | 23 | 43 | 0,145                            |
|    |          |        | 24 | 44 | 2,06                             |
|    |          |        | 26 | 46 | 0,0033                           |
|    |          |        | 28 | 48 | 0,185                            |
| 21 | Скандий  | Sc     | 24 | 45 | 100,00                           |
| 22 | Титан    | Ti     | 24 | 46 | 7,93                             |
|    |          |        | 25 | 47 | 7,28                             |

| Z  | Элемент  | Символ | N  | A  | Относительное распространение, % |
|----|----------|--------|----|----|----------------------------------|
|    |          |        | 26 | 48 | 73,94                            |
|    |          |        | 27 | 49 | 5,51                             |
|    |          |        | 28 | 50 | 5,34                             |
| 23 | Ванадий  | V      | 27 | 50 | 0,24                             |
|    |          |        | 28 | 51 | 99,76                            |
| 24 | Хром     | Cr     | 26 | 50 | 4,31                             |
|    |          |        | 28 | 52 | 83,76                            |
|    |          |        | 29 | 53 | 9,55                             |
|    |          |        | 30 | 54 | 2,38                             |
| 25 | Марганец | Mn     | 30 | 55 | 100,00                           |
| 26 | Железо   | Fe     | 28 | 54 | 5,82                             |
|    |          |        | 30 | 56 | 91,66                            |
|    |          |        | 31 | 57 | 2,19                             |
|    |          |        | 32 | 58 | 0,33                             |
| 27 | Кобальт  | Co     | 32 | 59 | 100,00                           |
| 28 | Никель   | Ni     | 30 | 58 | 67,88                            |
|    |          |        | 32 | 60 | 26,23                            |
|    |          |        | 33 | 61 | 1,19                             |
|    |          |        | 34 | 62 | 3,66                             |
|    |          |        | 36 | 64 | 1,08                             |
| 29 | Медь     | Cu     | 34 | 63 | 69,09                            |
|    |          |        | 36 | 65 | 30,91                            |
| 30 | Цинк     | Zn     | 34 | 64 | 48,89                            |
|    |          |        | 36 | 66 | 27,81                            |
|    |          |        | 37 | 67 | 4,11                             |
|    |          |        | 38 | 68 | 18,57                            |
|    |          |        | 40 | 70 | 0,62                             |
| 31 | Галлий   | Ga     | 38 | 69 | 60,4                             |
|    |          |        | 40 | 71 | 39,6                             |
| 32 | Германий | Ge     | 38 | 70 | 20,52                            |
|    |          |        | 40 | 72 | 27,43                            |
|    |          |        | 41 | 73 | 7,76                             |
|    |          |        | 42 | 74 | 36,54                            |
|    |          |        | 44 | 76 | 7,76                             |
| 33 | Мышьяк   | As     | 42 | 75 | 100,00                           |
| 34 | Селен    | Se     | 40 | 74 | 0,87                             |
|    |          |        | 42 | 76 | 9,02                             |
|    |          |        | 43 | 77 | 7,58                             |
|    |          |        | 44 | 78 | 23,52                            |
|    |          |        | 46 | 80 | 49,82                            |
|    |          |        | 48 | 82 | 9,19                             |
| 35 | Бром     | Br     | 44 | 79 | 50,54                            |
|    |          |        | 46 | 81 | 49,46                            |
| 36 | Криптон  | Kr     | 42 | 78 | 0,354                            |
|    |          |        | 44 | 80 | 2,27                             |
|    |          |        | 46 | 82 | 11,56                            |
|    |          |        | 47 | 83 | 11,56                            |
|    |          |        | 48 | 84 | 56,90                            |
|    |          |        | 50 | 86 | 17,37                            |
| 37 | Рубидий  | Rb     | 48 | 85 | 72,15                            |
|    |          |        | 50 | 87 | 27,85                            |
| 38 | Стронций | Sr     | 46 | 84 | 0,56                             |
|    |          |        | 48 | 86 | 9,86                             |

| Z  | Элемент  | Символ | N  | A   | Относительное распространение, % |
|----|----------|--------|----|-----|----------------------------------|
|    |          |        | 49 | 87  | 7,02                             |
| 39 | Иттрий   | Y      | 50 | 88  | 82,56                            |
| 40 | Цирконий | Zr     | 50 | 89  | 100,00                           |
|    |          |        | 50 | 90  | 51,46                            |
|    |          |        | 51 | 91  | 11,23                            |
|    |          |        | 52 | 92  | 17,11                            |
|    |          |        | 54 | 94  | 17,40                            |
|    |          |        | 56 | 96  | 2,80                             |
| 41 | Ниобий   | Nb     | 52 | 93  | 100,00                           |
| 42 | Молибден | Mo     | 50 | 92  | 15,84                            |
|    |          |        | 52 | 94  | 9,04                             |
|    |          |        | 53 | 95  | 15,72                            |
|    |          |        | 54 | 96  | 16,53                            |
|    |          |        | 55 | 97  | 9,46                             |
|    |          |        | 56 | 98  | 23,78                            |
|    |          |        | 58 | 100 | 9,63                             |
| 43 | Технеций | Tc     | 56 | 99  | —                                |
| 44 | Рутений  | Ru     | 52 | 96  | 5,51                             |
|    |          |        | 54 | 98  | 1,87                             |
|    |          |        | 55 | 99  | 12,72                            |
|    |          |        | 56 | 100 | 12,62                            |
|    |          |        | 57 | 101 | 17,07                            |
|    |          |        | 58 | 102 | 31,61                            |
|    |          |        | 60 | 104 | 18,58                            |
| 45 | Родий    | Rh     | 58 | 103 | 100,00                           |
| 46 | Палладий | Pd     | 56 | 102 | 0,96                             |
|    |          |        | 58 | 104 | 10,97                            |
|    |          |        | 59 | 105 | 22,23                            |
|    |          |        | 60 | 106 | 27,33                            |
|    |          |        | 62 | 108 | 26,71                            |
|    |          |        | 64 | 110 | 11,81                            |
| 47 | Серебро  | Ag     | 60 | 107 | 51,35                            |
|    |          |        | 62 | 109 | 48,65                            |
| 48 | Кадмий   | Cd     | 58 | 106 | 1,225                            |
|    |          |        | 60 | 108 | 0,875                            |
|    |          |        | 62 | 110 | 12,39                            |
|    |          |        | 63 | 111 | 12,75                            |
|    |          |        | 64 | 112 | 24,07                            |
|    |          |        | 65 | 113 | 12,26                            |
|    |          |        | 66 | 114 | 28,86                            |
|    |          |        | 68 | 116 | 7,58                             |
| 49 | Индий    | In     | 64 | 113 | 4,28                             |
|    |          |        | 66 | 115 | 95,72                            |
| 50 | Олово    | [Sn    | 62 | 112 | 0,96                             |
|    |          |        | 64 | 114 | 0,66                             |
|    |          |        | 65 | 115 | 0,35                             |
|    |          |        | 66 | 116 | 14,30                            |
|    |          |        | 67 | 117 | 7,61                             |
|    |          |        | 68 | 118 | 24,03                            |
|    |          |        | 69 | 119 | 8,58                             |
|    |          |        | 70 | 120 | 32,85                            |
|    |          |        | 72 | 122 | 4,72                             |
|    |          |        | 74 | 124 | 5,94                             |
| 51 | Сурьма   | Sb     | 70 | 121 | 57,25                            |

| Z  | Элемент   | Символ | N  | A   | Относительное распространение, % |
|----|-----------|--------|----|-----|----------------------------------|
| 52 | Теллур    | Te     | 72 | 123 | 42,75                            |
|    |           |        | 68 | 120 | 0,089                            |
|    |           |        | 70 | 122 | 2,46                             |
|    |           |        | 71 | 123 | 0,87                             |
|    |           |        | 72 | 124 | 4,61                             |
|    |           |        | 73 | 125 | 6,99                             |
|    |           |        | 74 | 126 | 18,71                            |
|    |           |        | 76 | 128 | 31,79                            |
| 53 | Иод       | I      | 78 | 130 | 34,48                            |
|    |           |        | 74 | 127 | 100,00                           |
| 54 | Ксенон    | Xe     | 70 | 124 | 0,096                            |
|    |           |        | 72 | 126 | 0,090                            |
|    |           |        | 74 | 128 | 1,919                            |
|    |           |        | 75 | 129 | 26,44                            |
|    |           |        | 76 | 130 | 4,08                             |
|    |           |        | 77 | 131 | 21,18                            |
|    |           |        | 78 | 132 | 26,89                            |
|    |           |        | 80 | 134 | 10,44                            |
| 55 | Цезий     | Cs     | 82 | 136 | 8,87                             |
|    |           |        | 78 | 133 | 100,00                           |
| 56 | Барий     | Ba     | 74 | 130 | 0,101                            |
|    |           |        | 76 | 132 | 0,097                            |
|    |           |        | 78 | 134 | 2,42                             |
|    |           |        | 79 | 135 | 6,59                             |
|    |           |        | 80 | 136 | 7,81                             |
|    |           |        | 81 | 137 | 11,32                            |
|    |           |        | 82 | 138 | 71,66                            |
|    |           |        | 81 | 138 | 0,089                            |
| 57 | Лантан    | La     | 82 | 139 | 99,911                           |
|    |           |        | 78 | 136 | 0,193                            |
| 58 | Церий     | Ce     | 80 | 138 | 0,250                            |
|    |           |        | 82 | 140 | 88,48                            |
|    |           |        | 84 | 142 | 11,07                            |
|    |           |        | 82 | 141 | 100,00                           |
| 59 | Празеодим | Pr     | 82 | 142 | 27,11                            |
|    |           |        | 83 | 143 | 12,17                            |
| 60 | Неодим    | Nd     | 84 | 144 | 23,85                            |
|    |           |        | 85 | 145 | 8,30                             |
|    |           |        | 86 | 146 | 17,22                            |
|    |           |        | 88 | 148 | 5,73                             |
|    |           |        | 90 | 150 | 5,62                             |
|    |           |        | 86 | 145 | —                                |
|    |           |        | 82 | 144 | 3,09                             |
|    |           |        | 85 | 147 | 14,97                            |
| 61 | Прометий  | Pm     | 86 | 148 | 11,24                            |
|    |           |        | 87 | 149 | 13,83                            |
|    |           |        | 88 | 150 | 7,44                             |
|    |           |        | 90 | 152 | 26,72                            |
|    |           |        | 92 | 154 | 22,71                            |
|    |           |        | 88 | 151 | 47,82                            |
|    |           |        | 90 | 153 | 52,18                            |
|    |           |        | 88 | 152 | 0,20                             |
| 62 | Самарий   | Sm     | 90 | 154 | 2,15                             |
|    |           |        | 91 | 155 | 14,73                            |
|    |           |        | 88 | 151 | —                                |
| 63 | Европий   | Eu     | 90 | 153 | 52,18                            |
|    |           |        | 88 | 151 | 47,82                            |
| 64 | Гадолиний | Gd     | 88 | 152 | 0,20                             |
|    |           |        | 90 | 154 | 2,15                             |
|    |           |        | 91 | 155 | 14,73                            |

| Z   | Элемент  | Символ | N   | A         | Относительное распространение, % |     |        |        |
|-----|----------|--------|-----|-----------|----------------------------------|-----|--------|--------|
| 65  | Тербий   | Tb     | 92  | 156       | 20,47                            |     |        |        |
|     |          |        | 93  | 157       | 15,68                            |     |        |        |
|     |          |        | 94  | 158       | 24,87                            |     |        |        |
|     |          |        | 96  | 160       | 21,90                            |     |        |        |
|     |          |        | 94  | 159       | 100,00                           |     |        |        |
|     |          |        | 66  | Диспрозий | Dy                               | 90  | 156    | 0,0524 |
|     |          |        |     |           |                                  | 92  | 158    | 0,0902 |
|     |          |        |     |           |                                  | 94  | 160    | 2,294  |
|     |          |        |     |           |                                  | 95  | 161    | 18,88  |
|     |          |        |     |           |                                  | 96  | 162    | 25,53  |
| 97  | 163      | 24,97  |     |           |                                  |     |        |        |
| 67  | Гольмий  | Ho     | 98  | 164       | 28,18                            |     |        |        |
|     |          |        | 98  | 165       | 100,00                           |     |        |        |
| 68  | Эрбий    | Er     | 94  | 162       | 0,136                            |     |        |        |
|     |          |        | 96  | 164       | 1,56                             |     |        |        |
|     |          |        | 98  | 166       | 33,41                            |     |        |        |
|     |          |        | 99  | 167       | 22,94                            |     |        |        |
|     |          |        | 100 | 168       | 27,07                            |     |        |        |
|     |          |        | 102 | 170       | 14,88                            |     |        |        |
|     |          |        | 69  | Тулий     | Tm                               | 100 | 169    | 100,00 |
|     |          |        |     |           |                                  | 98  | 168    | 0,140  |
| 70  | Иттербий | Yb     | 100 | 170       | 3,03                             |     |        |        |
|     |          |        | 101 | 171       | 14,31                            |     |        |        |
|     |          |        | 102 | 172       | 21,82                            |     |        |        |
|     |          |        | 103 | 173       | 16,13                            |     |        |        |
|     |          |        | 104 | 174       | 31,84                            |     |        |        |
|     |          |        | 106 | 176       | 12,73                            |     |        |        |
|     |          |        | 71  | Лютеций   | Lu                               | 104 | 175    | 97,41  |
|     |          |        |     |           |                                  | 105 | 176    | 2,59   |
|     |          |        |     |           |                                  | 72  | Гафний | Hf     |
|     |          |        | 104 | 176       | 5,20                             |     |        |        |
| 105 | 177      | 18,50  |     |           |                                  |     |        |        |
| 106 | 178      | 27,14  |     |           |                                  |     |        |        |
| 107 | 179      | 13,75  |     |           |                                  |     |        |        |
| 73  | Тантал   | Ta     | 108 | 180       | 35,24                            |     |        |        |
|     |          |        | 107 | 180       | 0,0123                           |     |        |        |
|     |          |        | 108 | 181       | 99,9871                          |     |        |        |
| 74  | Вольфрам | W      | 106 | 180       | 0,135                            |     |        |        |
|     |          |        | 108 | 182       | 26,41                            |     |        |        |
|     |          |        | 109 | 183       | 14,40                            |     |        |        |
|     |          |        | 110 | 184       | 30,64                            |     |        |        |
|     |          |        | 112 | 186       | 28,41                            |     |        |        |
|     |          |        | 75  | Рений     | Re                               | 110 | 185    | 37,07  |
| 112 | 187      | 62,93  |     |           |                                  |     |        |        |
| 76  | Осмий    | Os     |     |           |                                  | 108 | 184    | 0,018  |
|     |          |        | 110 | 186       | 1,59                             |     |        |        |
|     |          |        | 111 | 187       | 1,64                             |     |        |        |
|     |          |        | 112 | 188       | 13,3                             |     |        |        |
|     |          |        | 113 | 189       | 16,1                             |     |        |        |
|     |          |        | 114 | 190       | 26,4                             |     |        |        |
|     |          |        | 116 | 192       | 41,0                             |     |        |        |
|     |          |        | 77  | Иридий    | Ir                               | 114 | 191    | 37,3   |
|     |          |        |     |           |                                  | 116 | 193    | 62,7   |
|     |          |        | 78  | Платина   | Pt                               | 112 | 190    | 0,012  |

| Z  | Элемент | Символ | N   | A   | Относительное распространение, % |
|----|---------|--------|-----|-----|----------------------------------|
|    |         |        | 114 | 192 | 0,78                             |
|    |         |        | 116 | 194 | 32,09                            |
|    |         |        | 117 | 195 | 33,8                             |
|    |         |        | 118 | 196 | 25,3                             |
|    |         |        | 120 | 198 | 7,21                             |
| 79 | Золото  | Au     | 118 | 197 | 100,00                           |
| 80 | Ртуть   | Hg     | 116 | 196 | 0,146                            |
|    |         |        | 118 | 198 | 10,02                            |
|    |         |        | 119 | 199 | 16,84                            |
|    |         |        | 120 | 200 | 23,13                            |
|    |         |        | 121 | 201 | 13,22                            |
|    |         |        | 122 | 202 | 29,80                            |
|    |         |        | 124 | 204 | 6,85                             |
| 81 | Таллий  | Tl     | 122 | 203 | 29,50                            |
|    |         |        | 124 | 205 | 70,50                            |
| 82 | Свинец  | Pb     | 122 | 204 | 1,48                             |
|    |         |        | 124 | 206 | 23,60                            |
|    |         |        | 125 | 207 | 22,60                            |
|    |         |        | 126 | 208 | 52,30                            |
| 83 | Висмут  | Bi     | 126 | 209 | 100,00                           |
| 90 | Торий   | Th     | 142 | 232 | 100,00                           |
| 92 | Уран    | U      | 142 | 234 | 0,0056                           |
|    |         |        | 143 | 235 | 0,7205                           |
|    |         |        | 146 | 238 | 99,274                           |

Для более полного представления о закономерностях распространения изотопов в природе учитываются космохимические данные по распространению элементов в нашей галактике с предположением о тождественности изотопного состава элементов в различных космических телах, что справедливо лишь в первом приближении.

На основании астрофизических данных по составу звездных атмосфер и данных по составу метеоритов некоторые авторы построили полулогарифмические графики относительного космического (галактического) распространения элементов и их изотопов. Примерами могут служить графики (рис. 5, 6 и 7), построенные А. Поляньским (Polanski, 1961), который в качестве исходных величин принял данные Г. Зюсса и Г. Юри (Suess, Urey, 1956). Соответственно они выражают логарифм относительного распространения нуклидов в зависимости от  $Z$ ,  $N$  и  $A$ . Иначе говоря, они выражают закономерности галактического распространения элементов, изотопов и изобар. В качестве основы для количественного выражения распространения принято  $Si = 10^6$ .

Зависимость между распространением элемента и значением  $Z$  (см. рис. 5) выражается следующими закономерностями.

1. Распространенность элементов с четным  $Z$  в общем более высокая, чем у элементов с нечетным  $Z$ . Эта закономерность установлена давно и получила название правила Оддо — Гаркинса. Оно формулируется так: распространенность нечетного элемента всегда более низкая, чем распространенность соседнего четного.

2. Кривая распространенности имеет неравномерный характер с резко выраженными максимумами и минимумами. Максимумы распространения характерны для  $Z = 2$  (He),  $Z = 8$  (O),  $Z = 20$  (Ca),  $Z = 40$  (Zr). Повышенная распространенность элемента с четным  $Z$  обычно сопровождается повышенным распространением соседнего элемента с нечетным  $Z$ . Элементы, дающие резкие пики вверх, относятся к элементам «избыточным», по терминологии А. Е. Ферсмана. Наиболее

отчетливые минимумы характерны для  $Z = 3-5$  (Li, Be, B), затем для  $Z = 9$  (F) и  $Z = 21$  (Sc). Эти элементы можно отнести к недостаточным.

3. Распространенность легких элементов с  $Z < 28$  резко преобладает над распространенностью остальных, более тяжелых элементов, за исключением лития, бериллия, бора. Наиболее распространены в нашей галактике водород и гелий; их содержание в несколько тысяч раз больше суммы всех остальных элементов.

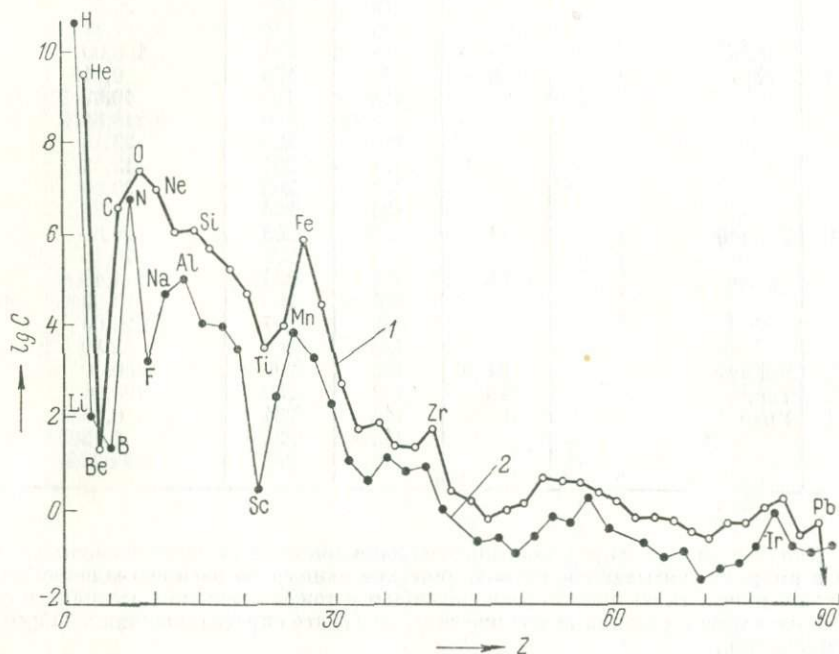


Рис. 5. Зависимость между галактическим распространением элементов ( $\lg C$ ) и порядковым номером  $Z$  (Polanski, 1961)

1 — четные элементы; 2 — нечетные элементы

Для доступной части Земли характерны те же особенности распространения элементов, за исключением резкого дефицита H, He, Ne и значительного преобладания Na, K, Al, что обусловлено способом образования нашей планеты и дифференциацией ее вещества.

Зависимость между распространением и значением нейтронного числа  $N$ . Кривая распространения на рис. 6 примерно аналогична кривой на рис. 5. Ядерные виды с четным  $N$  преобладают над видами с нечетными  $N$ . Максимумы распространения отчетливо проявляются для  $N$  равного 8, 30, 50, 116 и 126. Минимумы распространения характерны для  $N = 3-5$  (Li, Be, B), а также для  $N = 21$  (радиоактивный  $^{40}\text{K}$ ),  $N = 71$  и  $N = 111$  ( $^{187}\text{Os}$ ). Полностью отсутствуют изотопы с  $N$  равным 35, 39, 45, 61, 89, 115.

Зависимость между распространением и массовым числом  $A$ . На графике распространения (см. рис. 7) изотопы с четным  $A$  преобладают над изотопами с нечетным  $A$ . Для легких ядер с четным  $A < 60$  кривая распространения крайне неравномерна. На этом участке резко преобладают ядерные виды с массовым числом, кратным четырем. Для нечетных ядер колебания кривой менее резкие. Группы ядерных

видов с  $A > 90$  распространены более равномерно. На этом участке из двух изобар более распространен тот, который имеет избыток нейтронов. Для промежуточной группы с  $A = 60-90$  наблюдаются в общем те же неравномерности распространения, что и для изотопов с  $A < 60$ . Однако среди изобар преобладает тот, у которого наблюдается повышенное содержание нейтронов.

Среди ядерных видов с  $A < 90$  особенно распространены группы с значениями  $A$ , равными 4, 16, 20, 28, 32, 36, 40, 44, 48, 56, 80, 84, т. е. с массовыми числами, кратными четырем.

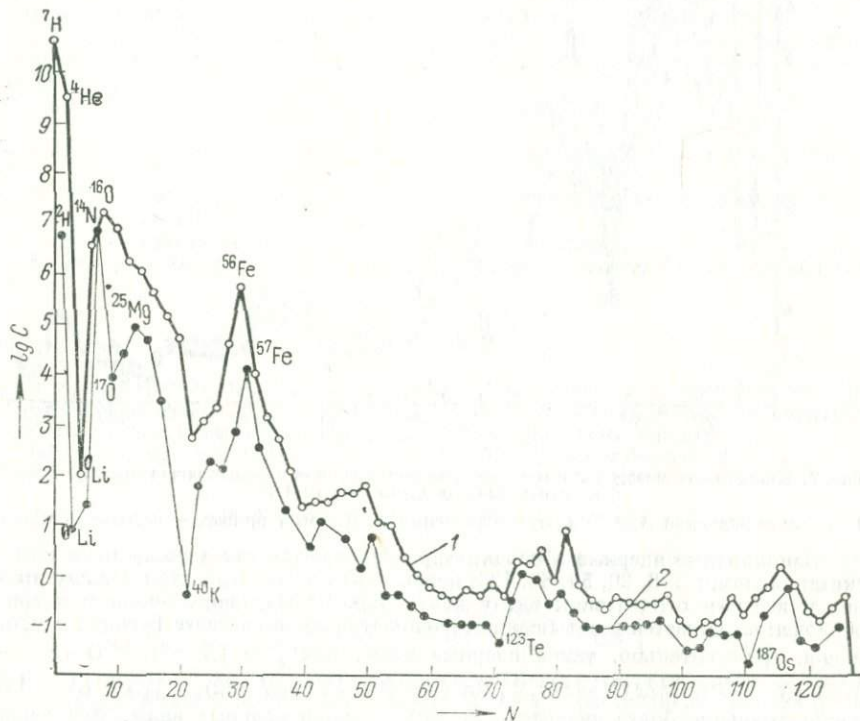


Рис. 6. Зависимость между галактическим распространением изотопов ( $\lg C$ ) и нейтронным числом  $N$  (Polanski, 1961)

1 — четные изотопы; 2 — нечетные изотопы

Из рассмотренных закономерностей распространения элементов, изотопов и изобар вытекает одна общая закономерность: ведущее значение четности как фактора, обуславливающего повышенное распространение атомов. Из того, что при четном сочетании нуклонов в ядре силы ядерной связи особенно велики и получается устойчивый состав нуклонов, вытекает общий вывод: распространенность атомов в природе определяется ядерными свойствами и способом их образования в космических системах.

Однако этот вывод справедлив для космических систем большого масштаба, в которых происходят или происходили ядерные реакции синтеза элементов. Для земной коры он справедлив не полностью, так как ее состав существенно изменился процессами миграции элементов в течение истории Земли при химической дифференциации планеты.

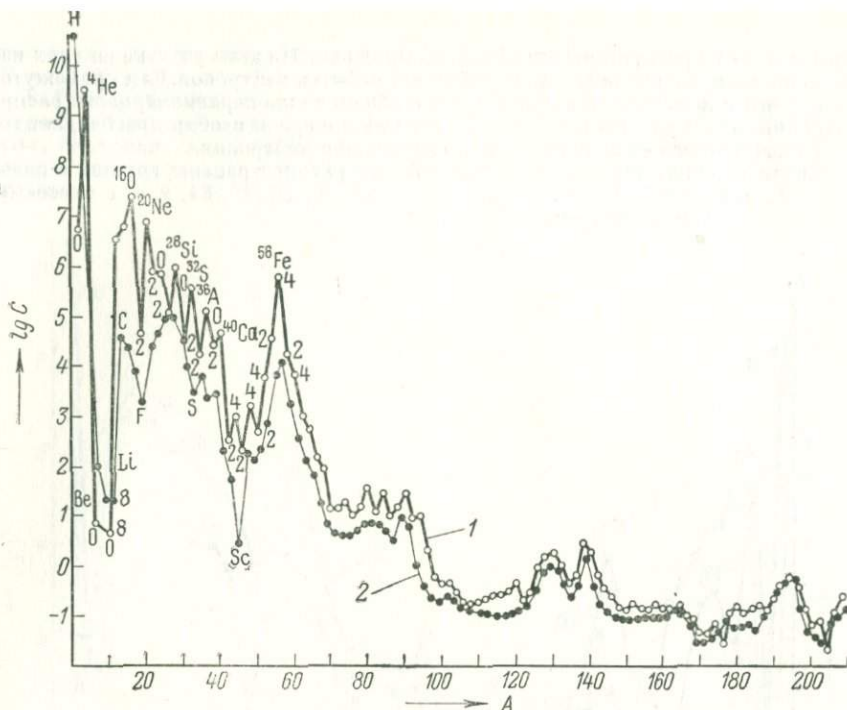


Рис. 7. Зависимость между галактическим распространением ядерных видов (изобар) и массовым числом  $A$  (Polanski, 1961).

1 — четные значения  $A$ ; 2 — нечетные значения  $A$ . Цифры у кривых — избыток нейтронов.

Заполненные ядерные оболочки характеризуются так называемыми магическими числами: 2, 8, 20, 50, 82, 126; первые пять чисел относятся к числу протонов и все они относятся к числу нейтронов. Эффект заполненности ядерных оболочек выражается в повышенном распространении соответствующих ядерных видов. Действительно, такие ядерные виды, как  ${}^4_2\text{He}$  ( $N=2$ ),  ${}^{16}_8\text{O}$  ( $N=8$ ),  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$  ( $N=20$ ),  ${}^{90}_{40}\text{Zr}$  ( $N=50$ ),  ${}^{120}_{50}\text{Sn}$  ( $Z=50$ ),  ${}^{140}_{58}\text{Ce}$  ( $N=82$ ),  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$  ( $N=126$ ), распространены более значительно, чем соседние ядерные виды. Исключение представляет изотоп железа  ${}^{56}\text{Fe}$ , у которого, вероятно, особое сочетание ядерных свойств, в частности наиболее прочная удельная ядерная связь.

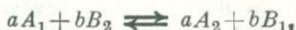
### ПРОЦЕССЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ

Различие между массами изотопов данного элемента определяет различную подвижность атомов или молекул, состоящих из разных изотопов, что является причиной их разделения в процессах миграции — перемещений в различных условиях и прохождения через ряд химических реакций. Впервые В. И. Вернадский в 1926 г. высказал мысль о возможном разделении изотопов в биосфере, особенно для элементов биогенных, миграция которых тесно связана с жизнедеятельностью организмов. Впоследствии это предположение блестяще подтвердилось. Многочисленные исследования показали, что изотопы одного и того же элемента и их соединения слегка различаются по своим химическим свойствам. Эти различия малы и снижаются у тяжелых элементов по мере увеличения массы изотопов. Но в отдельных случаях они достаточно ощутимы, чтобы вызвать концентрацию и разделение изотопов элементов в природных условиях. В 1935 г.

Г. Юри с сотрудниками показали в своих работах, что различие в химических свойствах изотопов одного и того же элемента вполне достаточно для их разделения как в лабораторных условиях, так и в природе. Вследствие большого различия масс изотопов водорода (протия и дейтерия) их разделение протекает наиболее эффективно.

Химические различия изотопов зависят от их термодинамических свойств. Изотопы данного химического элемента, естественно, ведут себя различно при физических процессах. При этом определенную роль могут играть процессы испарения, физической абсорбции, растворения, плавления, кристаллизации.

Различие в массах изотопов приводит к тому, что их разделение совершается при обменных реакциях. Типичная обменная реакция может быть записана в виде



где  $A$  и  $B$  — молекулы, имеющие один и тот же элемент в качестве общего составляющего;

1 и 2 — индексы, указывающие, что молекула содержит преимущественно легкий (1) или тяжелый (2) изотопы;

$a$  и  $b$  — число молекул, участвующих в реакциях.

Константа равновесия указанной выше реакции может быть записана так

$$K = \left( \frac{QA_2}{QA_1} \right)^a : \left( \frac{QB_2}{QB_1} \right)^b$$

где  $Q$  — разделительные функции молекул, рассчитанные с помощью методов статистической механики и молекулярных частот, определяемых по спектрам молекул. Расчет каждой разделительной функции очень сложен.

Примером простой реакции изотопного обмена может быть следующая



Константа химического равновесия для этой реакции по закону действующих масс равна

$$K = \frac{[\text{H}^{13}\text{CN}] \cdot [{}^{12}\text{CN}^-]}{[\text{H}^{12}\text{CN}] \cdot [{}^{13}\text{CN}^-]} = \frac{[\text{H}^{13}\text{CN}]}{[\text{H}^{12}\text{CN}]} : \frac{[{}^{13}\text{CN}^-]}{[{}^{12}\text{CN}^-]} = \alpha.$$

Очевидно, что  $K$  — отношение изотопов углерода в одном соединении, деленное на их отношение в другом соединении. Поэтому константа равновесия представляет в то же время коэффициент разделения  $\alpha$  для ряда простых реакций, в которых каждая из реагирующих молекул содержит только один атом изотопа. Таким образом,  $\alpha$  (коэффициент фракционирования или коэффициент обогащения) — отношение двух составляющих в одном соединении или фазе, деленное на такое же отношение в другом соединении или другой фазе. Упрощенно это может быть записано в виде

$$\alpha = \frac{N_1 : N_2}{n_1 : n_2},$$

где  $N_1$  и  $N_2$  — относительные числа легкого и тяжелого изотопов в одном соединении;

$n_1$  и  $n_2$  — соотношения этих же изотопов в других соединениях.

Значение  $\alpha > 1$  приводит к разделению изотопов. Для всех изотопов (за исключением изотопов водорода) величина  $\alpha$  обычно близка к единице. Разделение изотопов становится более эффективным, если процесс обмена проходит через ряд стадий обменных реакций ( $n$ ). Для  $n$  стадий полный коэффициент разделения равен  $\alpha^n$ .

Изотопы одного элемента имеют различные энергии химической связи и активации в химических реакциях. Эти различия (хотя и очень малы) влияют на скорость химических реакций, в которых участвуют молекулы с разными изотопами. В данном случае разделение определяется различиями в свойствах изотопов в кинетике химических реакций.

Естественные геохимические процессы имеют довольно сложный характер, где единичные процессы представляют скорее исключение. Некоторые периодические повторяющиеся циклические процессы в геохимических условиях могут вызвать значительное разделение изотопов, которое обнаруживается масс-спектрометрическими измерениями. Допускается, что в период образования Земли изотопный состав всех элементов был одинаков. Однако такое заключение носит весьма приближенный характер. В процессе охлаждения туманности солнечного состава и конденсации первых твердых фаз вполне могло происходить небольшое фракционирование некоторых легких изотопов. Если судить по данным об изотопном составе метеоритов, подобное разделение отчасти имело место для изотопов углерода. В течение геологической истории Земли изотопный состав ее химических элементов подвергался непрерывному изменению. Наиболее резкие изменения связаны с радиоактивными процессами и относятся к радиоактивным и радиогенным элементам. Значительно менее резкие изменения изотопного состава элементов происходили в верхних горизонтах нашей планеты, в пределах биосферы, что связано с различием изотопных масс и обусловлено подвижностью преимущественно циклических элементов (в понимании В. И. Вернадского), неоднократно проходивших разные стадии химических реакций.

Принципиально разделение изотопов в геохимических процессах возможно для всех элементов периодической системы, хотя для тяжелых элементов вероятность разделения мала. До настоящего времени обнаружено разделение изотопов у элементов с массовыми числами от 1 до 90.

### ИЗОТОПЫ ВОДОРОДА

Водород представлен двумя естественными стабильными изотопами:  $^1\text{H}$  и  $^2\text{H}$  (D) дейтерием. Распространенность их различна: против составляет в среднем 99,984%, дейтерий — едва ли 0,0156%. Резкое различие в массах

| Геохимическая среда                         | H/D и содержание D, атом. % |        |        |        |        |        |        |             | Разброс по отношению к меньшему значению, % |
|---|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|---|
|   | 12500                       | 11100  | 10000  | 9010   | 8330   | 7690   | 7440   | 6670        |   |
| Атмосферные осадки (дождь, снег) (4*)       | 0,0080                      | 0,0090 | 0,0100 | 0,0110 | 0,0120 | 0,0130 | 0,0140 | 0,0150      | 9,6   |
| Лед ледников (3)                            |                             |        |        |        |        |        | 2      |             | 4,9   |
| Вода пресноводных озер (16)                 |                             |        |        |        |        | 2      | 2      | 8           | 10,4  |
| Речная вода (23)                            |                             |        |        |        |        |        | 3      | 18          | 12,8  |
| Вода соленых озер (3)                       |                             |        |        |        |        |        |        |             | 4,9   |
| Морская вода (40)                           |                             |        |        |        |        |        |        | 2           | 33  |
| Горячие источники и вулканические газы (12) |                             |        |        |        | Г      | Г      | В      | В В В В В В | 86,1  |

Рис. 8. Распространение дейтерия в природных водах.

Г — горячие источники; В — вулканические газы; в скобках — число анализов

против и дейтерия создает в общем благоприятные предпосылки для их разделения в процессе круговорота водорода в природе. Так как большая часть водорода Земли химически связана с кислородом в воде, при круговороте воды изотопные отношения водорода нарушаются. Изменению изотопного состава воды посвящено много работ (первоначально исследования проводились по методу измерения плотности воды). Однако поскольку в состав воды входят тяжелые изотопы кислорода  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$ , которые в соединении с дейтерием дают различные моле-

кулы тяжелой воды, процесс разделения изотопов водорода при естественном круговороте воды в верхних горизонтах нашей планеты существенно усложняется. В водах земной поверхности (океанов, морей, рек) отношения  $^1\text{H} : \text{D}$  обычно колеблются от 5960 до 6970.

Изменение изотопного состава водорода разного происхождения показано на рис. 8 (содержание дейтерия выражено в процентах); там же дается отношение  $^1\text{H} : \text{D}$ . Как видно, изотопный состав водорода вод различного происхождения обнаруживает резкие колебания, значительно превышающие колебания изотопных соотношений таких элементов, как углерод, кислород и сера. Наиболее значительные колебания наблюдаются в термальных водах и вулканических газах. Вулканические газы содержат относительно мало дейтерия. Если изотопный состав водорода мало отличается от вод другого происхождения, то водород вулканических газов ( $\text{H}$  и  $\text{CH}_4$ ) обеднен дейтерием. Данные по изотопному составу водорода горных пород пока еще немногочисленны.

## ИЗОТОПЫ УГЛЕРОДА

Естественный углерод Земли состоит из двух стабильных изотопов: легкого  $^{12}\text{C}$  и тяжелого  $^{13}\text{C}$ . Многочисленными измерениями установлено существенное различие изотопного состава углерода разного происхождения. Разделение изо-

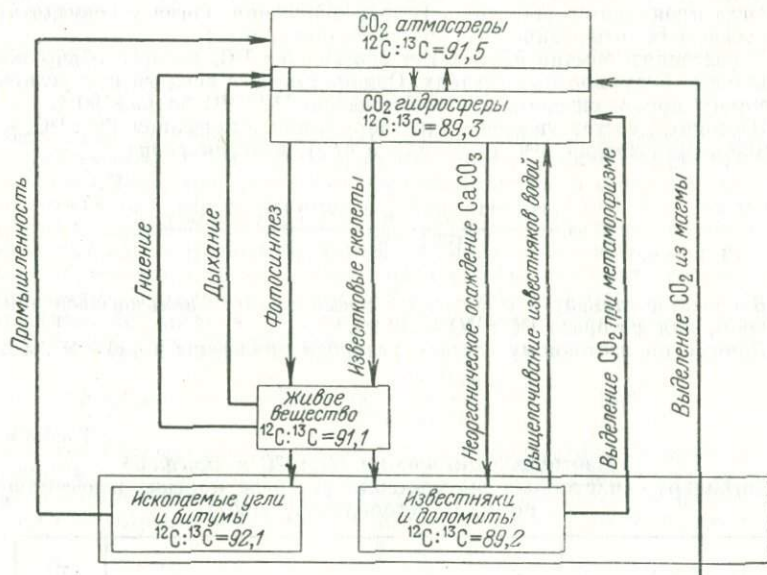


Рис. 9. Схема геохимического круговорота углерода в природе (по Гольдшмиду — Викману)

топов углерода происходит в процессе его круговорота в пределах биосферы (рис. 9). Обобщенные данные по геохимии изотопов углерода приведены в работах Крейга (1954), Ранкама (1956), Галимова (1968, 1973).

В гидросфере Земли отношение  $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C} = 89,3$ ; оно приближается к значениям, найденным для известняков. Реакции изотопного обмена для углерода в морской воде происходят следующим образом



при коэффициенте разделения  $\alpha \approx 1,014$  и  $t = 25^\circ \text{C}$  и



при  $\alpha = 1,012$  и  $t = 25^\circ \text{C}$ .

Эти реакции, вероятно, определяют равновесие между атмосферной углекислотой и углекислотой моря, что приводит к некоторой концентрации  $^{13}\text{C}$  в бикарбонатных и карбонатных ионах и обогащению  $^{13}\text{C}$  известняков, осаждающихся из морской воды, биогенным или другим путем. Для карбонатных минералов осадочного происхождения отношение  $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C} = 88,1-88,9$ . Осадочные известняки имеют самое высокое содержание  $^{13}\text{C}$ .

У битуминозных осадков и их аналогов отношение  $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C}$  обычно высокое — от 90,5 до 92,4 (имеют сходство с углеродом биогенного происхождения). Наиболее высокое отношение  $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C}$  установлено для нефти и природных газов от 91,0 до 94,2 и выше. Полученные до настоящего времени данные по изотопному составу углерода разного происхождения показывают, что по изотопному составу различается углерод биогенный, небιοгенный и метеоритный — промежуточный.

Обменные реакции между атмосферой и морем приводят к тому, что бикарбонаты морской воды обогащаются изотопом  $^{13}\text{C}$ , хотя при образовании карбонатных осадков органическим или неорганическим путем процесс обогащения  $^{13}\text{C}$  не всегда проявляется отчетливо. В зоне окисления, когда углекислота играет роль осадителя, отношение  $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C}$  увеличивается.

В растениях обычно происходит обогащение  $^{12}\text{C}$ , которое обнаруживается в различных битуминозных осадках. Однако имеются исключения: углерод явно биогенного происхождения, а его отношение  $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C}$  больше 90,4.

Изотопный состав углерода характеризуется отношением  $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C}$ , а также величиной уплотнения  $\delta^{13}\text{C}$  (в ‰ или в ‰), которая равна

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{(^{13}\text{C} : ^{12}\text{C})_{\text{образец}} - (^{13}\text{C} : ^{12}\text{C})_{\text{стандарт}}}{(^{13}\text{C} : ^{12}\text{C})_{\text{стандарт}}} \cdot 1000.$$

В качестве стандарта в последнее время принято пользоваться чикагским образцом, для которого  $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C} = 88,99$ .

Данные по изотопному составу углерода приведены в табл. 87, 88.

Таблица 87

Изотопные отношения  $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C}$  в биосфере  
(стандарт — изотопные соотношения углерода морских известняков)  
по А. П. Виноградову (1967)

| Источник углерода               | $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C}$ |                                 | Источник углерода                     | $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C}$ |                                 |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                                 | отношение                       | $\delta^{13}\text{C}, \text{‰}$ |                                       | отношение                       | $\delta^{13}\text{C}, \text{‰}$ |
| $\text{CO}_2$ атмосферы         | 89,2                            | -6,6                            | Ископаемые угли                       | 90,78                           | -25,0                           |
| $\text{CO}_2$ океанической воды | 89,55                           | -2,0                            | Морские карбонаты $\text{CaCO}_3$     | 88,5                            | 0,0                             |
| Ткани морских организмов        | 90,5                            | -25,0                           | Карбонаты скелетов морских организмов | 88,7                            | $\pm 0,2$                       |
| Нефти и битумы                  | 90,9                            | -25,0                           | Каменные метеориты                    | 90,9—<br>92,5                   | -25,0                           |

Изотопный состав углерода морских известняков разного геологического возраста по Дж. Веберу (Weber, 1967)

| Возраст             | Число образцов | Среднее $\delta^{13}\text{C}$ , ‰ | Возраст                | Число образцов | Среднее $\delta^{13}\text{C}$ , ‰ |
|---------------------|----------------|-----------------------------------|------------------------|----------------|-----------------------------------|
| Докембрий (мраморы) | 24             | -0.26                             | Верхний девон          | 18             | +0.94                             |
| Нижний кембрий      | 1              | -0.46                             | Нижний карбон          | 5              | +1.72                             |
| Средний кембрий     | 8              | -0.54                             | Верхний карбон         | 9              | -0.94                             |
| Верхний кембрий     | 16             | +0.18                             | Пермь                  | 12             | +1.09                             |
| Нижний ордовик      | 1              | -0.51                             | Триас                  | 13             | +0.12                             |
| Средний ордовик     | 25             | +0.47                             | Юра                    | 21             | +0.38                             |
| Верхний ордовик     | 1              | -0.31                             | Юра—мел                | 5              | +2.62                             |
| Средний силур       | 3              | +0.02                             | Мел                    | 36             | +1.05                             |
| Верхний силур       | 3              | +0.00                             | Третичные отложения    | 45             | -0.05                             |
| Нижний девон        | 4              | +0.27                             | Четвертичные отложения | 22             | +1.96                             |
| Средний девон       | 20             | +0.33                             |                        |                |                                   |

## ИЗОТОПЫ АЗОТА

Естественный азот атмосферы Земли состоит из двух стабильных изотопов: легкого  $^{14}\text{N}$  и тяжелого  $^{15}\text{N}$  с относительным распространением 99,643% и 0,366% соответственно. Измерение изотопного состава воздушного азота показало, что до высоты 50 км он остается постоянным. Азот, растворенный в морской воде, в пределах нескольких километров имеет тот же изотопный состав, что и азот атмосферы. Небольшое фракционирование изотопов азота наблюдается при биохимических процессах, а также обнаружено в азоте изверженных горных пород и вулканических эффузий. Ввиду того что изотопные сдвиги в природном азоте относительно невелики, изотопный состав азота обычно выражается величиной уплотнения  $\delta^{15}\text{N}$ , которая равна

$$\delta^{15}\text{N} = \frac{(^{15}\text{N} : ^{14}\text{N})_{\text{образец}} - (^{15}\text{N} : ^{14}\text{N})_{\text{стандарт}}}{(^{15}\text{N} : ^{14}\text{N})_{\text{стандарт}}} \cdot 1000.$$

В качестве стандарта принимается азот воздушного происхождения. Изотопные сдвиги в изученных образцах природного азота колеблются от  $-15,6$  до  $310/_{\infty}$ . Отмечено, что с уменьшением содержания азота в породах наблюдается увеличение концентрации тяжелого изотопа азота  $^{15}\text{N}$  и  $\delta^{15}\text{N}$  имеет положительное

Таблица 89

Изотопный состав азота изверженных пород по К. Мейну (Mayne, 1957)

| Породы  | Содержание азота, мм <sup>3</sup> /г | $\delta^{15}\text{N}$ , ‰ | Породы   | Содержание азота, мм <sup>3</sup> /г | $\delta^{15}\text{N}$ , ‰ |
|---------|--------------------------------------|---------------------------|----------|--------------------------------------|---------------------------|
| Риолит  | 49.0                                 | -15.6                     | Оливин   | 17.0                                 | +6.9                      |
| Андезит | 18.7                                 | -11.8                     | Гранит   | 7.1                                  | +8.0                      |
| Трахит  | 16.0                                 | -1.2                      | Оливин   | 2.5                                  | +9.9                      |
| Базальт | 17.0                                 | +5.0                      | Обсидиан | 2.6                                  | +30.9                     |
| Базальт | 15.0                                 | -0.2                      | Дунит    | 1.8                                  | +5.5                      |

Изотопный состав азота вулканических возгонов  
по В. Вольнец, И. Задорожному, К. Флоренскому (1967)

| Соединение                   | Вулкан  | $\delta^{15}\text{N}$ , ‰ |
|------------------------------|---|---------------------------|
| $\text{NH}_4\text{Cl}$       | Везувий, возгоны из кратера                   | +11,5                     |
| $\text{NH}_4\text{Cl}$       | Этна, возгоны из кратера                      | +11,0                     |
| $\text{NH}_4\text{Cl}$       | Парикутин, возгоны из кратера                 | +13,0                     |
| $\text{NH}_4\text{Cl}$       | Камчатка, гребень побочного кратера           | +13,0                     |
| $\text{NH}_4\text{Cl}$       | Ключевская сопка, возгоны на лавовых потоках  | +2,0                      |
| $\text{NH}_4\text{Cl}$       | То же   | -5,0                      |
| $\text{NH}_4\text{Cl}$       | » »   | -8,0                      |
| $\text{NH}_4\text{Cl}$       | » »   | -10,0                     |
| $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ | Южная Камчатка, хр. Камбальный, гидрофумаролы | -25,0                     |
| $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ | То же   | -26,0                     |
| $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ | » »   | -31,0                     |

значение. Наблюдаются вариации изотопного состава азота в живом веществе, каменных углях, нефти и природных газах. Распространенность различных соединений азота и его изотопный состав в горных породах могут дать ценные указания относительно степени метаморфизма горных пород. Наиболее существенные вариации изотопного состава азота изверженных горных пород и вулканических эксгалаций приведены в табл. 89, 90.

### ИЗОТОПЫ КИСЛОРОДА

Кислород — исключительно активный химический элемент. Он играет ведущую роль во многих геохимических процессах. Изотопный состав кислорода дистиллированной воды по определениям А. Нира (Nier, 1950) выражается следующими величинами:  $^{16}\text{O}$  — 99,759%;  $^{17}\text{O}$  — 0,0374%;  $^{18}\text{O}$  — 0,203%.

Изотоп  $^{16}\text{O}$  дважды магический, резко преобладает. Ввиду своей химической активности кислород обнаруживает заметные колебания изотопного состава. В связи с низким распространением изотопа  $^{17}\text{O}$  при геохимических исследованиях им пренебрегают, и большинство измерений изотопного состава кислорода связано главным образом с установлением отношения  $^{16}\text{O} : ^{18}\text{O}$ . Это отношение в атмосферном кислороде равно 489,3 (рис. 10).

В каменных метеоритах отношение  $^{16}\text{O} : ^{18}\text{O} = 495,6$ , что совпадает в пределах экспериментальных ошибок с теми значениями, которые обнаружены для глубинных магматических горных пород.

Относительная распространенность  $^{18}\text{O}$  в атмосферном кислороде равна 1,03, а для озерной воды 1,00. Установлено также, что атмосферный кислород тяжелее кислорода вод океана, для которого относительная распространенность  $^{18}\text{O}$  равна 1,005.

Изотопный состав кислорода различных природных вод обычно рассматривается в связи с изотопным составом водорода. Различные сочетания протия и дейтерия с  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$  дают девять изотопных разновидностей молекул природной воды. Измерения содержания  $^{18}\text{O}$  в озерной и морской воде обнаружили заметные расхождения. Так, отношение  $^{16}\text{O} : ^{18}\text{O}$  в воде Великих Озер в Северной Америке равно 504,0, а для океанической воды 502,0.

Изменение изотопного состава кислорода  $^{16}\text{O} : ^{18}\text{O}$  в горных породах различного происхождения представлено на рис. 11.

А. Виноградов и Р. Тейс на опытах показали, что изотопный состав фотосинтетического кислорода отличается от состава кислорода воздуха и воды. Однако основное количество фотосинтетического кислорода поступает из воды. Но в процессе фотосинтеза происходит некоторое фракционирование изотопов

кислорода. Тяжелый изотоп кислорода  $^{18}\text{O}$  концентрируется преимущественно в клетчатке растений, в результате чего получается его некоторый недостаток в кислороде, выделенном при фотосинтезе.

Первоначальное отношение  $^{16}\text{O} : ^{18}\text{O}$  принимается таким, каким оно установлено для базальтовых пород. При выветривании и седиментации происходит

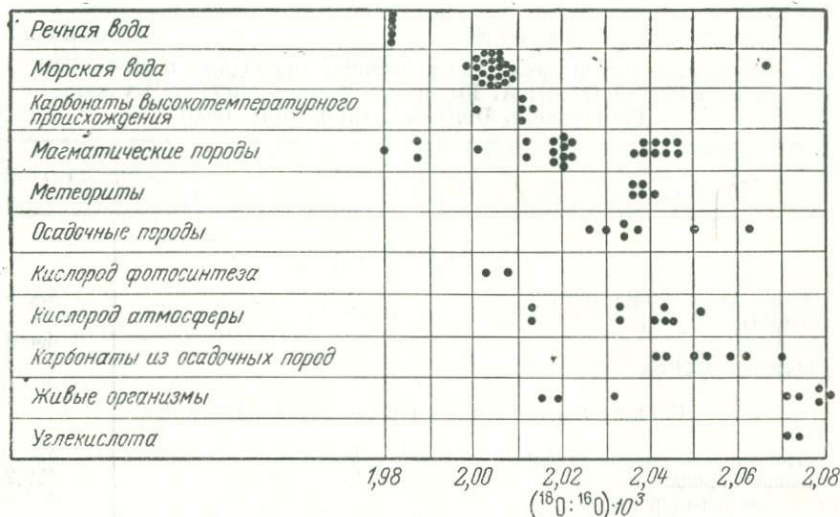


Рис. 10. Изотопные отношения кислорода в различных природных объектах (Polanski, 1961)

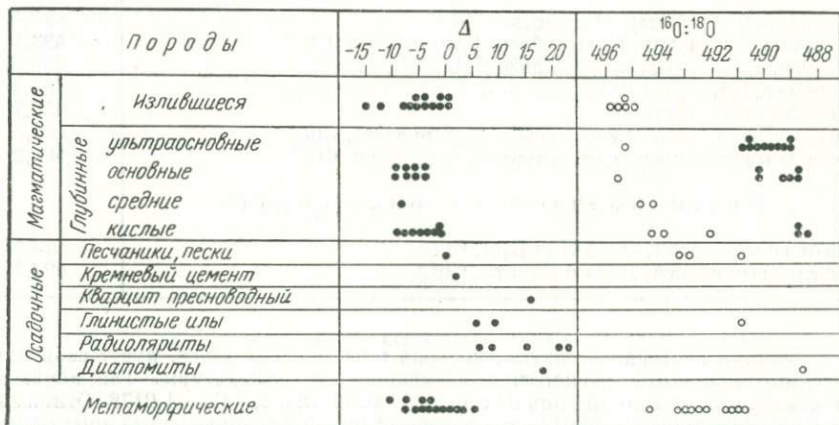


Рис. 11. Изотопные отношения кислорода в горных породах (Polanski, 1961)

изотопный обмен между кремнеземом и водой, что повышает содержание  $^{18}\text{O}$ . В морских карбонатных осадках кислород находится в изотопном равновесии с кислородом карбонатного иона в растворах, из которых выпадают осадки. Выпадающий из морской воды карбонат кальция в условиях, близких к равновесным, будет обогащаться изотопом  $^{18}\text{O}$  согласно реакции



Эта реакция зависит от температуры. На ней основан изотопно-кислородный метод определения температур образования карбонатных осадков, который будет рассмотрен ниже.

Наиболее существенные данные по изотопному составу кислорода ( $^{16}\text{O} : ^{18}\text{O}$ ) приведены в табл. 91.

Таблица 91

Изотопный состав кислорода различных природных образований по К. Ранкама (1956); А. Виноградову, Е. Донцовой, Чупахину (Vinogradov, Dontsova, Chupakhin, 1960)

| Порода   | $^{16}\text{O} : ^{18}\text{O}$ |
|--|---------------------------------|
| Метеориты  |                                 |
| Железо-каменные (палласиты)                      | 490,4                           |
| Ахондриты  | 490,1                           |
| Хондриты   | 490,3                           |
| Углистые хондриты                                | 488,9                           |
| Изверженные горные породы                        |                                 |
| Ультраосновные породы (дуниты)                   | 490,0                           |
| Основные породы                                  | 489,2                           |
| Кислые породы (граниты)                          | 488,0                           |
| Осадочные горные породы                          |                                 |
| Песчаник, Сант-Петер, Миннесота, США             | 493,4                           |
| Аркозовый песчаник, Нью-Хейвен, Коннектикут, США | 493,1                           |
| Диатомит, Санта-Барбара, Калифорния, США         | 489,8                           |
| Доломит, Ниагара, США                            | 486,7                           |
| Ракушечный известняк                             | 486,7                           |
| Осадочные железные руды, Киватин, Миннесота, США | 504,0                           |
| Осадочные железные руды, Клинтон, Нью-Йорк, США  | 496,2                           |
| Метаморфические горные породы                    |                                 |
| Гнейс из мигматита, Литл-Илк-Кри, США            | 500,6                           |
| Хлоритовый сланец, Датчес Каунти, США            | 492,4                           |

Реакция изотопного обмена, которая представлена выше, имеет свои определенные константы равновесия, зависящие от температуры. Так, константа равновесия такой реакции при  $0^\circ\text{C}$  равна 1,0220, при  $25^\circ\text{C}$  — 1,0176. Отношение этих констант равно 1,0043, что соответствует изменению изотопного состава кислорода только на 0,43% при изменении температуры от  $0^\circ$  до  $25^\circ$ , или изменение температуры на каждый градус соответствует изменению изотопного состава кислорода только на 0,017%. Это требует чувствительного и точного метода определения изотопов кислорода в исследуемом образце.

В ходе исследований установлена прямолинейная зависимость между температурой, при которой отлагаются осадки, и содержанием в них  $^{18}\text{O}$ . Эта зависимость выражается уравнением

$$t = 14,8 - 5,43 \Delta (^{18}\text{O}),$$

где  $t$  — температура,  $^\circ\text{C}$ ;  
14,8 и 5,43 — константы;

$\Delta(^{18}\text{O})$  — разность между отношениями масс 46 и 44 (соответственно для  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  и  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ) в образце карбоната кальция. Значение  $\Delta(^{18}\text{O})$  дается в тысячных долях

$$\Delta(^{18}\text{O}) = 1000 \left( \frac{R_{\text{образца}}}{R_{\text{стандарта}}} - 1 \right),$$

где  $R = ^{18}\text{O} : ^{16}\text{O}$ .

Таким образом, изотопно-кислородный метод применяется для определения температур образования некоторых карбонатных минералов в сравнительно узком интервале температур. В настоящее время он находит широкое применение в палеогеографических исследованиях.

При исследовании этим методом необходимо знать содержание  $^{18}\text{O}$  в воде. Проверить первичное содержание  $^{18}\text{O}$  в воде, из которой выпали карбонаты, вероятно, можно при помощи сульфатных и фосфатных термометров. В комбинации с карбонатным термометром фосфатный термометр с различным температурным коэффициентом даст возможность исключить фазу воды и колебания изотопного состава кислорода в зависимости от степени солености воды.

### ИЗОТОПЫ СЕРЫ

Характерной особенностью геохимии серы является ее способность выступать в нескольких валентных состояниях:  $\text{S}^{2-}$  — в сульфидах, сульфосолях и сероводороде и  $\text{S}^{6+}$  — в сульфатах. Нулевая валентность появляется у самородной серы. Весьма малую роль играет ион в соединении  $\text{SO}_2$  в вулканических

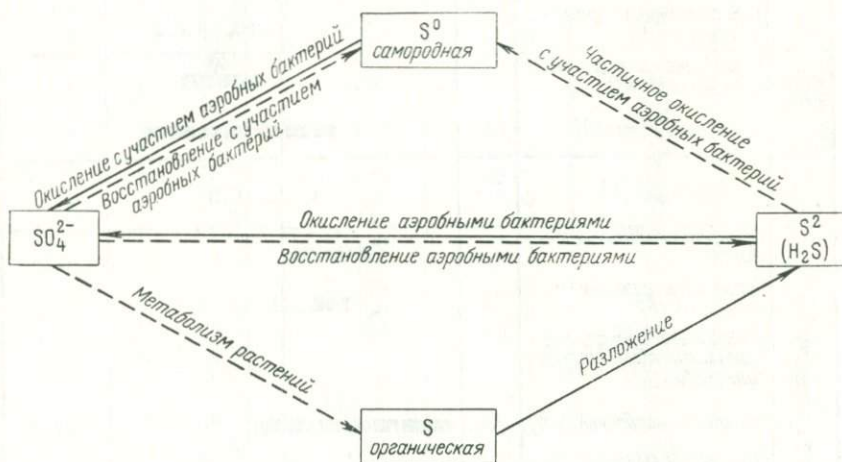


Рис. 12. Схема геохимического круговорота серы с участием организмов

эманациях. Естественно, что при многочисленных реакциях в условиях биосферы происходит некоторое фракционирование изотопного состава серы, связанное главным образом с обменными реакциями (рис. 12).

Природная сера состоит из четырех стабильных изотопов, которые в среднем имеют следующее распространение:  $^{32}\text{S} = 95,1\%$ ,  $^{33}\text{S} = 0,74\%$ ,  $^{34}\text{S} = 4,2\%$ ,  $^{36}\text{S} = 0,016\%$ .

Исследования последнего времени показали, что у серы природных объектов обнаруживаются значительные колебания изотопного состава, что вытекает из ее геохимических свойств, отмеченных выше. Максимальный разброс изотопных отношений серы достигает:  $^{32}\text{S} : ^{33}\text{S} = 2,5\%$ ,  $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S} = 5\%$ ,  $^{32}\text{S} : ^{36}\text{S} = 10\%$ .

Однако большая часть работ по определению изотопного состава серы относится к измерению только двух главных изотопов природной серы, отношения  $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S}$ . Общая картина изменений этого отношения представлена на рис. 13. Наибольшим постоянством изотопного состава отличается сера троилита метеоритов.

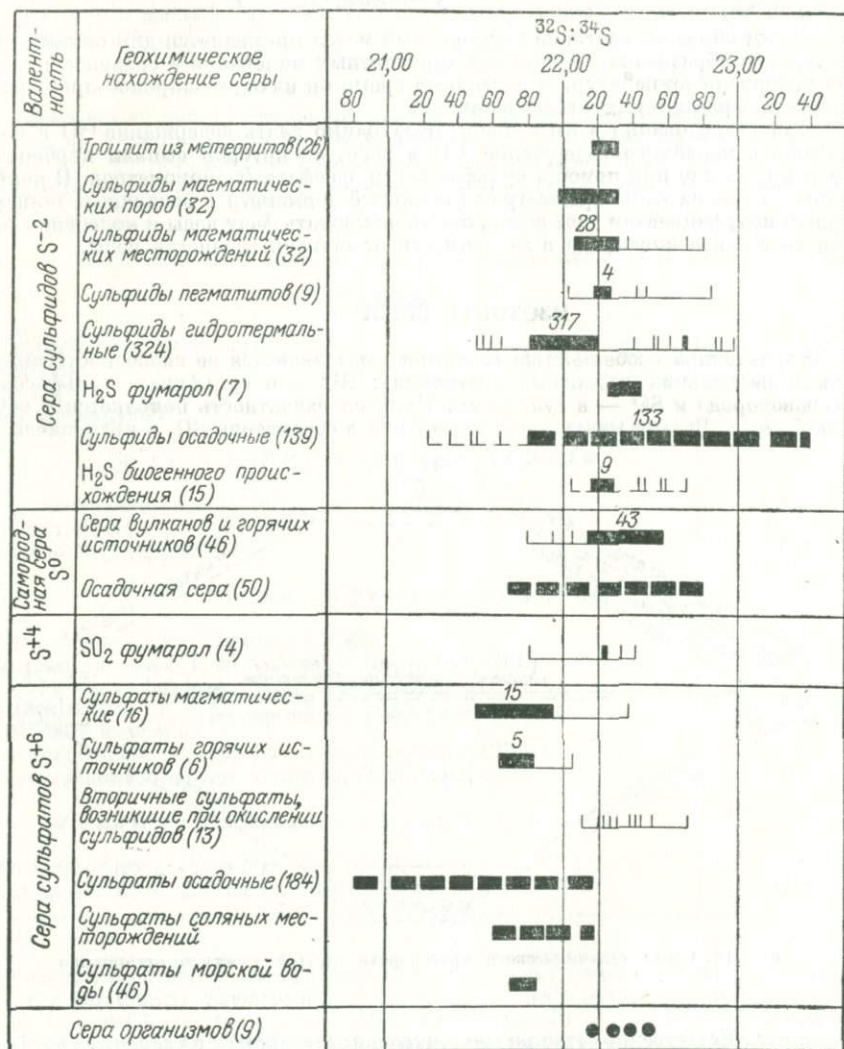


Рис. 13. Изменение отношений изотопов серы ( $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S}$ ) в природе (Polanski, 1961)

Отношение  $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S}$  в этом материале равно 22,20. Дополнительные измерения отношения  $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S}$  в материале каменных и железных метеоритов показало близкое сходство с троилитом. В глубинных магматических породах Земли отношение  $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S}$  приближается к метеоритному. На этом основании многие исследователи принимают отношение изотопного состава первичной серы  $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S} = 22,20$ . В осадочных сульфатах наблюдается обогащение изотопом  $^{34}\text{S}$ ,

Зависимость отношения  $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S}$  от величины  $\delta^{34}\text{S}$   
 (за основу принята сера метеорита Кавьон Диабло, для которой  
 $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S} = 22,220$ ,  $\delta^{34}\text{S} = 0,00$  ‰) по В. А. Гриненко (1974)

| $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S}$ | $\delta^{34}\text{S}$ | $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S}$ | $\delta^{34}\text{S}$ | $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S}$ | $\delta^{34}\text{S}$ |
|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 21,100                          | +53,08                | 21,520                          | +32,53                | 21,940                          | +12,76                |
| ,110                            | 52,58                 | ,530                            | +32,05                | ,950                            | 12,30                 |
| ,120                            | 52,08                 | ,540                            | 31,57                 | ,960                            | 11,84                 |
| ,130                            | 51,59                 | ,550                            | 31,09                 | ,970                            | 11,38                 |
| ,140                            | 51,09                 | ,560                            | 30,61                 | ,980                            | 10,92                 |
| ,150                            | 50,58                 | ,570                            | 30,13                 | ,990                            | 10,46                 |
| ,160                            | 50,10                 | ,580                            | 29,66                 |                                 |                       |
| ,170                            | 49,60                 | ,590                            | 29,18                 | 22,000                          | 10,00                 |
| ,180                            | 49,10                 |                                 |                       | ,010                            | 9,54                  |
| ,190                            | 48,61                 | 21,600                          | 28,70                 | ,020                            | 9,08                  |
|                                 |                       | ,610                            | 28,23                 | ,030                            | 8,63                  |
| 21,200                          | 48,11                 | ,620                            | 27,75                 | ,040                            | 8,17                  |
| ,210                            | 47,62                 | ,630                            | 27,28                 | ,050                            | 7,71                  |
| ,220                            | 47,13                 | ,640                            | 26,80                 | ,060                            | 7,25                  |
| ,230                            | 46,63                 | ,650                            | 26,33                 | ,070                            | 6,80                  |
| ,240                            | 46,14                 | ,660                            | 25,85                 | ,080                            | 6,34                  |
| ,250                            | 45,65                 | ,670                            | 25,38                 | ,090                            | 5,89                  |
| ,260                            | 45,16                 | ,680                            | 24,91                 |                                 |                       |
| ,270                            | 44,66                 | ,690                            | 24,44                 | 22,100                          | 5,43                  |
| ,280                            | 44,17                 |                                 |                       | ,110                            | 4,98                  |
| ,290                            | 43,88                 | 21,700                          | 23,96                 | ,120                            | 4,52                  |
|                                 |                       | ,710                            | 23,49                 | ,130                            | 4,07                  |
| 21,300                          | 43,19                 | ,720                            | 23,02                 | 22,140                          | 3,61                  |
| ,310                            | 42,70                 | ,730                            | 22,55                 | ,150                            | 3,16                  |
| ,320                            | 42,21                 | ,740                            | 22,08                 | ,160                            | 2,71                  |
| ,330                            | 41,73                 | ,750                            | 21,61                 | ,170                            | 2,26                  |
| ,340                            | 41,24                 | ,760                            | 21,14                 | ,180                            | 1,80                  |
| ,350                            | 40,75                 | ,770                            | 20,67                 | ,190                            | 1,35                  |
| ,360                            | 40,26                 | ,780                            | 20,20                 |                                 |                       |
| ,370                            | 39,78                 | ,790                            | 19,73                 | 22,200                          | 0,90                  |
| ,380                            | 39,29                 |                                 |                       | ,210                            | 0,45                  |
| ,390                            | 38,80                 | 21,800                          | 19,27                 | ,220                            | 0,00                  |
|                                 |                       | 21,810                          | 18,80                 | ,230                            | -0,45                 |
| 21,400                          | 38,32                 | ,820                            | 18,33                 | ,240                            | 0,90                  |
| ,410                            | 37,83                 | ,830                            | 17,87                 | ,250                            | 1,35                  |
| ,420                            | 37,35                 | ,840                            | 17,40                 | ,260                            | 1,80                  |
| ,430                            | 37,35                 | ,850                            | 16,93                 | ,270                            | 2,25                  |
| ,440                            | 36,88                 | ,860                            | 16,47                 | ,280                            | 2,69                  |
| ,450                            | 35,90                 | ,870                            | 16,00                 | ,290                            | 3,14                  |
| ,460                            | 35,42                 | ,880                            | 15,54                 |                                 |                       |
| ,470                            | 34,93                 | ,890                            | 15,08                 | 22,300                          | 3,59                  |
| ,480                            | 34,45                 |                                 |                       | ,310                            | 4,03                  |
| ,490                            | 33,97                 | 21,900                          | 14,61                 | ,320                            | 4,48                  |
|                                 |                       | ,910                            | 14,15                 | ,330                            | 4,93                  |
| 21,500                          | 33,49                 | ,920                            | 13,69                 | ,340                            | 5,37                  |
| ,510                            | 33,01                 | ,930                            | 13,22                 | ,350                            | 5,82                  |
| 22,360                          | -6,26                 | 22,840                          | -27,15                | 23,320                          | -47,17                |
| ,370                            | 6,71                  | ,850                            | 27,57                 | ,330                            | 47,58                 |
| ,380                            | 7,15                  | ,860                            | 28,00                 | ,340                            | 47,99                 |
| ,390                            | 7,59                  | ,870                            | 28,42                 | ,350                            | 48,39                 |
|                                 |                       | ,880                            | 28,85                 | ,360                            | 48,80                 |

| 22S : 24S | δ24S   | 22S : 24S | δ24S   | 22S : 24S | δ24S   |
|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| 22,400    | 8,04   | ,890      | 29,27  | ,370      | 49,21  |
| ,410      | 8,48   |           |        | ,380      | 49,62  |
| ,420      | 8,92   | 22,900    | 29,69  | ,390      | 50,02  |
| ,430      | 9,36   | ,910      | 30,12  |           |        |
| ,440      | 9,80   | ,920      | 30,54  | 23,400    | 50,43  |
| ,450      | 10,25  | ,930      | 30,96  | ,410      | 50,83  |
| ,460      | 10,69  | ,940      | 31,39  | ,420      | 51,24  |
| ,470      | 11,13  | ,950      | 31,81  | ,430      | 51,64  |
| ,480      | 11,57  | ,960      | 32,23  | ,440      | 52,05  |
| ,490      | 12,01  | ,970      | 32,65  | ,450      | 52,45  |
|           |        | ,980      | 33,07  | ,460      | 52,86  |
| 22,500    | 12,44  | ,990      | 33,49  | ,470      | 53,26  |
| ,510      | 12,88  |           |        | ,480      | 53,66  |
| ,520      | 13,32  | 23,000    | 33,91  | ,490      | 54,07  |
| ,530      | 13,76  | ,010      | 34,33  |           |        |
| ,540      | 14,20  | ,020      | 34,75  | 23,500    | 54,47  |
| ,550      | 14,63  | ,030      | 35,17  | ,510      | 54,87  |
| ,560      | 15,07  | ,040      | 35,59  | ,520      | 55,27  |
| ,570      | 15,51  | ,050      | 36,01  | ,530      | 55,67  |
| ,580      | 15,94  | ,060      | 36,43  | ,540      | 56,08  |
| ,590      | 16,38  | ,070      | 36,84  | ,550      | 56,48  |
|           |        | ,080      | 37,26  | ,560      | 56,88  |
| 22,600    | -16,81 | 23,090    | -37,68 | 23,570    | -57,28 |
| ,610      | 17,25  |           |        | ,580      | 57,68  |
| ,620      | 17,68  | 23,100    | 38,10  | ,590      | 58,08  |
| ,630      | 18,12  | ,110      | 38,51  |           |        |
| ,640      | 18,55  | ,120      | 38,93  | 23,600    | 58,48  |
| ,650      | 18,98  | ,130      | 39,34  | ,610      | 58,87  |
| ,660      | 19,42  | ,140      | 39,76  | ,620      | 59,27  |
| ,670      | 19,85  | ,150      | 40,17  | ,630      | 59,67  |
| ,680      | 20,28  | ,160      | 40,59  | ,640      | 60,07  |
| ,690      | 20,71  | ,170      | 41,00  | ,650      | 60,47  |
|           |        | ,180      | 42,42  | ,660      | 60,86  |
| 22,700    | 21,15  | ,190      | 41,83  | ,670      | 61,26  |
| ,710      | 21,58  |           |        | ,680      | 61,66  |
| ,720      | 22,01  | 23,200    | 42,24  | ,690      | 62,05  |
| ,730      | 22,44  | ,210      | 42,65  |           |        |
| ,740      | 22,87  | ,220      | 43,07  | 23,700    | 62,45  |
| ,750      | 23,30  | ,230      | 43,48  | ,710      | 62,84  |
| ,760      | 23,73  | ,240      | 43,89  | ,720      | 63,24  |
| ,770      | 24,16  | ,250      | 44,30  | ,730      | 63,63  |
| ,780      | 24,58  | ,260      | 44,71  | ,740      | 64,03  |
| ,790      | 25,01  | ,270      | 45,12  | ,750      | 64,42  |
|           |        | ,280      | 45,53  | ,760      | 64,82  |
| 22,800    | 25,55  | ,290      | 45,94  | ,770      | 65,21  |
| ,810      | 25,87  |           |        | ,780      | 65,60  |
| ,820      | 26,29  | 23,300    | 46,35  | ,790      | 65,99  |
| ,830      | 26,72  | ,310      | 46,76  |           |        |

и отношение  $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S}$  находится здесь в пределах 20,80—22,00. Это обогащение можно объяснить следующей обменной реакцией



для которой константа равновесия равна 1,074 при температуре +25° С. Общее в геохимическом поведении изотопов серы то, что  $^{34}\text{S}$  (и  $^{36}\text{S}$ ) концентрируется при неорганических процессах, а  $^{32}\text{S}$  — при биологических процессах. Эти процессы могли повторяться неоднократно и вызвать наблюдаемое сейчас разделение изотопов серы в различных природных объектах.

В общем в первом приближении можно допустить, что сера с отношением  $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S}$  больше 22,30 — биогенного происхождения, а меньше 22,18 — небиегенного происхождения.

Наиболее существенные данные по отношениям изотопов серы приведены в табл. 92 и 93.

Изотопный состав серы часто характеризуется также величиной уплотнения (в ‰)

$$\delta^{34}\text{S} = \frac{(^{34}\text{S} : ^{32}\text{S})_{\text{образец}} - (^{34}\text{S} : ^{32}\text{S})_{\text{стандарт}}}{(^{34}\text{S} : ^{32}\text{S})_{\text{стандарт}}} \cdot 1000.$$

В качестве стандарта обычно принимают изотопный состав метеоритной серы (Каньон Дябло).

Таблица 93

Отношения изотопов серы в некоторых породах по Оулу (Ault, 1959)

| Породы                                   | Среднее $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S}$ | Породы                                       | Среднее $^{32}\text{S} : ^{34}\text{S}$ |
|--|---|--|---|
| Метеориты                                |   | Габбро                                       | 22,15                                   |
| Железный метеорит, Каньон Дябло          | 22,22                                   | Пироксенит                                   | 22,26                                   |
| Железный метеорит, Ксиквипилко, Мексика  | 22,20                                   | Перидотит                                    | 22,22                                   |
| Железный метеорит, Толука, Мексико       | 22,23                                   | Норит  | 22,11                                   |
| Железный метеорит, Ричленд               | 22,23                                   | Дунит  | 22,20                                   |
| Железный метеорит, Одесса, Техас         | 22,18                                   | Андезитовая лава                             | 22,13                                   |
| Железный метеорит, Уотервилл             | 22,20                                   | Диорит                                       | 22,11                                   |
| Железный метеорит, Гоамус, Африка        | 22,22                                   | Гранодиорит                                  | 22,24                                   |
| Железо-каменный метеорит, Брэнам, Канзас | 22,23                                   | Монзонит                                     | 22,09                                   |
| Изверженные породы                       |   | Свенит                                       | 22,08                                   |
| Диабаз и базальт                         | 22,16                                   | Фонолит                                      | 22,14                                   |
|  |   | Другие минеральные образования               |   |
|  |   | Самородная сера вулканического происхождения | 22,32                                   |
|  |   | Сульфаты океанической воды                   | 21,76                                   |
|  |   | Серульфиды осадочных пород                   | 22,49                                   |
|  |   | Сероводород Черного моря                     | 22,71                                   |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемов Ю. М., Стрижков В. П., Устинов В. И. Изотопные отношения  $\text{Ca}^{40}/\text{Ca}^{44}$  и  $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$  в некоторых карбонатных породах. — «Геохимия», 1966, № 11, с. 1355—1358.
- Астон Ф. В. Масс-спектры и изотопы. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1948. 300 с.
- Виноградов А. П., Кутюрин В. М., Заворожнев И. К. Фракционирование изотопов атмосферного кислорода. — «Геохимия», 1959, № 3, с. 760—770.
- Виноградов А. П., Гриненко В. А., Устинов В. И. Изотопный состав соединений серы в Черном море. — «Геохимия», 1962, № 10, с. 851—873.
- Вольнец В. Ф., Заворожнев И. К., Флоренский К. П. Об изотопном составе азота в земной коре. — «Геохимия», 1967, № 5, с. 510—516.
- Галимов Э. М. Геохимия стабильных изотопов углерода. М., «Недра», 1968. 224 с.
- Галимов Э. М. Изотопы углерода в нефтегазовой геологии. М., «Недра», 1973. 384 с.
- Галимов Э. М., Милдисов А. А., Рогов А. Б. Вариации изотопного состава карбонатного и органического углерода в истории Земли. — «Геохимия», 1975, № 3, с. 323—342.
- Гриненко В. А., Гриненко Л. Н. Геохимия изотопов серы. М., «Наука», 1974. 274 с.
- Донцова Е. И. Опыт применения изотопных отношений кислорода в геохимических исследованиях. — В кн.: Химия земной коры, М., 1964, т. 2, с. 631—637.
- Ингерсон И. Нерадиоогенные изотопы в геологии. — В кн.: Изотопы в геологии. М., 1954, с. 9—30.
- Крейг Г. Геохимия стабильных изотопов углерода. — В кн.: Изотопы в геологии. М., 1954, с. 51—80.
- Миллер Ю. М., Устинов В. И., Артемов Ю. М. Масс-спектрометрический метод определения изотопных вариаций кальция. — «Геохимия», 1966, № 10, с. 1169—1174.
- Природные изотопы в гидросфере. М., «Наука», 1975. 292 с.
- Ранкама К. Изотопы в геологии. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1956. 535 с.
- Устинов В. И., Артемов Ю. М. Определение изотопного состава магния масс-спектрометрическим методом. — «Геохимия», 1965, № 5, с. 541—544.
- Фридлендер Г., Кеннеди Дж., Миллер Дж. Ядерная химия и радиохимия. Пер. с англ. М., «Мир», 1967. 568 с.
- Ault W. U. Isotopic fractionation of sulfur in geochemical processes. Research in Geochemistry. New York, 1959. 500 p.
- Craig H., Miller S. L., Wasserburg G. J. (editors). Isotopic and Cosmic Chemistry. Amsterdam, 1964. 540 p.
- Hoering T. C., Moore H. E. The isotopic composition of the nitrogen in natural gases and associated crude oil. — «Geochimica et Cosmochimica Acta». 1958, v. 13, p. 225—236.
- Hoffs J. Stable Isotope Geochemistry. Springer — Verlag, 1973. 140 p.
- Mayne K. J. Natural variations in the nitrogen abundance ratio in igneous rocks. — «Geochimica et Cosmochimica Acta». 1957, v. 12, No. 3, p. 250—260.
- Nier A. O. A redetermination of the relative abundance of the isotopes, of carbon, nitrogen, oxygen, argon and potassium. — «Physical Review», 1950, v. 77, p. 789—796.
- Parwel A., Ubisch H., Wickmann F. F. On the variations in the relative abundance of boron isotopes in nature. — «Geochimica et Cosmochimica Acta». 1956, v. 10, p. 185—192.
- Parwel A., Ruhge R., Wickmann F. E. Natural variations in the relative abundance of the nitrogen isotopes. — «Geochimica et Cosmochimica Acta». 1957, v. 11, p. 165—170.
- Polanski A. Geochemia Izotopow. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1961. 392 p.
- Ranikama K. Advances in Isotope Geology. Pergamon Press, London, 1963. 450 p.
- Suess H. E. and Urey H. C. Abundances of the elements. — «Reviews of Modern Physics.» 1956, v. 28, No 1, p. 3—20.
- Vinogradov A. P., Donцова E. I., Chupakhin M. S. Isotopic ratios of oxygen in meteorites and igneous rocks. — «Geochimica et Cosmochimica Acta». 1960, v. 18, No 3, p. 670—680.
- Weber J. N. Possible changes in the isotopic composition of the oceanic and atmospheric carbon reservoir over geologic time. — «Geochimica et Cosmochimica Acta». 1967, v. 31, No 12, p. 2343—2352.

# Глава VI

## ЯДЕРНАЯ ГЕОХРОНОЛОГИЯ

### ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Ядерная геохронология базируется на ядерном распаде элементов в минералах и горных породах, что приводит к накоплению определенных продуктов распада в течение геологического времени. Эта новая отрасль геологической науки стала развиваться после открытия радиоактивности и изучения геохимии радиоактивных элементов.

Методы ядерной геохронологии, или радиологические методы измерения геологического времени, основываются на использовании основного закона радиоактивного распада, который имеет статистический характер. Согласно этому закону, количество распавшихся атомов за единицу времени пропорционально первоначальному числу атомов.

$$N_0 = N_t e^{\lambda t}$$

где  $N_0$  — первоначальное число атомов;

$N_t$  — число атомов по истечении времени  $t$ ;

$\lambda$  — постоянная радиоактивного распада;

$e$  — основание натуральных логарифмов ( $e = 2,71828182$ ).

Постоянная, или константа радиоактивного распада  $\lambda$  обозначает, какая часть атомов данного радиоактивного элемента распадается за единицу времени (год, сутки, часы, минуты, секунды) по отношению к общему первоначальному количеству, т. е.  $\lambda = dN/N$ .

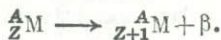
Для более четкого представления о характере ядерного распада вводят понятие периода полураспада  $T$ , который равен тому промежутку времени, в течение которого любое первоначальное количество радиоактивного вещества уменьшается наполовину. Связь между константой  $\lambda$  и периодом полураспада  $T$  может быть выражена следующим образом:

$$N = \frac{N}{2} e^{\lambda T}; 2 = e^{\lambda T}; \ln 2 = \lambda T;$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

При измерении возраста минералов используются следующие естественные типы ядерных превращений:  $\beta$ -распад, электронный захват,  $\alpha$ -распад и спонтанное осколочное деление тяжелых ядер.

Превращение атомов химических элементов при  $\beta$ -распаде определяется правилом сдвига: образующийся при распаде новый элемент занимает в таблице Д. И. Менделеева следующую клетку вправо от родоначального  $\beta$ -активного элемента.  $\beta$ -Активность атомных ядер можно рассматривать как распад одного ядерного нейтрона на протон и электрон (плюс нейтрино)



Явление электронного захвата как бы противоположно  $\beta$ -распаду. Оно заключается в самопроизвольном поглощении орбитального электрона ядром атома. Обычно происходит поглощение электрона с ближайшей к ядру К-оболочки. Отсюда данный процесс называют К-захватом. При электронном захвате атомный номер элемента ( $Z$ ) уменьшается на единицу, и новый элемент займет место в таблице Д. И. Менделеева на одну клетку левее. Среди естественных неустойчивых изотопов существуют такие, которые одновременно испытывают  $\beta$ -распад и К-захват. К ним относятся калий-40 и лантан-138.

Схему электронного захвата можно представить себе в следующем виде



Наиболее тяжелые атомные ядра, располагающиеся в конце периодической системы элементов, подвергаются  $\alpha$ -распаду. После  $\alpha$ -распада порядковый номер элемента уменьшается на 2, а массовое число на 4. Отсюда новый элемент, возникший после  $\alpha$ -распада, займет место в таблице Д. И. Менделеева на две клетки

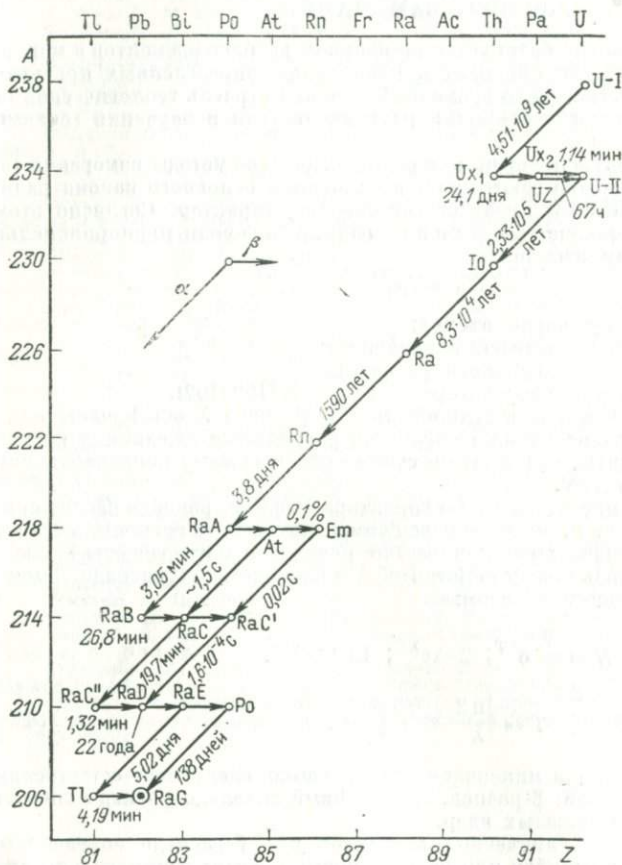
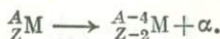


Рис. 14. Радиоактивный ряд урана — радия

влево. Обычно  $\alpha$ -активные изотопы группируются в естественные радиоактивные ряды. Схему  $\alpha$ -распада элемента можно изобразить следующим образом:

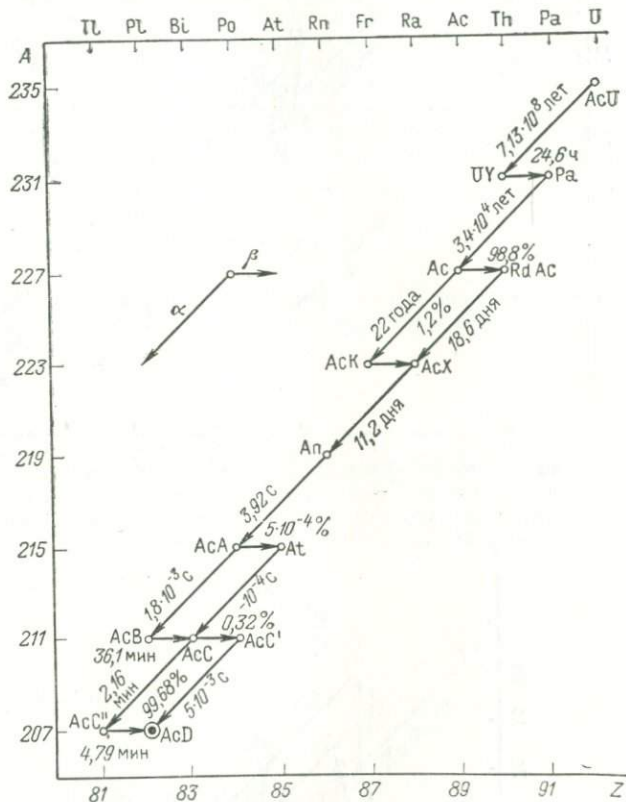


Спонтанное деление тяжелых ядер заключается в их раскалывании на два осколка, которые с огромной скоростью разлетаются в разные стороны. Массы осколка соответствуют изотопам средней части периодической системы примерно от галлия ( $Z = 31$ ) до гадолиния ( $Z = 64$ ). Первоначальные продукты деления обычно обладают избытком нейтронов и избавляются от них путем  $\beta$ -распада. При делении выбрасываются также два-три свободных нейтрона. Одним из обильных продуктов спонтанного деления урана является ксенон, накапливающийся в древних урансодержащих материалах. На этом основан ксеноновый

метод определения возраста, который ввиду методических трудностей используется редко.

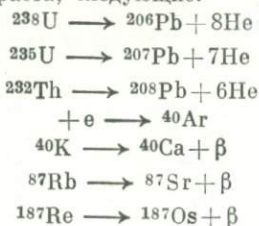
Тяжелые радиоактивные изотопы конца периодической системы Д. И. Менделеева образуют радиоактивные ряды. Каждый ряд представляет собой цепь изотопов, последовательно образующихся друг от друга путем  $\alpha$ - и  $\beta$ -распада и оканчивающих свой распад на изотопах свинца  $^{206}\text{Pb}(\text{RaG})$ ,  $^{207}\text{Pb}(\text{AcD})$ ,  $^{208}\text{Pb}(\text{ThD})$ . Схемы распада радиоактивных рядов представлены на рис. 14—17.

Рис. 15. Радиоактивный ряд актиноурана



Названия рядов происходят от родоначальных изотопов. Так, мы имеем естественные ряды урана-238 (радия), урана-235 (актиноурана), тория-232.

Геологический возраст измеряется путем определения содержания радиоактивных элементов и продуктов их распада в минералах и горных породах. По любой паре радиоактивного и радиогенного стабильного изотопа можно определить возраст, если известна скорость распада радиоактивного изотопа. Основные типы естественных ядерных превращений, которые используются для определения геологического возраста, следующие:



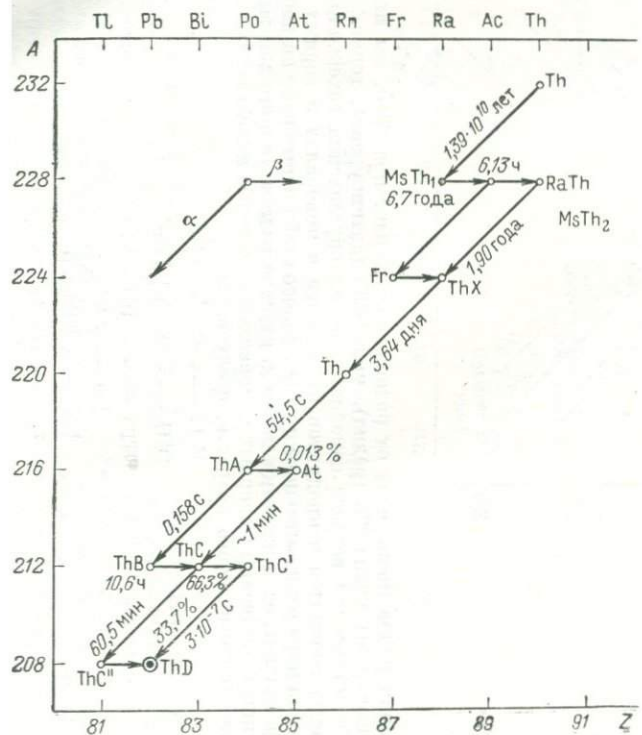


Рис. 16. Радиоактивный ряд тория

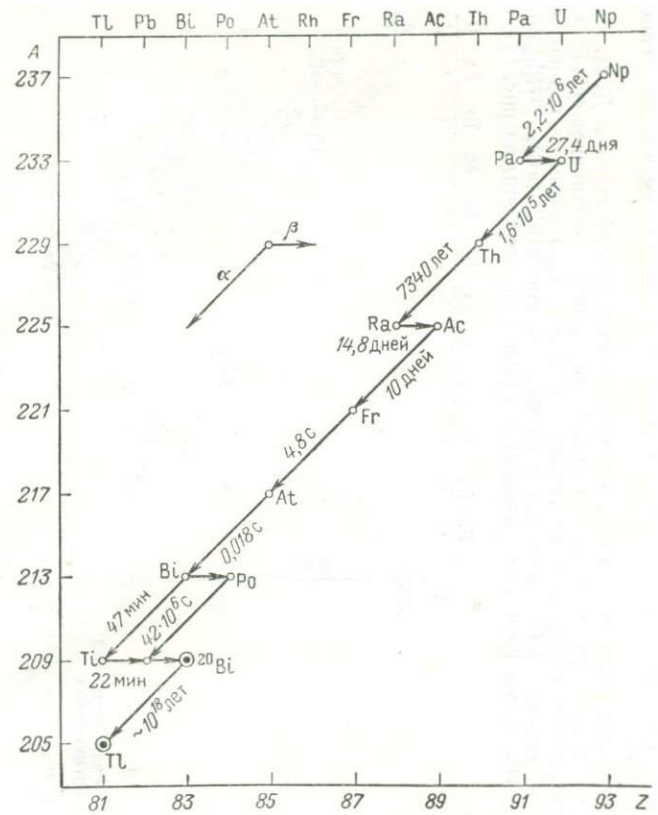


Рис. 17. Радиоактивный ряд нептуния

В зависимости от конечных продуктов распада основные методы ядерной геохронологии называются: свинцовый, гелиевый, аргоновый, стронциевый и т. п. При определении возраста древних геологических образований используются в основном три радиологических метода: свинцовый, аргоновый и стронциевый. Наиболее широко распространен аргоновый метод.

Наряду с этими методами все более широкое применение получают методы определения возраста молодых геологических образований: радиоуглеродный, радио-иониевый и др. Радиоуглеродный метод основан на измерении  $^{14}\text{C}$ , поступающего в живые организмы из атмосферы, где этот изотоп образуется под действием космических излучений. Метод дает возможность определять возраст углеродсодержащих остатков до 60 000 лет. Иониевый метод основан на измерении иония и радия в колонках морских грунтов, в которых установление равновесия в ряду  $\text{U} - \text{Io} - \text{Ra}$  является функцией времени. Метод позволяет определять возраст прослоек в кернах морских грунтов и оценивать скорость осадконакопления в пелагических частях океана.

## СВИНЦОВЫЙ МЕТОД

Свинцово-изотопный метод геохронологии основан на радиоактивном распаде изотопов урана и тория ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ). При вычислении возраста, исходя из экспоненциального закона, можно написать:

$$U_0 = Ue^{\lambda t},$$

где  $U_0$  — первоначальное количество атомов урана;

$U$  — количество по истечении времени  $t$ , равного возрасту минерала.

Поскольку после распада каждого атома урана остается один атом свинца, очевидно, что число распавшихся атомов урана равно числу образовавшихся атомов свинца или  $U_0 - U = \text{Pb}$ . Подставляя значение  $U_0$ , получаем

$$Ue^{\lambda t} - U = \text{Pb},$$

$$\text{Pb} = U(e^{\lambda t} - 1).$$

Для трех радиоактивных рядов имеем

$$^{206}\text{Pb} = ^{238}\text{U}(e^{\lambda_{238}t} - 1), \quad (1)$$

$$^{207}\text{Pb} = ^{235}\text{U}(e^{\lambda_{235}t} - 1), \quad (2)$$

$$^{208}\text{Pb} = ^{232}\text{Th}(e^{\lambda_{232}t} - 1), \quad (3)$$

где  $\lambda_{238}$ ,  $\lambda_{235}$ ,  $\lambda_{232}$  — соответственно константы радиоактивного распада урана, актиноурана и тория.

Разделив уравнение (2) на уравнение (1), получаем:

$$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}} = \frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}} \cdot \frac{(e^{\lambda_{235}t} - 1)}{(e^{\lambda_{238}t} - 1)}. \quad (4)$$

Поскольку во всех минералах и горных породах отношение  $^{235}\text{U} : ^{238}\text{U}$  в современную эпоху постоянно и равно 137,7, то можно написать:

$$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}} = \frac{1}{137,7} \cdot \frac{e^{\lambda_{235}t} - 1}{e^{\lambda_{238}t} - 1}. \quad (4a)$$

Таким образом, возраст урано-ториевых минералов может быть вычислен по четырем независимым изотопным отношениям:  $^{206}\text{Pb} : ^{238}\text{U}$ ;  $^{207}\text{Pb} : ^{235}\text{U}$ ;  $^{206}\text{Pb} : ^{208}\text{Pb}$ ;  $^{208}\text{Pb} : ^{232}\text{Th}$ .

В полученных расчетных формулах (1—4) значения радиоактивных и радиогенных изотопов выражены в атомных количествах. При выполнении химических анализов минералов аналитические данные обычно выражают в весовых количествах. Для получения атомных соотношений весовые количества делят на атомную массу данного изотопа. Если даны только весовые количества, то формулы (1—3) перепишутся в виде:

$$1,155 \frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}} = e^{\lambda \cdot 238t} = 1,$$

$$1,135 \frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}} = e^{\lambda \cdot 235t} - 1,$$

$$1,115 \frac{^{208}\text{Th}}{^{232}\text{Th}} = e^{\lambda \cdot 232t} - 1.$$

Вычисление возраста практически производится по заранее составленным номограммам, графикам и таблицам. Константы, принимаемые при расчетах, приведены в табл. 94. Расчетные таблицы по новейшим константам распада составили Л. Стифф, Т. Стерн, С. Оширо и Ф. Сентфли (табл. 95).

Таблица 94

Константы распада изотопов урана и тория

| Изотоп                            | $\lambda$ лет <sup>-1</sup> | T, лет               | Автор   |
|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------|---|
| $^{238}\text{U}$                  | $1,52 \cdot 10^{-10}$       | $4,56 \cdot 10^9$    | Ф. Вихман<br>(Wichman, 1939)  |
| $^{235}\text{U}$                  | $9,72 \cdot 10^{-10}$       | $7,14 \cdot 10^8$    |   |
| $^{232}\text{Th}$                 | $4,99 \cdot 10^{-11}$       | $1,39 \cdot 10^{10}$ |   |
| $^{230}\text{U} : ^{238}\text{U}$ |                             |                      |   |
| $139,0 \pm 1,0$                   |                             |                      | В. В. Мелентьев<br>(1955)   |
| $^{238}\text{U}$                  | $1,54 \cdot 10^{-10}$       | $4,5 \cdot 10^9$     |   |
| $^{235}\text{U}$                  | $9,72 \cdot 10^{-10}$       | $7,1 \cdot 10^8$     |   |
| $^{232}\text{Th}$                 | $4,99 \cdot 10^{-11}$       | $1,4 \cdot 10^{10}$  |   |
| $^{230}\text{U} : ^{238}\text{U}$ |                             |                      | Дж. Л. Калп,<br>Г. Л. Бейт,<br>В. С. Брокэр<br>(1959)                   |
| 139                               |                             |                      |   |
| $^{238}\text{U}$                  | $1,541 \cdot 10^{-10}$      | $4,49 \cdot 10^9$    |   |
| $^{235}\text{U}$                  | $9,722 \cdot 10^{-10}$      | $7,13 \cdot 10^8$    |   |
| $^{232}\text{Th}$                 | $4,987 \cdot 10^{-11}$      | $1,39 \cdot 10^{10}$ | Л. Стифф, Т. В. Стерн,<br>С. Оширо<br>(Stieff, Stern,<br>Oschiro, 1959) |
| $^{235}\text{U} : ^{238}\text{U}$ |                             |                      |   |
| $137,7 \pm 0,5$                   |                             |                      |   |
| $^{238}\text{U}$                  | $1,5369 \cdot 10^{-10}$     | $4,51 \cdot 10^9$    |   |
| $^{235}\text{U}$                  | $9,7216 \cdot 10^{-10}$     | $7,13 \cdot 10^8$    |   |
| $^{232}\text{Th}$                 | $4,8813 \cdot 10^{-11}$     | $1,42 \cdot 10^{10}$ |   |
| $^{235}\text{U} : ^{238}\text{U}$ |                             |                      |   |
| 137,7                             |                             |                      |   |

Данные наиболее согласованных возрастных значений по всем свинцово-изотопным отношениям приведены в табл. 96. Они могут рассматриваться как наиболее достоверные среди всех полученных свинцово-изотопных определений возраста радиоактивных минералов.

Вычисление возраста радиоактивных минералов (в млн. лет)  
по свинцово-изотопным отношениям  
по Л. Р. Стиффу, Т. В. Стерну, С. Оширо в Ф. Е. Сентфли  
(Stieff, Stern, Oshiro, 1959)

| $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ | Млн.<br>лет |
|--|-------------|--|-------------|---|-------------|---|-------------|
| 0,000153                                 | 1           | 0,000972                                 | 1           | 0,045955                                  | 1           | 0,000048                                  | 1           |
| 0,000307                                 | 2           | 0,001945                                 | 2           | 0,045974                                  | 2           | 0,000097                                  | 2           |
| 0,000461                                 | 3           | 0,002920                                 | 3           | 0,045993                                  | 3           | 0,000146                                  | 3           |
| 0,000614                                 | 4           | 0,003895                                 | 4           | 0,046012                                  | 4           | 0,000195                                  | 4           |
| 0,000768                                 | 5           | 0,004871                                 | 5           | 0,046030                                  | 5           | 0,000244                                  | 5           |
| 0,000922                                 | 6           | 0,005849                                 | 6           | 0,046049                                  | 6           | 0,000292                                  | 6           |
| 0,001075                                 | 7           | 0,006828                                 | 7           | 0,046068                                  | 7           | 0,000341                                  | 7           |
| 0,001229                                 | 8           | 0,007807                                 | 8           | 0,046087                                  | 8           | 0,000390                                  | 8           |
| 0,001383                                 | 9           | 0,008787                                 | 9           | 0,046106                                  | 9           | 0,000439                                  | 9           |
| 0,001537                                 | 10          | 0,009768                                 | 10          | 0,046124                                  | 10          | 0,000488                                  | 10          |
| 0,001691                                 | 11          | 0,010750                                 | 11          | 0,046143                                  | 11          | 0,000536                                  | 11          |
| 0,001845                                 | 12          | 0,011733                                 | 12          | 0,046162                                  | 12          | 0,000585                                  | 12          |
| 0,001998                                 | 13          | 0,012717                                 | 13          | 0,046181                                  | 13          | 0,000634                                  | 13          |
| 0,002153                                 | 14          | 0,013702                                 | 14          | 0,046200                                  | 14          | 0,000683                                  | 14          |
| 0,002307                                 | 15          | 0,014688                                 | 15          | 0,046219                                  | 15          | 0,000732                                  | 15          |
| 0,002462                                 | 16          | 0,015674                                 | 16          | 0,046237                                  | 16          | 0,000781                                  | 16          |
| 0,002615                                 | 17          | 0,016662                                 | 17          | 0,046256                                  | 17          | 0,000829                                  | 17          |
| 0,002769                                 | 18          | 0,017651                                 | 18          | 0,046275                                  | 18          | 0,000878                                  | 18          |
| 0,002924                                 | 19          | 0,018642                                 | 19          | 0,046294                                  | 19          | 0,000927                                  | 19          |
| 0,003077                                 | 20          | 0,019633                                 | 20          | 0,046313                                  | 20          | 0,000976                                  | 20          |
| 0,003232                                 | 21          | 0,020624                                 | 21          | 0,046337                                  | 21          | 0,001025                                  | 21          |
| 0,003386                                 | 22          | 0,021616                                 | 22          | 0,046361                                  | 22          | 0,001073                                  | 22          |
| 0,003540                                 | 23          | 0,022609                                 | 23          | 0,046380                                  | 23          | 0,001122                                  | 23          |
| 0,003694                                 | 24          | 0,023605                                 | 24          | 0,046399                                  | 24          | 0,001171                                  | 24          |
| 0,003849                                 | 25          | 0,024600                                 | 25          | 0,046417                                  | 25          | 0,001220                                  | 25          |
| 0,004002                                 | 26          | 0,025597                                 | 26          | 0,046436                                  | 26          | 0,001269                                  | 26          |
| 0,004157                                 | 27          | 0,026595                                 | 27          | 0,046455                                  | 27          | 0,001317                                  | 27          |
| 0,004312                                 | 28          | 0,027593                                 | 28          | 0,046474                                  | 28          | 0,001366                                  | 28          |
| 0,004466                                 | 29          | 0,028592                                 | 29          | 0,046493                                  | 29          | 0,001416                                  | 29          |
| 0,004620                                 | 30          | 0,029593                                 | 30          | 0,046513                                  | 30          | 0,001465                                  | 30          |
| 0,004775                                 | 31          | 0,030594                                 | 31          | 0,046532                                  | 31          | 0,001514                                  | 31          |
| 0,004930                                 | 32          | 0,031597                                 | 32          | 0,046551                                  | 32          | 0,001563                                  | 32          |
| 0,005083                                 | 33          | 0,032600                                 | 33          | 0,046570                                  | 33          | 0,001611                                  | 33          |
| 0,005238                                 | 34          | 0,033605                                 | 34          | 0,046589                                  | 34          | 0,001660                                  | 34          |
| 0,005393                                 | 35          | 0,034609                                 | 35          | 0,046607                                  | 35          | 0,001709                                  | 35          |
| 0,005547                                 | 36          | 0,035616                                 | 36          | 0,046626                                  | 36          | 0,001758                                  | 36          |
| 0,005702                                 | 37          | 0,036622                                 | 37          | 0,046645                                  | 37          | 0,001807                                  | 37          |
| 0,005857                                 | 38          | 0,037632                                 | 38          | 0,046664                                  | 38          | 0,001855                                  | 38          |
| 0,006010                                 | 39          | 0,038641                                 | 39          | 0,046682                                  | 39          | 0,001904                                  | 39          |
| 0,006165                                 | 40          | 0,039651                                 | 40          | 0,046701                                  | 40          | 0,001953                                  | 40          |
| 0,006320                                 | 41          | 0,040662                                 | 41          | 0,046720                                  | 41          | 0,002003                                  | 41          |
| 0,006475                                 | 42          | 0,041674                                 | 42          | 0,046739                                  | 42          | 0,002052                                  | 42          |
| 0,006629                                 | 43          | 0,042687                                 | 43          | 0,046758                                  | 43          | 0,002100                                  | 43          |
| 0,006784                                 | 44          | 0,043702                                 | 44          | 0,046777                                  | 44          | 0,002149                                  | 44          |
| 0,006939                                 | 45          | 0,044716                                 | 45          | 0,046796                                  | 45          | 0,002198                                  | 45          |
| 0,007093                                 | 46          | 0,045732                                 | 46          | 0,046815                                  | 46          | 0,002247                                  | 46          |
| 0,007249                                 | 47          | 0,046749                                 | 47          | 0,046834                                  | 47          | 0,002296                                  | 47          |

| $\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{238}\text{U}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{235}\text{U}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{206}\text{Pb}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{232}\text{Th}}$ | Млн.<br>лет |
|--|-------------|--|-------------|---|-------------|---|-------------|
| 0,007404                                     | 48          | 0,047767                                     | 48          | 0,046853                                      | 48          | 0,002345                                      | 48          |
| 0,007558                                     | 49          | 0,048787                                     | 49          | 0,046872                                      | 49          | 0,002393                                      | 49          |
| 0,007713                                     | 50          | 0,049807                                     | 50          | 0,046891                                      | 50          | 0,002442                                      | 50          |
| 0,007868                                     | 51          | 0,050829                                     | 51          | 0,046910                                      | 51          | 0,002492                                      | 51          |
| 0,008022                                     | 52          | 0,051850                                     | 52          | 0,046929                                      | 52          | 0,002541                                      | 52          |
| 0,008178                                     | 53          | 0,052873                                     | 53          | 0,046948                                      | 53          | 0,002590                                      | 53          |
| 0,008333                                     | 54          | 0,053897                                     | 54          | 0,046967                                      | 54          | 0,002638                                      | 54          |
| 0,008488                                     | 55          | 0,054922                                     | 55          | 0,046986                                      | 55          | 0,002687                                      | 55          |
| 0,008643                                     | 56          | 0,055947                                     | 56          | 0,047005                                      | 56          | 0,002736                                      | 56          |
| 0,008798                                     | 57          | 0,056976                                     | 57          | 0,047024                                      | 57          | 0,002785                                      | 57          |
| 0,008953                                     | 58          | 0,058003                                     | 58          | 0,047043                                      | 58          | 0,002835                                      | 58          |
| 0,009108                                     | 59          | 0,059032                                     | 59          | 0,047062                                      | 59          | 0,002883                                      | 59          |
| 0,009263                                     | 60          | 0,060063                                     | 60          | 0,047081                                      | 60          | 0,002932                                      | 60          |
| 0,009418                                     | 61          | 0,061093                                     | 61          | 0,047100                                      | 61          | 0,002981                                      | 61          |
| 0,009573                                     | 62          | 0,062125                                     | 62          | 0,047119                                      | 62          | 0,003030                                      | 62          |
| 0,009728                                     | 63          | 0,063159                                     | 63          | 0,047138                                      | 63          | 0,003079                                      | 63          |
| 0,009884                                     | 64          | 0,064193                                     | 64          | 0,047157                                      | 64          | 0,003128                                      | 64          |
| 0,010038                                     | 65          | 0,065228                                     | 65          | 0,047176                                      | 65          | 0,003177                                      | 65          |
| 0,010194                                     | 66          | 0,066264                                     | 66          | 0,047196                                      | 66          | 0,003226                                      | 66          |
| 0,010350                                     | 67          | 0,067301                                     | 67          | 0,047216                                      | 67          | 0,003275                                      | 67          |
| 0,010505                                     | 68          | 0,068339                                     | 68          | 0,047233                                      | 68          | 0,003324                                      | 68          |
| 0,010660                                     | 69          | 0,069378                                     | 69          | 0,047264                                      | 69          | 0,003373                                      | 69          |
| 0,010815                                     | 70          | 0,070418                                     | 70          | 0,047284                                      | 70          | 0,003421                                      | 70          |
| 0,010971                                     | 71          | 0,071459                                     | 71          | 0,047301                                      | 71          | 0,003471                                      | 71          |
| 0,011126                                     | 72          | 0,072501                                     | 72          | 0,047322                                      | 72          | 0,003520                                      | 72          |
| 0,011281                                     | 73          | 0,073545                                     | 73          | 0,047344                                      | 73          | 0,003569                                      | 73          |
| 0,011437                                     | 74          | 0,074589                                     | 74          | 0,047361                                      | 74          | 0,003618                                      | 74          |
| 0,011592                                     | 75          | 0,075634                                     | 75          | 0,047383                                      | 75          | 0,003667                                      | 75          |
| 0,011748                                     | 76          | 0,076681                                     | 76          | 0,047401                                      | 76          | 0,003715                                      | 76          |
| 0,011904                                     | 77          | 0,077727                                     | 77          | 0,047418                                      | 77          | 0,003765                                      | 77          |
| 0,012058                                     | 78          | 0,078775                                     | 78          | 0,047443                                      | 78          | 0,003814                                      | 78          |
| 0,012214                                     | 79          | 0,079825                                     | 79          | 0,047462                                      | 79          | 0,003863                                      | 79          |
| 0,012370                                     | 80          | 0,080875                                     | 80          | 0,047479                                      | 80          | 0,003912                                      | 80          |
| 0,012526                                     | 81          | 0,081926                                     | 81          | 0,047498                                      | 81          | 0,003960                                      | 81          |
| 0,012681                                     | 82          | 0,082979                                     | 82          | 0,047520                                      | 82          | 0,004010                                      | 82          |
| 0,012837                                     | 83          | 0,084032                                     | 83          | 0,047538                                      | 83          | 0,004059                                      | 83          |
| 0,012993                                     | 84          | 0,085086                                     | 84          | 0,047557                                      | 84          | 0,004108                                      | 84          |
| 0,013148                                     | 85          | 0,086142                                     | 85          | 0,047579                                      | 85          | 0,004157                                      | 85          |
| 0,013304                                     | 86          | 0,087198                                     | 86          | 0,047598                                      | 86          | 0,004205                                      | 86          |
| 0,013460                                     | 87          | 0,088255                                     | 87          | 0,047616                                      | 87          | 0,004255                                      | 87          |
| 0,013615                                     | 88          | 0,089315                                     | 88          | 0,047640                                      | 88          | 0,004304                                      | 88          |
| 0,013771                                     | 89          | 0,090374                                     | 89          | 0,047658                                      | 89          | 0,004353                                      | 89          |
| 0,013927                                     | 90          | 0,091434                                     | 90          | 0,047677                                      | 90          | 0,004402                                      | 90          |
| 0,014082                                     | 91          | 0,092496                                     | 91          | 0,047700                                      | 91          | 0,004451                                      | 91          |
| 0,014238                                     | 92          | 0,093558                                     | 92          | 0,047719                                      | 92          | 0,004500                                      | 92          |
| 0,014395                                     | 93          | 0,094621                                     | 93          | 0,047735                                      | 93          | 0,004549                                      | 93          |
| 0,014551                                     | 94          | 0,095687                                     | 94          | 0,047755                                      | 94          | 0,004598                                      | 94          |
| 0,014706                                     | 95          | 0,096753                                     | 95          | 0,047778                                      | 95          | 0,004647                                      | 95          |
| 0,014862                                     | 96          | 0,097819                                     | 96          | 0,047798                                      | 96          | 0,004696                                      | 96          |
| 0,015019                                     | 97          | 0,098887                                     | 97          | 0,047815                                      | 97          | 0,004745                                      | 97          |
| 0,015174                                     | 98          | 0,099956                                     | 98          | 0,047838                                      | 98          | 0,004794                                      | 98          |
| 0,015330                                     | 99          | 0,101025                                     | 99          | 0,047857                                      | 99          | 0,004843                                      | 99          |
| 0,015487                                     | 100         | 0,102096                                     | 100         | 0,047874                                      | 100         | 0,004892                                      | 100         |
| 0,015642                                     | 101         | 0,103168                                     | 101         | 0,047898                                      | 101         | 0,004942                                      | 101         |

| $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ | Млн.<br>лет |
|--|-------------|--|-------------|---|-------------|---|-------------|
| 0,015798                                 | 102         | 0,104242                                 | 102         | 0,047918                                  | 102         | 0,004990                                  | 102         |
| 0,015955                                 | 103         | 0,105316                                 | 103         | 0,047938                                  | 103         | 0,005040                                  | 103         |
| 0,016110                                 | 104         | 0,106391                                 | 104         | 0,047959                                  | 104         | 0,005088                                  | 104         |
| 0,016267                                 | 105         | 0,107466                                 | 105         | 0,047976                                  | 105         | 0,005138                                  | 105         |
| 0,016423                                 | 106         | 0,108543                                 | 106         | 0,047997                                  | 106         | 0,005187                                  | 106         |
| 0,016580                                 | 107         | 0,109622                                 | 107         | 0,048015                                  | 107         | 0,005236                                  | 107         |
| 0,016735                                 | 108         | 0,110701                                 | 108         | 0,048038                                  | 108         | 0,005284                                  | 108         |
| 0,016892                                 | 109         | 0,111782                                 | 109         | 0,048057                                  | 109         | 0,005334                                  | 109         |
| 0,017048                                 | 110         | 0,112862                                 | 110         | 0,048077                                  | 110         | 0,005383                                  | 110         |
| 0,017204                                 | 111         | 0,113945                                 | 111         | 0,048098                                  | 111         | 0,005432                                  | 111         |
| 0,017361                                 | 112         | 0,115028                                 | 112         | 0,048116                                  | 112         | 0,005481                                  | 112         |
| 0,017517                                 | 113         | 0,116113                                 | 113         | 0,048137                                  | 113         | 0,005530                                  | 113         |
| 0,017673                                 | 114         | 0,117199                                 | 114         | 0,048159                                  | 114         | 0,005579                                  | 114         |
| 0,017830                                 | 115         | 0,118285                                 | 115         | 0,048177                                  | 115         | 0,005628                                  | 115         |
| 0,017986                                 | 116         | 0,119372                                 | 116         | 0,048198                                  | 116         | 0,005678                                  | 116         |
| 0,018142                                 | 117         | 0,120461                                 | 117         | 0,048220                                  | 117         | 0,005727                                  | 117         |
| 0,018299                                 | 118         | 0,121551                                 | 118         | 0,048238                                  | 118         | 0,005775                                  | 118         |
| 0,018457                                 | 119         | 0,122643                                 | 119         | 0,048255                                  | 119         | 0,005824                                  | 119         |
| 0,018614                                 | 120         | 0,123734                                 | 120         | 0,048274                                  | 120         | 0,005874                                  | 120         |
| 0,018769                                 | 121         | 0,124827                                 | 121         | 0,048298                                  | 121         | 0,005923                                  | 121         |
| 0,018926                                 | 122         | 0,125922                                 | 122         | 0,048317                                  | 122         | 0,005972                                  | 122         |
| 0,019083                                 | 123         | 0,127016                                 | 123         | 0,048336                                  | 123         | 0,006022                                  | 123         |
| 0,019239                                 | 124         | 0,128111                                 | 124         | 0,048358                                  | 124         | 0,006070                                  | 124         |
| 0,019396                                 | 125         | 0,129210                                 | 125         | 0,048378                                  | 125         | 0,006119                                  | 125         |
| 0,019553                                 | 126         | 0,130309                                 | 126         | 0,048397                                  | 126         | 0,006168                                  | 126         |
| 0,019709                                 | 127         | 0,131407                                 | 127         | 0,048419                                  | 127         | 0,006218                                  | 127         |
| 0,019866                                 | 128         | 0,132508                                 | 128         | 0,048439                                  | 128         | 0,006267                                  | 128         |
| 0,020023                                 | 129         | 0,133609                                 | 129         | 0,048458                                  | 129         | 0,006315                                  | 129         |
| 0,020179                                 | 130         | 0,134711                                 | 130         | 0,048480                                  | 130         | 0,006365                                  | 130         |
| 0,020336                                 | 131         | 0,135815                                 | 131         | 0,048500                                  | 131         | 0,006414                                  | 131         |
| 0,020493                                 | 132         | 0,136921                                 | 132         | 0,048521                                  | 132         | 0,006463                                  | 132         |
| 0,020650                                 | 133         | 0,138026                                 | 133         | 0,048540                                  | 133         | 0,006513                                  | 133         |
| 0,020807                                 | 134         | 0,139133                                 | 134         | 0,048560                                  | 134         | 0,006561                                  | 134         |
| 0,020964                                 | 135         | 0,140241                                 | 135         | 0,048581                                  | 135         | 0,006610                                  | 135         |
| 0,021121                                 | 136         | 0,141350                                 | 136         | 0,048601                                  | 136         | 0,006660                                  | 136         |
| 0,021277                                 | 137         | 0,142460                                 | 137         | 0,048623                                  | 137         | 0,006709                                  | 137         |
| 0,021434                                 | 138         | 0,143577                                 | 138         | 0,048644                                  | 138         | 0,006758                                  | 138         |
| 0,021592                                 | 139         | 0,144684                                 | 139         | 0,048662                                  | 139         | 0,006808                                  | 139         |
| 0,021748                                 | 140         | 0,145797                                 | 140         | 0,048685                                  | 140         | 0,006856                                  | 140         |
| 0,021905                                 | 141         | 0,146911                                 | 141         | 0,048705                                  | 141         | 0,006905                                  | 141         |
| 0,022063                                 | 142         | 0,148027                                 | 142         | 0,048723                                  | 142         | 0,006955                                  | 142         |
| 0,022219                                 | 143         | 0,149143                                 | 143         | 0,048746                                  | 143         | 0,007004                                  | 143         |
| 0,022376                                 | 144         | 0,150261                                 | 144         | 0,048767                                  | 144         | 0,007053                                  | 144         |
| 0,022534                                 | 145         | 0,151380                                 | 145         | 0,048786                                  | 145         | 0,007107                                  | 145         |
| 0,022691                                 | 146         | 0,152499                                 | 146         | 0,048806                                  | 146         | 0,007151                                  | 146         |
| 0,022848                                 | 147         | 0,153621                                 | 147         | 0,048827                                  | 147         | 0,007200                                  | 147         |
| 0,023005                                 | 148         | 0,154742                                 | 148         | 0,048848                                  | 148         | 0,007250                                  | 148         |
| 0,023163                                 | 149         | 0,155865                                 | 149         | 0,048867                                  | 149         | 0,007299                                  | 149         |
| 0,023320                                 | 150         | 0,156989                                 | 150         | 0,048888                                  | 150         | 0,007348                                  | 150         |
| 0,023478                                 | 151         | 0,158116                                 | 151         | 0,048908                                  | 151         | 0,007397                                  | 151         |
| 0,023635                                 | 152         | 0,159241                                 | 152         | 0,048928                                  | 152         | 0,007446                                  | 152         |
| 0,023792                                 | 153         | 0,160369                                 | 153         | 0,048950                                  | 153         | 0,007495                                  | 153         |
| 0,023950                                 | 154         | 0,161497                                 | 154         | 0,048969                                  | 154         | 0,007545                                  | 154         |
| 0,024107                                 | 155         | 0,162627                                 | 155         | 0,048990                                  | 155         | 0,007594                                  | 155         |

| $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ | Млн.<br>лет |
|--|-------------|--|-------------|---|-------------|---|-------------|
| 0,024264                                 | 156         | 0,163758                                 | 156         | 0,049012                                  | 156         | 0,007642                                  | 156         |
| 0,024422                                 | 157         | 0,164890                                 | 157         | 0,049031                                  | 157         | 0,007692                                  | 157         |
| 0,024579                                 | 158         | 0,166023                                 | 158         | 0,049053                                  | 158         | 0,007741                                  | 158         |
| 0,024736                                 | 159         | 0,167157                                 | 159         | 0,049075                                  | 159         | 0,007791                                  | 159         |
| 0,024894                                 | 160         | 0,168293                                 | 160         | 0,049095                                  | 160         | 0,007840                                  | 160         |
| 0,025052                                 | 161         | 0,169429                                 | 161         | 0,049114                                  | 161         | 0,007888                                  | 161         |
| 0,025209                                 | 162         | 0,170566                                 | 162         | 0,049136                                  | 162         | 0,007938                                  | 162         |
| 0,025366                                 | 163         | 0,171706                                 | 163         | 0,049158                                  | 163         | 0,007987                                  | 163         |
| 0,025524                                 | 164         | 0,172844                                 | 164         | 0,049178                                  | 164         | 0,008037                                  | 164         |
| 0,025682                                 | 165         | 0,173985                                 | 165         | 0,049198                                  | 165         | 0,008086                                  | 165         |
| 0,025839                                 | 166         | 0,175127                                 | 166         | 0,049220                                  | 166         | 0,008135                                  | 166         |
| 0,025997                                 | 167         | 0,176269                                 | 167         | 0,049240                                  | 167         | 0,008184                                  | 167         |
| 0,026155                                 | 168         | 0,177414                                 | 168         | 0,049260                                  | 168         | 0,008233                                  | 168         |
| 0,026312                                 | 169         | 0,178560                                 | 169         | 0,049282                                  | 169         | 0,008283                                  | 169         |
| 0,026470                                 | 170         | 0,179707                                 | 170         | 0,049303                                  | 170         | 0,008332                                  | 170         |
| 0,026629                                 | 171         | 0,180853                                 | 171         | 0,049321                                  | 171         | 0,008381                                  | 171         |
| 0,026786                                 | 172         | 0,182002                                 | 172         | 0,049344                                  | 172         | 0,008430                                  | 172         |
| 0,026944                                 | 173         | 0,183151                                 | 173         | 0,049364                                  | 173         | 0,008479                                  | 173         |
| 0,027102                                 | 174         | 0,184302                                 | 174         | 0,049384                                  | 174         | 0,008529                                  | 174         |
| 0,027260                                 | 175         | 0,185453                                 | 175         | 0,049405                                  | 175         | 0,008578                                  | 175         |
| 0,027417                                 | 176         | 0,186607                                 | 176         | 0,049428                                  | 176         | 0,008627                                  | 176         |
| 0,027576                                 | 177         | 0,187762                                 | 177         | 0,049447                                  | 177         | 0,008676                                  | 177         |
| 0,027734                                 | 178         | 0,188917                                 | 178         | 0,049468                                  | 178         | 0,008725                                  | 178         |
| 0,027891                                 | 179         | 0,190073                                 | 179         | 0,049490                                  | 179         | 0,008775                                  | 179         |
| 0,028049                                 | 180         | 0,191231                                 | 180         | 0,049511                                  | 180         | 0,008824                                  | 180         |
| 0,028207                                 | 181         | 0,192387                                 | 181         | 0,049531                                  | 181         | 0,008874                                  | 181         |
| 0,028365                                 | 182         | 0,193549                                 | 182         | 0,049553                                  | 182         | 0,008923                                  | 182         |
| 0,028523                                 | 183         | 0,194710                                 | 183         | 0,049574                                  | 183         | 0,008971                                  | 183         |
| 0,028681                                 | 184         | 0,195871                                 | 184         | 0,049595                                  | 184         | 0,009021                                  | 184         |
| 0,028839                                 | 185         | 0,197034                                 | 185         | 0,049616                                  | 185         | 0,009070                                  | 185         |
| 0,028997                                 | 186         | 0,198199                                 | 186         | 0,049638                                  | 186         | 0,009120                                  | 186         |
| 0,029155                                 | 187         | 0,199364                                 | 187         | 0,049659                                  | 187         | 0,009169                                  | 187         |
| 0,029315                                 | 188         | 0,200531                                 | 188         | 0,049677                                  | 188         | 0,009218                                  | 188         |
| 0,029472                                 | 189         | 0,201698                                 | 189         | 0,049700                                  | 189         | 0,009267                                  | 189         |
| 0,029631                                 | 190         | 0,202867                                 | 190         | 0,049720                                  | 190         | 0,009317                                  | 190         |
| 0,029780                                 | 191         | 0,204036                                 | 191         | 0,049741                                  | 191         | 0,009366                                  | 191         |
| 0,029947                                 | 192         | 0,205207                                 | 192         | 0,049762                                  | 192         | 0,009415                                  | 192         |
| 0,030105                                 | 193         | 0,206379                                 | 193         | 0,049784                                  | 193         | 0,009464                                  | 193         |
| 0,030264                                 | 194         | 0,207554                                 | 194         | 0,049804                                  | 194         | 0,009513                                  | 194         |
| 0,030422                                 | 195         | 0,208729                                 | 195         | 0,049826                                  | 195         | 0,009563                                  | 195         |
| 0,030580                                 | 196         | 0,209904                                 | 196         | 0,049848                                  | 196         | 0,009612                                  | 196         |
| 0,030739                                 | 197         | 0,211081                                 | 197         | 0,049868                                  | 197         | 0,009662                                  | 197         |
| 0,030896                                 | 198         | 0,212259                                 | 198         | 0,049891                                  | 198         | 0,009711                                  | 198         |
| 0,031055                                 | 199         | 0,213438                                 | 199         | 0,049912                                  | 199         | 0,009760                                  | 199         |
| 0,031214                                 | 200         | 0,214617                                 | 200         | 0,049932                                  | 200         | 0,009809                                  | 200         |
| 0,031373                                 | 201         | 0,215800                                 | 201         | 0,049952                                  | 201         | 0,009859                                  | 201         |
| 0,031530                                 | 202         | 0,216982                                 | 202         | 0,049976                                  | 202         | 0,009908                                  | 202         |
| 0,031690                                 | 203         | 0,218166                                 | 203         | 0,049995                                  | 203         | 0,009958                                  | 203         |
| 0,031849                                 | 204         | 0,219350                                 | 204         | 0,050015                                  | 204         | 0,010006                                  | 204         |
| 0,032007                                 | 205         | 0,220536                                 | 205         | 0,050038                                  | 205         | 0,010056                                  | 205         |
| 0,032166                                 | 206         | 0,221722                                 | 206         | 0,050058                                  | 206         | 0,010105                                  | 206         |
| 0,032325                                 | 207         | 0,222913                                 | 207         | 0,050079                                  | 207         | 0,010155                                  | 207         |
| 0,032482                                 | 208         | 0,224101                                 | 208         | 0,050103                                  | 208         | 0,010204                                  | 208         |
| 0,032641                                 | 209         | 0,225291                                 | 209         | 0,050124                                  | 209         | 0,010253                                  | 209         |

| $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | Млн.<br>лет | $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ | Млн.<br>лет |
|--|-------------|--|-------------|---|-------------|---|-------------|
| 0,032800                                 | 210         | 0,226484                                 | 210         | 0,050145                                  | 210         | 0,010302                                  | 210         |
| 0,032958                                 | 211         | 0,227676                                 | 211         | 0,050167                                  | 211         | 0,010352                                  | 211         |
| 0,033117                                 | 212         | 0,228870                                 | 212         | 0,050188                                  | 212         | 0,010401                                  | 212         |
| 0,033276                                 | 213         | 0,230066                                 | 213         | 0,050209                                  | 213         | 0,010451                                  | 213         |
| 0,033435                                 | 214         | 0,231263                                 | 214         | 0,050230                                  | 214         | 0,010500                                  | 214         |
| 0,033594                                 | 215         | 0,232460                                 | 215         | 0,050251                                  | 215         | 0,010549                                  | 215         |
| 0,033754                                 | 216         | 0,233660                                 | 216         | 0,050271                                  | 216         | 0,010598                                  | 216         |
| 0,033913                                 | 217         | 0,234858                                 | 217         | 0,050292                                  | 217         | 0,010648                                  | 217         |
| 0,034071                                 | 218         | 0,236060                                 | 218         | 0,050315                                  | 218         | 0,010697                                  | 218         |
| 0,034230                                 | 219         | 0,237262                                 | 219         | 0,050337                                  | 219         | 0,010747                                  | 219         |
| 0,034389                                 | 220         | 0,238466                                 | 220         | 0,050358                                  | 220         | 0,010795                                  | 220         |
| 0,034547                                 | 221         | 0,239669                                 | 221         | 0,050381                                  | 221         | 0,010845                                  | 221         |
| 0,034707                                 | 222         | 0,240875                                 | 222         | 0,050401                                  | 222         | 0,010894                                  | 222         |
| 0,034866                                 | 223         | 0,242083                                 | 223         | 0,050422                                  | 223         | 0,010944                                  | 223         |
| 0,035024                                 | 224         | 0,243291                                 | 224         | 0,050445                                  | 224         | 0,010993                                  | 224         |
| 0,035183                                 | 225         | 0,244500                                 | 225         | 0,050467                                  | 225         | 0,011043                                  | 225         |
| 0,035343                                 | 226         | 0,245711                                 | 226         | 0,050487                                  | 226         | 0,011091                                  | 226         |
| 0,035503                                 | 227         | 0,246922                                 | 227         | 0,050508                                  | 227         | 0,011141                                  | 227         |
| 0,035661                                 | 228         | 0,248134                                 | 228         | 0,050531                                  | 228         | 0,011190                                  | 228         |
| 0,035821                                 | 229         | 0,249348                                 | 229         | 0,050551                                  | 229         | 0,011240                                  | 229         |
| 0,035980                                 | 230         | 0,250564                                 | 230         | 0,050573                                  | 230         | 0,011290                                  | 230         |
| 0,036139                                 | 231         | 0,251779                                 | 231         | 0,050595                                  | 231         | 0,011338                                  | 231         |
| 0,036298                                 | 232         | 0,252998                                 | 232         | 0,050617                                  | 232         | 0,011388                                  | 232         |
| 0,036458                                 | 233         | 0,254216                                 | 233         | 0,050637                                  | 233         | 0,011437                                  | 233         |
| 0,036616                                 | 234         | 0,255436                                 | 234         | 0,050661                                  | 234         | 0,011487                                  | 234         |
| 0,036776                                 | 235         | 0,256658                                 | 235         | 0,050682                                  | 235         | 0,011536                                  | 235         |
| 0,036935                                 | 236         | 0,257870                                 | 236         | 0,050704                                  | 236         | 0,011585                                  | 236         |
| 0,037095                                 | 237         | 0,259103                                 | 237         | 0,050725                                  | 237         | 0,011634                                  | 237         |
| 0,037254                                 | 238         | 0,260328                                 | 238         | 0,050747                                  | 238         | 0,011684                                  | 238         |
| 0,037414                                 | 239         | 0,261554                                 | 239         | 0,050768                                  | 239         | 0,011734                                  | 239         |
| 0,037574                                 | 240         | 0,262780                                 | 240         | 0,050789                                  | 240         | 0,011783                                  | 240         |
| 0,037732                                 | 241         | 0,264008                                 | 241         | 0,050812                                  | 241         | 0,011833                                  | 241         |
| 0,037892                                 | 242         | 0,265238                                 | 242         | 0,050833                                  | 242         | 0,011881                                  | 242         |
| 0,038052                                 | 243         | 0,266469                                 | 243         | 0,050855                                  | 243         | 0,011931                                  | 243         |
| 0,038211                                 | 244         | 0,267701                                 | 244         | 0,050877                                  | 244         | 0,011980                                  | 244         |
| 0,038370                                 | 245         | 0,268934                                 | 245         | 0,050900                                  | 245         | 0,012030                                  | 245         |
| 0,038530                                 | 246         | 0,270168                                 | 246         | 0,050921                                  | 246         | 0,012080                                  | 246         |
| 0,038690                                 | 247         | 0,271403                                 | 247         | 0,050942                                  | 247         | 0,012128                                  | 247         |
| 0,038850                                 | 248         | 0,272639                                 | 248         | 0,050963                                  | 248         | 0,012178                                  | 248         |
| 0,039010                                 | 249         | 0,273878                                 | 249         | 0,050985                                  | 249         | 0,012227                                  | 249         |
| 0,039169                                 | 250         | 0,275116                                 | 250         | 0,051008                                  | 250         | 0,012277                                  | 250         |
| 0,040767                                 | 260         | 0,287574                                 | 260         | 0,051227                                  | 260         | 0,012771                                  | 260         |
| 0,042367                                 | 270         | 0,300152                                 | 270         | 0,051449                                  | 270         | 0,013265                                  | 270         |
| 0,043971                                 | 280         | 0,312852                                 | 280         | 0,051670                                  | 280         | 0,013760                                  | 280         |
| 0,045577                                 | 290         | 0,325678                                 | 290         | 0,051892                                  | 290         | 0,014255                                  | 290         |
| 0,047185                                 | 300         | 0,338627                                 | 300         | 0,052117                                  | 300         | 0,014751                                  | 300         |
| 0,048796                                 | 310         | 0,351705                                 | 310         | 0,052343                                  | 310         | 0,015246                                  | 310         |
| 0,050409                                 | 320         | 0,364911                                 | 320         | 0,052570                                  | 320         | 0,015741                                  | 320         |
| 0,052025                                 | 330         | 0,378244                                 | 330         | 0,052799                                  | 330         | 0,016237                                  | 330         |
| 0,053643                                 | 340         | 0,391708                                 | 340         | 0,053029                                  | 340         | 0,016733                                  | 340         |
| 0,055263                                 | 350         | 0,405303                                 | 350         | 0,053261                                  | 350         | 0,017229                                  | 350         |
| 0,056887                                 | 360         | 0,419032                                 | 360         | 0,053493                                  | 360         | 0,017726                                  | 360         |
| 0,058511                                 | 370         | 0,432895                                 | 370         | 0,053729                                  | 370         | 0,018223                                  | 370         |
| 0,060140                                 | 380         | 0,446892                                 | 380         | 0,053964                                  | 380         | 0,018722                                  | 380         |

| $\frac{200Pb}{238U}$ | Млн.<br>лет | $\frac{207Pb}{235U}$ | Млн.<br>лет | $\frac{207Pb}{206Pb}$ | Млн.<br>лет | $\frac{208Pb}{232Th}$ | Млн.<br>лет |
|----------------------|-------------|----------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|
| 0,061770             | 390         | 0,461028             | 390         | 0,054202              | 390         | 0,019219              | 390         |
| 0,063403             | 400         | 0,475300             | 400         | 0,054440              | 400         | 0,019716              | 400         |
| 0,065039             | 410         | 0,489712             | 410         | 0,054680              | 410         | 0,020214              | 410         |
| 0,066677             | 420         | 0,504267             | 420         | 0,054922              | 420         | 0,020712              | 420         |
| 0,068318             | 430         | 0,518960             | 430         | 0,055165              | 430         | 0,021210              | 430         |
| 0,069961             | 440         | 0,533800             | 440         | 0,055410              | 440         | 0,021708              | 440         |
| 0,071607             | 450         | 0,548782             | 450         | 0,055655              | 450         | 0,022208              | 450         |
| 0,073256             | 460         | 0,563913             | 460         | 0,055902              | 460         | 0,022707              | 460         |
| 0,074906             | 470         | 0,579191             | 470         | 0,056152              | 470         | 0,023207              | 470         |
| 0,076560             | 480         | 0,594617             | 480         | 0,056402              | 480         | 0,023706              | 480         |
| 0,078215             | 490         | 0,610197             | 490         | 0,056656              | 490         | 0,024206              | 490         |
| 0,079873             | 500         | 0,625927             | 500         | 0,056910              | 500         | 0,024705              | 500         |
| 0,088204             | 550         | 0,706911             | 550         | 0,058202              | 550         | 0,027210              | 550         |
| 0,096598             | 600         | 0,791929             | 600         | 0,059536              | 600         | 0,029720              | 600         |
| 0,105058             | 650         | 0,881183             | 650         | 0,060912              | 650         | 0,032236              | 650         |
| 0,113583             | 700         | 0,974883             | 700         | 0,062331              | 700         | 0,034758              | 700         |
| 0,122173             | 750         | 0,073240             | 750         | 0,063795              | 750         | 0,037288              | 750         |
| 0,130829             | 800         | 1,176515             | 800         | 0,065306              | 800         | 0,039821              | 800         |
| 0,139554             | 850         | 1,284925             | 850         | 0,066865              | 850         | 0,042362              | 850         |
| 0,148344             | 900         | 1,398732             | 900         | 0,068474              | 900         | 0,044911              | 900         |
| 0,157202             | 950         | 1,518213             | 950         | 0,070135              | 950         | 0,047463              | 950         |
| 0,166129             | 1000        | 1,643640             | 1000        | 0,071850              | 1000        | 0,050023              | 1000        |
| 0,175125             | 1050        | 1,775320             | 1050        | 0,073619              | 1050        | 0,052589              | 1050        |
| 0,184190             | 1100        | 1,913552             | 1100        | 0,075446              | 1100        | 0,055160              | 1100        |
| 0,193325             | 1150        | 2,058672             | 1150        | 0,077333              | 1150        | 0,057739              | 1150        |
| 0,202531             | 1200        | 2,211023             | 1200        | 0,079280              | 1200        | 0,060324              | 1200        |
| 0,211806             | 1250        | 2,370959             | 1250        | 0,081292              | 1250        | 0,062914              | 1250        |
| 0,221155             | 1300        | 2,538864             | 1300        | 0,083369              | 1300        | 0,065512              | 1300        |
| 0,230575             | 1350        | 2,715129             | 1350        | 0,085515              | 1350        | 0,068166              | 1350        |
| 0,240068             | 1400        | 2,900174             | 1400        | 0,087731              | 1400        | 0,070726              | 1400        |
| 0,249634             | 1450        | 3,094438             | 1450        | 0,090021              | 1450        | 0,073343              | 1450        |
| 0,259274             | 1500        | 3,298375             | 1500        | 0,092386              | 1500        | 0,075966              | 1500        |
| 0,268989             | 1550        | 3,512473             | 1550        | 0,094820              | 1550        | 0,078595              | 1550        |
| 0,278777             | 1600        | 3,737235             | 1600        | 0,097355              | 1600        | 0,081230              | 1600        |
| 0,288642             | 1650        | 3,973190             | 1650        | 0,099964              | 1650        | 0,083873              | 1650        |
| 0,298584             | 1700        | 4,220898             | 1700        | 0,102660              | 1700        | 0,086521              | 1700        |
| 0,308599             | 1750        | 4,480945             | 1750        | 0,105448              | 1750        | 0,089176              | 1750        |
| 0,318696             | 1800        | 4,753945             | 1800        | 0,108328              | 1800        | 0,091839              | 1800        |
| 0,328867             | 1850        | 5,040542             | 1850        | 0,111307              | 1850        | 0,094505              | 1850        |
| 0,339119             | 1900        | 5,341414             | 1900        | 0,114385              | 1900        | 0,097180              | 1900        |
| 0,349450             | 1950        | 5,657274             | 1950        | 0,117567              | 1950        | 0,099866              | 1950        |
| 0,359859             | 2000        | 5,988862             | 2000        | 0,120858              | 2000        | 0,102549              | 2000        |
| 0,370349             | 2050        | 6,336972             | 2050        | 0,124261              | 2050        | 0,105243              | 2050        |
| 0,380921             | 2100        | 6,702414             | 2100        | 0,127779              | 2100        | 0,107944              | 2100        |
| 0,391573             | 2150        | 7,086061             | 2150        | 0,131419              | 2150        | 0,110652              | 2150        |
| 0,402307             | 2200        | 7,488819             | 2200        | 0,135182              | 2200        | 0,113366              | 2200        |
| 0,413125             | 2250        | 7,911637             | 2250        | 0,139075              | 2250        | 0,116087              | 2250        |
| 0,424026             | 2300        | 8,35551              | 2300        | 0,143102              | 2300        | 0,118813              | 2300        |
| 0,435012             | 2350        | 8,82150              | 2350        | 0,147267              | 2350        | 0,121548              | 2350        |
| 0,446082             | 2400        | 9,31069              | 2400        | 0,151577              | 2400        | 0,124288              | 2400        |
| 0,457236             | 2450        | 9,82426              | 2450        | 0,156036              | 2450        | 0,127036              | 2450        |
| 0,468478             | 2500        | 10,36340             | 2500        | 0,160649              | 2500        | 0,129790              | 2500        |
| 0,479306             | 2550        | 10,92940             | 2550        | 0,165423              | 2550        | 0,132550              | 2550        |
| 0,491222             | 2600        | 11,52358             | 2600        | 0,170363              | 2600        | 0,135317              | 2600        |

| $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | Млн. лет | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | Млн. лет | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | Млн. лет | $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ | Млн. лет |
|--|----------|--|----------|---|----------|---|----------|
| 0,502726                                 | 2650     | 12,14737                                 | 2650     | 0,175475                                  | 2650     | 0,138092                                  | 2650     |
| 0,514318                                 | 2700     | 12,80222                                 | 2700     | 0,180767                                  | 2700     | 0,140874                                  | 2700     |
| 0,526000                                 | 2750     | 13,48970                                 | 2750     | 0,186244                                  | 2750     | 0,143661                                  | 2750     |
| 0,537771                                 | 2800     | 14,21141                                 | 2800     | 0,191913                                  | 2800     | 0,146456                                  | 2800     |
| 0,549634                                 | 2850     | 14,96908                                 | 2850     | 0,197782                                  | 2850     | 0,149257                                  | 2850     |
| 0,561588                                 | 2900     | 15,76447                                 | 2900     | 0,203858                                  | 2900     | 0,152065                                  | 2900     |
| 0,573635                                 | 2950     | 16,59949                                 | 2950     | 0,210148                                  | 2950     | 0,154880                                  | 2950     |
| 0,585775                                 | 3000     | 17,47610                                 | 3000     | 0,216660                                  | 3000     | 0,157704                                  | 3000     |
| 0,610335                                 | 3100     | 19,36248                                 | 3100     | 0,230387                                  | 3100     | 0,163368                                  | 3100     |
| 0,635275                                 | 3200     | 21,44146                                 | 3200     | 0,245108                                  | 3200     | 0,169060                                  | 3200     |
| 0,660600                                 | 3300     | 23,73270                                 | 3300     | 0,260900                                  | 3300     | 0,174782                                  | 3300     |
| 0,686323                                 | 3400     | 26,25787                                 | 3400     | 0,277841                                  | 3400     | 0,180530                                  | 3400     |
| 0,712439                                 | 3500     | 29,04086                                 | 3500     | 0,296024                                  | 3500     | 0,186307                                  | 3500     |
| 0,738961                                 | 3600     | 32,10798                                 | 3600     | 0,315542                                  | 3600     | 0,192112                                  | 3600     |
| 0,765894                                 | 3700     | 35,48826                                 | 3700     | 0,336497                                  | 3700     | 0,197944                                  | 3700     |
| 0,793244                                 | 3800     | 39,21365                                 | 3800     | 0,359001                                  | 3800     | 0,203806                                  | 3800     |
| 0,821018                                 | 3900     | 43,31940                                 | 3900     | 0,383173                                  | 3900     | 0,209697                                  | 3900     |
| 0,849221                                 | 4000     | 47,84434                                 | 4000     | 0,409143                                  | 4000     | 0,215616                                  | 4000     |
| 0,877861                                 | 4100     | 52,83127                                 | 4100     | 0,437050                                  | 4100     | 0,221563                                  | 4100     |
| 0,906946                                 | 4200     | 58,32736                                 | 4200     | 0,467043                                  | 4200     | 0,227542                                  | 4200     |
| 0,936480                                 | 4300     | 64,38459                                 | 4300     | 0,499286                                  | 4300     | 0,233549                                  | 4300     |
| 0,966472                                 | 4400     | 71,06025                                 | 4400     | 0,533953                                  | 4400     | 0,239584                                  | 4400     |
| 0,996930                                 | 4500     | 78,41750                                 | 4500     | 0,571234                                  | 4500     | 0,245651                                  | 4500     |
| 1,029416                                 | 4605     | 86,9524                                  | 4605     | 0,613418                                  | 4605     | 0,252051                                  | 4605     |
| 1,062431                                 | 4710     | 96,4045                                  | 4710     | 0,658965                                  | 4710     | 0,258486                                  | 4710     |
| 1,091157                                 | 4800     | 105,3107                                 | 4800     | 0,700892                                  | 4800     | 0,264026                                  | 4800     |
| 1,125177                                 | 4905     | 116,7358                                 | 4905     | 0,753441                                  | 4905     | 0,270321                                  | 4905     |
| 1,159751                                 | 5010     | 129,3888                                 | 5010     | 0,810210                                  | 5010     | 0,276050                                  | 5010     |
| 1,189836                                 | 5100     | 141,3110                                 | 5100     | 0,862491                                  | 5100     | 0,282673                                  | 5100     |
| 1,225459                                 | 5205     | 156,6049                                 | 5205     | 0,928053                                  | 5205     | 0,289263                                  | 5205     |
| 1,293166                                 | 5400     | 189,5020                                 | 5400     | 1,064205                                  | 5400     | 0,301595                                  | 5400     |
| 1,4011373                                | 5700     | 254,0120                                 | 5700     | 1,316335                                  | 5700     | 0,320794                                  | 5700     |
| 1,514686                                 | 6000     | 340,3672                                 | 6000     | 1,631891                                  | 6000     | 0,340279                                  | 6000     |

Таблица 96

## Возраст некоторых радиоактивных минералов

| Минерал, местонахождение                   | Возраст (в млн. лет) по                  |  |   |   | Автор                          |
|--|--|--|---|---|--------------------------------|
|  | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ |                                |
| Урановая смолка, Сан-Сильвер, Франция      | 146                                      | 147                                      | 157                                       | —   | Demay, 1953                    |
| Циркон, гранит, Редстоун, Нью-Гемпшир, США | 187                                      | 184                                      | 140                                       | 190                                       | Tilton, Davis, Wetherill, 1957 |
| Самарскит, Глестонберри, США               | 280                                      | 253                                      | 255                                       | 266                                       | Nier, 1939                     |
| Торианит из пегматита, Мадагаскар          | 615                                      | 505                                      | 490                                       | 485                                       | Holmes, Bessaire, 1954         |
| Урановая смолка, Шинко-лобве, Киншаса      | 616                                      | —  | 610                                       | —   | Nier, 1939                     |

| Минерал, местонахождение  | Возраст (в млн. лет) по                  |  |   |   | Автор                                |
|---|--|--|---|---|--------------------------------------|
|   | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ |                                      |
| Циркон из пегматита, о. Шри Ланка   | 540                                      | 544                                      | 555                                       | 538                                       | Tilton, Davis, Wetherill, 1957       |
| Уранинит, Раджастан, Индия  | 733                                      | 733                                      | 740                                       | (935)                                     | Holmes, Leland, Nier, 1950           |
| Уранинит, Перри Саунд, Онтарио, Канада  | 1003                                     | 1025                                     | 1030                                      | 945                                       | Nier, 1939                           |
| Циркон из гранита, Тори-Хилл, Онтарио, Канада                                 | 1030                                     | 1050                                     | 1090                                      | —   | Tilton, Davis, Wetherill, 1957       |
| Уранинит, Кейстоун, Южная Дакота, США   | 1580                                     | 1600                                     | 1630                                      | (1440)                                    | Wetherill, Tilton, Aldrich, 1956     |
| Уранинит из пегматитов Балтийского щита                                       | 1760                                     | 1800                                     | 1870                                      | 1800                                      | Авдзейко, 1955                       |
| Ортит, Алакурти, Карелия, СССР  | 1700                                     | 1570                                     | 1800                                      | 1880                                      | Жиров, Зыков, 1956                   |
| Монацит из гранита, Сугоклев, карьер  | 1905                                     | 1920                                     | 2000                                      | 1820                                      | Комлев, Данилевич, 1957              |
| Монацит из пегматитов, Бикита, Южная Африка                                   | 2675                                     | 2680                                     | 2680                                      | 2645                                      | Holmes, 1954                         |
| Концентрат урановой смолки из серии Доминьон Риф, Витватерсранд, Южная Африка | $3100 \pm \pm 100$                       | $3100 \pm \pm 100$                       | $3100 \pm \pm 100$                        | $3200 \pm \pm 100$                        | Nicolaysen, Burger, Liebenberg, 1962 |
| Циркон из гнейса, Юго-Западная Миннесота, США                                 | 2910                                     | 3130                                     | 3280                                      | —   | Catanzaro, (1963)                    |
| Циркон из гнейса, Мортон, Юго-Западная Миннесота, США                         | 2820                                     | 3070                                     | 3240                                      | —   |                                      |

### ВЫЧИСЛЕНИЕ ВОЗРАСТА ПО ИЗОТОПНОМУ СОСТАВУ ОБЫЧНОГО СВИНЦА

Наибольшее распространение получили два метода определения возраста по изотопам обычного (рудного) свинца: Холмса — Гоутерманса и Расселла — Фаргуара — Камминга. Возраст, получаемый этими методами, обычно называют модельным, поскольку вычисленная величина справедлива лишь для определенной модели, которая имеет определенную долю вероятности.

В основе метода Холмса — Гоутерманса лежит предположение, что любой свинец образовался как радиогенная добавка к первичному свинцу, соответствующему своим изотопным составом свинцу железных метеоритов (наименее радиоактивных тел Солнечной системы). Расчет возраста производится по уравнению:

$$\frac{y-b}{x-a} = \frac{1}{137,8} \left( \frac{e^{\lambda_2 t} - e^{\lambda_1 t}}{e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_1 t}} \right),$$

где  $x = ^{206}\text{Pb} : ^{204}\text{Pb}$  и  $y = ^{207}\text{Pb} : ^{204}\text{Pb}$  — изотопный состав в исследуемом образце;

$a$  и  $b$  — те же отношения в первичном свинце;  
 $1 : 137,8$  — современное отношение изотопов урана  $^{235}\text{U} : ^{238}\text{U}$ ;  
 $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — константы распада соответственно  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ ;  
 $\omega$  — возраст Земли;  
 $t$  — возраст исследуемого минерала.

## Модельный возраст (млн. лет) по Холмсу—Гаутермансу

$$\Phi = \frac{y - 10.36}{x - 9.50}$$

| Φ   | 0,00  | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,5 | -1132 | -952 | -782 | -622 | -471 | -372 | -192 | -62  | 1    | 178  |
| 0,6 | 290   | 398  | 500  | 599  | 694  | 785  | 872  | 957  | 1039 | 1177 |
| 0,7 | 1193  | 1267 | 1338 | 1407 | 1474 | 1539 | 1602 | 1664 | 1723 | 1781 |
| 0,8 | 1838  | 1893 | 1946 | 1999 | 2050 | 2099 | 2148 | 2195 | 2242 | 2287 |
| 0,9 | 2331  | 2375 | 2417 | 2459 | 2509 | 2539 | 2578 | 2617 | 2654 | 2691 |
| 1,0 | 2727  | 2763 | 2798 | 2832 | 2866 | 2899 | 2931 | 2963 | 2995 | 3026 |
| 1,1 | 3056  | 3086 | 3115 | 3144 | 3173 | 3201 | 3229 | 3256 | 3283 | 3310 |
| 1,2 | 3336  | 3362 | 3387 | 3412 | 3436 | 3461 | 3485 | 3509 | 3532 | 3557 |
| 1,3 | 3578  | 3601 | 3623 | 3645 | 3667 | 3689 | 3701 | 3731 | 3752 | 3772 |
| 1,4 | 3792  | 3812 | 3832 | 3852 | 3871 | 3890 | 3909 | 3928 | 3947 | 3965 |
| 1,5 | 3983  | 4001 | 4019 | 4036 | 4064 | 4071 | 4088 | 4105 | 4122 | 4139 |
| 1,6 | 4155  | 4172 | 4188 | 4203 | 4219 | 4235 | 4251 | 4266 | 4281 | 4296 |
| 1,7 | 4311  | 4327 | 4341 | 4355 | 4370 | 4384 | 4399 | 4413 | 4427 | 4441 |
| 1,8 | 4454  | 4468 | 4482 | 4495 | 4508 | 4522 | 4535 | 4548 | 4561 | 4574 |
| 1,9 | 4586  | 4599 | 4611 | 4624 | 4636 | 4648 | 4661 | 4673 | 4685 | 4697 |

Φ — по вертикали десятые доли, по горизонтали сотые доли отношения.

## Модельный возраст (млн. лет) по Расселлу—Фаркуару—Каммингу

| $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ | 0,0  | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5   | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  |
|---|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| 12  | 3127 | 3090 | 3053 | 3016 | 2979 | 2942  | 2904 | 2866 | 2828 | 2790 |
| 13  | 2751 | 2712 | 2673 | 2634 | 2595 | 2555  | 2515 | 2475 | 2434 | 2393 |
| 14  | 2352 | 2311 | 2270 | 2228 | 2186 | 2143  | 2102 | 2058 | 2015 | 1973 |
| 15  | 1928 | 1884 | 1839 | 1795 | 1750 | 1704  | 1659 | 1613 | 1567 | 1520 |
| 16  | 1473 | 1426 | 1378 | 1330 | 1282 | 1233  | 1184 | 1135 | 1085 | 1035 |
| 17  | 984  | 933  | 882  | 830  | 778  | 725   | 672  | 619  | 565  | 511  |
| 18  | 456  | 401  | 345  | 289  | 230  | 175   | 117  | 59   | 0    | -59  |
| $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ | 0,0  | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5   | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  |
| 32  | 3215 | 3173 | 3133 | 3089 | 3047 | 3005  | 2962 | 2920 | 2878 | 2835 |
| 33  | 2792 | 2750 | 2707 | 2664 | 2621 | 25,78 | 2534 | 2491 | 2448 | 2404 |
| 34  | 2360 | 2317 | 2273 | 2229 | 2185 | 2141  | 2097 | 2052 | 2008 | 1964 |
| 35  | 1919 | 1874 | 1829 | 1785 | 1740 | 1695  | 1649 | 1604 | 1559 | 1513 |
| 36  | 1468 | 1422 | 1376 | 1330 | 1284 | 1238  | 1192 | 1145 | 1099 | 1052 |
| 37  | 1006 | 952  | 912  | 865  | 818  | 771   | 723  | 676  | 629  | 581  |
| 38  | 533  | 485  | 437  | 389  | 341  | 293   | 244  | 195  | 147  | 92   |
| 39  | 49   | 0    | -49  | -98  | -148 | -197  | -247 | -297 | -347 | -397 |

## Изотопный состав свинца горных пород и метеоритов \*

| Источник свинца   | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ | $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ |
|---|---|---|---|
| <b>Современные осадки и осадочные породы</b>                              |   |   |   |
| Современные осадки Тихого океана  | 19,04                                     | 15,68                                     | 39,07                                     |
| Красная глина   | 18,95                                     | 15,61                                     | 38,92                                     |
| Марганцевые конкреции со дна Атлантического океана (проба из 10 образцов) | 18,96                                     | 15,63                                     | 39,07                                     |
| Марганцевые конкреции со дна Тихого океана (проба из 16 образцов)         | 18,69                                     | 15,61                                     | 38,82                                     |
| Среднее значение для всех глубоководных марганцевых конкреций             | 18,92                                     | 15,80                                     | 39,40                                     |
| <b>Кислые и средние изверженные породы</b>                                |   |   |   |
| Гранит, Питкяранта, Карелия   | 26,40                                     | 17,40                                     | 46,00                                     |
| Гранит, Питкяранта, Карелия   | 17,58                                     | 15,44                                     | 37,29                                     |
| Гранит, Терской-Алатау  | 19,40                                     | 15,91                                     | 39,29                                     |
| Гранит, Онтарио, Канада   | 20,25                                     | 15,65                                     | 48,73                                     |
| Гранит, Мутехе, ДВК   | 20,50                                     | 17,10                                     | 42,25                                     |
| Кварцевый альбитофир, Алтай   | 19,15                                     | 15,20                                     | 37,35                                     |
| Гранодиорит, Парыгино, Алтай  | 17,90                                     | 14,90                                     | 37,40                                     |
| Кварцевый диорит, Кличка, Восточное Забайкалье                            | 20,18                                     | 15,40                                     | 38,85                                     |
| <b>Основные и ультраосновные породы</b>                                   |   |   |   |
| Диорит, Вилимяки, Карелия   | 21,40                                     | 14,60                                     | 37,10                                     |
| Базальт, Камчатка, СССР   | 17,40                                     | 14,90                                     | 36,60                                     |
| Платобазальт, Айдахо, США   | 18,12                                     | 15,45                                     | 38,08                                     |
| Траппы, Сибирь, СССР  | 17,94                                     | 15,26                                     | 37,50                                     |
| Вулканическая бомба, Хуалалай, Гавайские острова                          | 19,29                                     | 15,45                                     | 37,95                                     |
| Вулканическая бомба, Дрейзер-Вефер, оливинное включение                   | 19,43                                     | 15,30                                     | 37,85                                     |
| Вулканическая бомба, Сан-Бернардино, Калифорния, США, оливинное включение | 19,16                                     | 15,46                                     | 37,78                                     |
| Дунит, Твин Систер, Вашингтон, США  | 19,15                                     | 16,54                                     | 39,80                                     |
| <b>Лунные горные породы</b>   |   |   |   |
| Лунный базальт, «Аполлон-11»  |   |   |   |
| D — пылевой материал  | 141,18                                    | 92,80                                     | 153,79                                    |
| C — брекчия   | 77,77                                     | 51,97                                     | 82,31                                     |
| A — кристаллическая порода  | 206,9                                     | 99,8                                      | 225,6                                     |
| Лунный апортозит, обр. 60015, «Аполлон-16»                                |   |   |   |
| Оторочка черного стекла   | 219,3                                     | 205,5                                     | 220,9                                     |
| Вкрапленный плаггиоклаза в оторочке                                       | 29,26                                     | 27,17                                     | 47,27                                     |
| Белое «стекло» и плаггиоклаз  | 63,17                                     | 67,28                                     | 75,61                                     |
| Двухмиллиметровый плаггиоклаз из пограничной зоны, стекло-плаггиоклаз     | 50,66                                     | 62,23                                     | 63,19                                     |
| Внутренняя зона плаггиоклаза  | 70,27                                     | 92,52                                     | 79,03                                     |

\* По данным А. П. Виноградова, И. К. Задорожного, С. И. Зыкова (1955); А. В. Рабиновича, Г. Р. Рика, М. Н. Голубчина (1956); И. Е. Старика, Э. В. Собоновича, М. М. Шац (1960); Р. Маршалла, Д. Хелда (Marshall, Helld, 1959), Д. Тилтона; К. Паттерсона (Tilton, Patterson, 1956).

| Источник свинца                           | $\frac{206\text{Pb}}{204\text{Pb}}$ | $\frac{207\text{Pb}}{204\text{Pb}}$ | $\frac{208\text{Pb}}{204\text{Pb}}$ |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|   | <b>Хондритовые метеориты</b>        |                                     |                                     |
| Форест-Сити, Айова, США                   | 19,27                               | 15,95                               | 39,05                               |
| Модок, Канзас, США                        | 19,48                               | 15,76                               | 38,21                               |
| Саратов, СССР                             | 19,53                               | 16,70                               | 40,25                               |
| Кунашак, СССР                             | 19,64                               | 16,24                               | 40,04                               |
| Еленовка, СССР                            | 21,54                               | 16,94                               | 39,86                               |
| Холбрук                                   | 17,52                               | 15,52                               | 38,93                               |
| Ричардтон                                 | 27,57                               | 22,13                               | 48,51                               |
| Алленде (углистый хондрит)                | 9,38                                | 10,31                               | (29,51)                             |
| Мурчисон (углистый хондрит)               | 9,40                                | 10,32                               | (29,33)                             |
| Мезо-Мадрас (углистый хондрит)            | 9,31                                | 10,29                               | (29,57)                             |
| <b>Ахондритовые метеориты</b>             |                                     |                                     |                                     |
| Нуево Ларедо, Мексика                     | 50,28                               | 34,86                               | 67,97                               |
| Нортон-Каунти, США                        | 22,75                               | 15,87                               | 37,70                               |
| <b>Железные метеориты (группа I)</b>      |                                     |                                     |                                     |
| Хенбери, Австралия, троилит               | 9,55                                | 10,38                               | 29,54                               |
| Каньон Дьябло, Аризона, США               | 9,46                                | 10,34                               | 29,44                               |
| Каньон Дьябло, № 2264, металлическая фаза | 9,43                                | 10,58                               | 29,80                               |
| Каньон Дьябло, № 2264, троилит            | 9,41                                | 10,27                               | 29,16                               |
| Бургабли, № 2262, металлическая фаза      | 9,34                                | 10,53                               | 30,28                               |
| Бургабли, № 2262, троилит                 | 9,79                                | 10,68                               | 30,27                               |
| Толука, № 142                             | 9,87                                | 10,70                               | 30,36                               |
| Биштюбе, металлическая фаза               | 9,80                                | 10,74                               | 30,08                               |
| Биштюбе, троилит                          | 17,72                               | 15,47                               | 38,40                               |
| Арус, металлическая фаза                  | 10,14                               | 10,85                               | 30,78                               |
| Арус, троилит                             | 10,01                               | 10,85                               | 30,78                               |
| <b>Железные метеориты (группа II)</b>     |                                     |                                     |                                     |
| Августиновка                              | 16,80                               | 15,20                               | 37,30                               |
| Тубил, металлическая фаза                 | 17,49                               | 15,56                               | 37,62                               |
| Тубил, троилит                            | 17,40                               | 15,35                               | 37,35                               |
| Хенбери, № 171, металлическая фаза        | 18,12                               | 15,72                               | 38,55                               |
| Хенбери, № 171, троилит                   | 18,41                               | 15,78                               | 39,00                               |
| Санта Катарина, № 2179                    | 17,99                               | 15,67                               | 38,51                               |
| Сихоте-Алинь, № 2052, металлическая фаза  | 17,89                               | 15,84                               | 38,19                               |
| Сихоте-Алинь, № 2052, троилит             | 18,10                               | 14,48                               | 35,85                               |
| Сихоте-Алинь, № 2052, троилит             | 17,60                               | 15,76                               | 37,83                               |
| Сихоте-Алинь, № 1633                      | 17,55                               | 15,60                               | 37,97                               |
| Греск, троилит                            | 18,07                               | 15,87                               | 38,23                               |
| Греск, металлическая фаза                 | 17,99                               | 15,84                               | 38,23                               |
| Чинге                                     | 16,89                               | 15,27                               | 35,38                               |
| Чебанкол                                  | 17,68                               | 15,76                               | 38,49                               |
| Богуславка, № 104                         | 17,39                               | 16,11                               | 37,33                               |

Неопределенность в вычислении возраста возникает в связи с принятием изотопного состава первичного свинца, как свинца с изотопным составом железного метеорита Каньон Диабло. Отсюда также возникает неопределенность в определении возраста Земли, который в данной формуле обычно принимается  $\omega = = 4,5 \cdot 10^9$  лет.

Метод Расселла — Фаркуара — Камминга исходит из предположения, что в недрах Земли, которые являются источником рудного свинца и радиоэлементов,  $Pb : U : Th$  хорошо перемешаны, образуя некий гомогенный источник. Иначе говоря, допускается, что отношение  $Pb : U : Th$  изменяется только в результате радиоактивного распада. При этом расчет возраста производится по уравнениям:

$$x = a - 137,8V (e^{\lambda_1 t} - 1),$$

$$y = b - V (e^{\lambda_2 t} - 1),$$

$$z = c - W (e^{\lambda_3 t} - 1),$$

где  $x, y, z$  — изотопные отношения в рудном свинце, соответственно  $^{206}Pb : ^{204}Pb$ ,  $^{207}Pb : ^{204}Pb$ ,  $^{208}Pb : ^{204}Pb$ ;

$a, b, c$  — эти же соотношения в современном свинце;

$$V = ^{235}U : ^{204}Pb;$$

$$W = ^{232}Th : ^{204}Pb.$$

Расчет возраста по обоим методам производится по табл. 97 и 98.

Изотопный состав свинца в природных объектах испытывает значительные колебания, связанные с историей этих объектов, их радиоактивностью и возрастом. Наиболее характерный пример изотопного состава свинца горных пород и метеоритов приведен в табл. 99.

## АРГОНОВЫЙ МЕТОД

Аргоновый метод основан на радиогенном накоплении аргона в калиевых минералах или минералах, содержащих калий в виде примеси. Источником радиогенного аргона является радиоактивный изотоп калия  $^{40}K$ . Большая часть этого изотопа (около 90%) путем  $\beta$ -распада превращается в  $^{40}Ca$ , остальная часть путем электронного захвата превращается в аргон. Аргоновый метод был предложен Э. К. Герлингом в Ленинграде.

Вследствие широкого распространения в природе калийсодержащих минералов и относительной простоты аналитических методов аргоновый метод стал одним из наиболее часто применяемых в ядерной геохронологии. В настоящее время аргоновым методом определяют возраст изверженных горных пород (по слодам, амфиболам), осадочных пород (по глаукониту, силвину), метаморфических пород, для которых с известным приближением дается возраст метаморфизма. Определение возраста аргоновым методом производится путем измерения отношения  $^{40}Ar : ^{40}K$  в калийсодержащих минералах, которое возрастает пропорционально возрасту данного минерала. Возраст вычисляют по формуле:

$$\frac{^{40}Ar}{^{40}K} = \frac{\lambda_e}{\lambda_e + \lambda_\beta} [e^{(\lambda_e + \lambda_\beta)t} - 1],$$

где  $\lambda_e$  — константа электронного захвата  $^{40}K$ ;

$\lambda_\beta$  — константа  $\beta$ -распада  $^{40}K$ ;

$e$  — основание натуральных логарифмов;

$t$  — возраст минерала;

$^{40}Ar : ^{40}K$  — атомное или весовое соотношение соответствующих изотопов, поскольку оба изотопа имеют практически одинаковую атомную массу.

Иногда для вычисления возраста пользуются несколько видоизмененной формулой:

$$\frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{40}\text{K}} = \frac{R}{1+R} (e^{\lambda t} - 1),$$

где  $R = \lambda_e : \lambda_\beta$  и  $\lambda = \lambda_e + \lambda_\beta$ .

Для непосредственного нахождения возраста эту формулу можно преобразовать так:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left( 1 + \frac{1+R}{R} \frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{40}\text{K}} \right).$$

Однако для большего удобства вычислений можно пользоваться заранее составленными графиками, номограммами и таблицами, в которых дана зависимость отношения  ${}^{40}\text{Ar} : {}^{40}\text{K}$  от возраста.

Методика определения содержания калия и аргона описана во многих работах (Старик, 1961; Герлинг, 1961). Имеются также многочисленные исследования по вопросу сохранности радиогенного аргона в минералах, что для аргонового метода представляется особенно важным при получении надежных и достоверных величин возраста.

По данным А. Нира, относительное распространение изотопов калия в земной коре равно:  ${}^{39}\text{K} = 93,08 \pm 0,04\%$ ;  ${}^{40}\text{K} = 0,0119 \pm 0,0001\%$ ;  ${}^{41}\text{K} = 6,91 \pm 0,04\%$ ;

При вычислении возраста до настоящего времени используют следующее весовое отношение изотопов калия:

$$\frac{{}^{40}\text{K}}{{}^{39}\text{K} + {}^{41}\text{K}} = 0,0122 \cdot 10^{-2}.$$

При вычислении возраста в разных странах используют различные значения константы распада калия. В СССР приняты следующие значения:  $\lambda_e = 0,557 \times 10^{-10} \text{лет}^{-1}$ ,  $\lambda_\beta = 4,72 \cdot 10^{-10} \text{лет}^{-1}$ . Наиболее часто используемые константы распада приведены в табл. 100, 101.

Т а б л и ц а 100

Константы для вычисления возраста калий-аргоновым методом

| $\lambda_e \cdot 10^{-10} \text{лет}^{-1}$ | $\lambda_\beta \cdot 10^{-10} \text{лет}^{-1}$ | $(\lambda_e + \lambda_\beta) \cdot 10^{-10} \text{лет}^{-1}$ |
|--|--|--|
| 0,557                                      | 4,72   | 5,277  |
| 0,585                                      | 4,72   | 5,305  |
| 0,585                                      | 4,83   | 5,415  |
| 0,6  | 4,9  | 5,5  |

### СТРОНЦИЕВЫЙ МЕТОД

Стронциевый метод основан на радиоактивном распаде изотопа рубидия  ${}^{87}\text{Rb}$  и превращении его в изотоп стронция  ${}^{87}\text{Sr}$ . Природный рубидий состоит из двух изотопов с массами 87 и 85. Радиоактивный изотоп присутствует в количестве 27,2%. Определение возраста минералов и пород производится по отношению:

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{87}\text{Rb}} = e^{\lambda t} - 1.$$

Вычисление возраста по отношению  $^{40}\text{Ar} : ^{40}\text{K}$ 

| Возраст,<br>млн. лет | $\lambda_e = 0,557 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_\beta = 4,72 \cdot 10^{-10}$ | $\lambda_e = 0,585 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_\beta = 4,72 \cdot 10^{-10}$ | $\lambda_e = 0,585 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_\beta = 4,83 \cdot 10^{-10}$ | $\lambda_e = 0,6 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_\beta = 4,9 \cdot 10^{-10}$ |
|----------------------|---|---|---|--|
| 0                    | 0,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 0,000000   |
| 1                    | 0,000056  | 0,000058  | 0,000058  | 0,000060   |
| 2                    | 0,000112  | 0,000117  | 0,000117  | 0,000120   |
| 3                    | 0,000168  | 0,000176  | 0,000175  | 0,000179   |
| 4                    | 0,000224  | 0,000236  | 0,000234  | 0,000279   |
| 5                    | 0,000280  | 0,000293  | 0,000293  | 0,000299   |
| 6                    | 0,000335  | 0,000352  | 0,000351  | 0,000359   |
| 7                    | 0,000391  | 0,000410  | 0,000410  | 0,000419   |
| 8                    | 0,000447  | 0,000469  | 0,000470  | 0,000480   |
| 9                    | 0,000503  | 0,000527  | 0,000529  | 0,000541   |
| 10                   | 0,000559  | 0,000587  | 0,000587  | 0,000601   |
| 11                   | 0,000615  | 0,000645  | 0,000646  | 0,000661   |
| 12                   | 0,000671  | 0,000705  | 0,000705  | 0,000721   |
| 13                   | 0,000727  | 0,000763  | 0,000763  | 0,000781   |
| 14                   | 0,000783  | 0,000822  | 0,000822  | 0,000840   |
| 15                   | 0,000839  | 0,000881  | 0,000881  | 0,000902   |
| 16                   | 0,000895  | 0,000940  | 0,000940  | 0,000963   |
| 17                   | 0,000950  | 0,000999  | 0,001000  | 0,001023   |
| 18                   | 0,001006  | 0,001059  | 0,001058  | 0,001085   |
| 19                   | 0,001062  | 0,001119  | 0,001119  | 0,001147   |
| 20                   | 0,001119  | 0,001177  | 0,001177  | 0,001207   |
| 21                   | 0,001175  | 0,001235  | 0,001235  | 0,001265   |
| 22                   | 0,001232  | 0,001295  | 0,001295  | 0,001328   |
| 23                   | 0,001288  | 0,001328  | 0,001353  | 0,001387   |
| 24                   | 0,001344  | 0,001413  | 0,001412  | 0,001450   |
| 25                   | 0,001401  | 0,001505  | 0,001472  | 0,001511   |
| 26                   | 0,001458  | 0,001542  | 0,001531  | 0,001582   |
| 27                   | 0,001513  | 0,001602  | 0,001591  | 0,001643   |
| 28                   | 0,001571  | 0,001661  | 0,001650  | 0,001682   |
| 29                   | 0,001627  | 0,001720  | 0,001710  | 0,001743   |
| 30                   | 0,001684  | 0,001779  | 0,001769  | 0,001805   |
| 31                   | 0,001758  | 0,001839  | 0,001828  | 0,001866   |
| 32                   | 0,001797  | 0,001898  | 0,001888  | 0,001927   |
| 33                   | 0,001850  | 0,001958  | 0,001947  | 0,001989   |
| 34                   | 0,001910  | 0,002007  | 0,002006  | 0,002052   |
| 35                   | 0,001967  | 0,002067  | 0,002066  | 0,002121   |
| 36                   | 0,002025  | 0,002127  | 0,002125  | 0,002182   |
| 37                   | 0,002080  | 0,002186  | 0,002184  | 0,002243   |
| 38                   | 0,002137  | 0,002246  | 0,002245  | 0,002300   |
| 39                   | 0,002194  | 0,002280  | 0,002306  | 0,002367   |
| 40                   | 0,002250  | 0,002366  | 0,002365  | 0,002428   |
| 41                   | 0,002307  | 0,002425  | 0,002423  | 0,002489   |
| 42                   | 0,002364  | 0,002485  | 0,002486  | 0,002555   |
| 43                   | 0,002421  | 0,002546  | 0,002546  | 0,002613   |
| 44                   | 0,002479  | 0,002605  | 0,002606  | 0,002604   |
| 45                   | 0,002536  | 0,002665  | 0,002665  | 0,002735   |
| 46                   | 0,002593  | 0,002724  | 0,002724  | 0,002797   |
| 47                   | 0,002649  | 0,002785  | 0,002785  | 0,002858   |
| 48                   | 0,002706  | 0,002845  | 0,002845  | 0,002919   |
| 49                   | 0,002764  | 0,002905  | 0,002904  | 0,002982   |
| 50                   | 0,002821  | 0,002965  | 0,002964  | 0,003043   |
| 55                   | 0,003107  | 0,003256  | 0,003264  | 0,003352   |
| 60                   | 0,003394  | 0,003567  | 0,003566  | 0,003660   |

| Возраст,<br>млн. лет | $\lambda_e = 0,557 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_\beta = 4,72 \cdot 10^{-10}$ | $\lambda_e = 0,585 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_\beta = 4,72 \cdot 10^{-10}$ | $\lambda_e = 0,585 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_\beta = 4,83 \cdot 10^{-10}$ | $\lambda_e = 0,6 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_\beta = 4,9 \cdot 10^{-10}$ |
|----------------------|---|---|---|--|
| 65                   | 0,003681  | 0,003870  | 0,003868  | 0,003971   |
| 70                   | 0,003970  | 0,004173  | 0,004172  | 0,004282   |
| 75                   | 0,004269  | 0,004477  | 0,004477  | 0,004597   |
| 80                   | 0,004549  | 0,004782  | 0,004806  | 0,004908   |
| 85                   | 0,004840  | 0,005087  | 0,005087  | 0,005219   |
| 90                   | 0,005131  | 0,005394  | 0,005394  | 0,005537   |
| 95                   | 0,005424  | 0,005701  | 0,005701  | 0,005852   |
| 100                  | 0,005717  | 0,006009  | 0,006009  | 0,006169   |
| 110                  | 0,006305  | 0,006628  | 0,006629  | 0,006802   |
| 120                  | 0,006897  | 0,007250  | 0,007251  | 0,007443   |
| 130                  | 0,007492  | 0,007875  | 0,007876  | 0,008086   |
| 140                  | 0,008090  | 0,008504  | 0,008506  | 0,008708   |
| 150                  | 0,008690  | 0,009136  | 0,009138  | 0,009382   |
| 160                  | 0,009294  | 0,009771  | 0,009775  | 0,010036   |
| 170                  | 0,009899  | 0,010438  | 0,010433  | 0,010693   |
| 180                  | 0,010512  | 0,011052  | 0,011057  | 0,011354   |
| 190                  | 0,011126  | 0,011697  | 0,011703  | 0,012018   |
| 200                  | 0,011764  | 0,012346  | 0,012353  | 0,012686   |
| 210                  | 0,012346  | 0,012999  | 0,013064  | 0,013345   |
| 220                  | 0,012987  | 0,013654  | 0,013664  | 0,014036   |
| 230                  | 0,013614  | 0,014314  | 0,014324  | 0,014712   |
| 240                  | 0,014245  | 0,014977  | 0,014988  | 0,015495   |
| 250                  | 0,014878  | 0,015640  | 0,015657  | 0,016181   |
| 260                  | 0,015515  | 0,016312  | 0,016327  | 0,016872   |
| 270                  | 0,016157  | 0,016986  | 0,017002  | 0,017566   |
| 280                  | 0,016799  | 0,017802  | 0,017682  | 0,018263   |
| 290                  | 0,017445  | 0,018344  | 0,018364  | 0,018965   |
| 300                  | 0,018096  | 0,019026  | 0,019050  | 0,019670   |
| 310                  | 0,018951  | 0,019716  | 0,019740  | 0,020489   |
| 320                  | 0,019408  | 0,020432  | 0,020432  | 0,021094   |
| 330                  | 0,020068  | 0,021103  | 0,021142  | 0,021822   |
| 340                  | 0,020733  | 0,021802  | 0,021832  | 0,022533   |
| 350                  | 0,021401  | 0,022501  | 0,022536  | 0,023258   |
| 360                  | 0,022073  | 0,023211  | 0,023337  | 0,023988   |
| 370                  | 0,022746  | 0,023921  | 0,023959  | 0,024722   |
| 380                  | 0,023425  | 0,024636  | 0,024675  | 0,025359   |
| 390                  | 0,024107  | 0,025363  | 0,025406  | 0,026101   |
| 400                  | 0,024794  | 0,026080  | 0,026130  | 0,026847   |
| 410                  | 0,025482  | 0,026800  | 0,026867  | 0,027597   |
| 420                  | 0,026176  | 0,027540  | 0,027590  | 0,028347   |
| 430                  | 0,026873  | 0,028263  | 0,028328  | 0,029099   |
| 440                  | 0,027572  | 0,028999  | 0,029067  | 0,029851   |
| 450                  | 0,028277  | 0,029748  | 0,029918  | 0,030605   |
| 460                  | 0,028996  | 0,030486  | 0,030569  | 0,031361   |
| 470                  | 0,029717  | 0,031235  | 0,031309  | 0,032117   |
| 480                  | 0,030424  | 0,031997  | 0,032079  | 0,032962   |
| 490                  | 0,031142  | 0,032745  | 0,032850  | 0,033758   |
| 500                  | 0,031865  | 0,033505  | 0,033583  | 0,034533   |
| 550                  | 0,035537  | 0,037371  | 0,037468  | 0,03539  |
| 600                  | 0,039318  | 0,041339  | 0,041460  | 0,042652   |
| 650                  | 0,043288  | 0,045426  | 0,045562  | 0,046996   |
| 700                  | 0,047154  | 0,049602  | 0,049785  | 0,051235   |
| 750                  | 0,051234  | 0,053900  | 0,054126  | 0,055705   |
| 800                  | 0,055435  | 0,058313  | 0,058565  | 0,060091   |

| Возраст,<br>млн. лет | $\lambda_e = 0,557 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_\beta = 4,72 \cdot 10^{-10}$ | $\lambda_e = 0,585 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_\beta = 4,72 \cdot 10^{-10}$ | $\lambda_e = 0,585 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_\beta = 4,83 \cdot 10^{-10}$ | $\lambda_e = 0,6 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_\beta = 4,9 \cdot 10^{-10}$ |
|----------------------|---|---|---|--|
| 850                  | 0,059727  | 0,062845  | 0,063147  | 0,064924   |
| 900                  | 0,064144  | 0,067509  | 0,067833  | 0,069899   |
| 950                  | 0,068780  | 0,072388  | 0,072669  | 0,074947   |
| 1000                 | 0,073347  | 0,077277  | 0,077527  | 0,079998   |
| 1050                 | 0,078186  | 0,082236  | 0,082610  | 0,085270   |
| 1100                 | 0,083026  | 0,087401  | 0,087845  | 0,090705   |
| 1150                 | 0,088055  | 0,092715  | 0,093222  | 0,096369   |
| 1200                 | 0,093241  | 0,098171  | 0,098757  | 0,101996   |
| 1250                 | 0,098544  | 0,103886  | 0,104420  | 0,107372   |
| 1300                 | 0,103999  | 0,109536  | 0,110356  | 0,113921   |
| 1350                 | 0,109611  | 0,115433  | 0,116340  | 0,120140   |
| 1400                 | 0,115406  | 0,121506  | 0,122505  | 0,126053   |
| 1450                 | 0,121235  | 0,127200  | 0,128902  | 0,133190   |
| 1500                 | 0,127330  | 0,134146  | 0,135300  | 0,139842   |
| 1550                 | 0,133553  | 0,140705  | 0,142009  | 0,146784   |
| 1600                 | 0,139944  | 0,147452  | 0,148960  | 0,153920   |
| 1650                 | 0,146507  | 0,154480  | 0,156010  | 0,161253   |
| 1700                 | 0,152133  | 0,161517  | 0,163151  | 0,168791   |
| 1750                 | 0,159050  | 0,168801  | 0,170694  | 0,176549   |
| 1800                 | 0,166152  | 0,176304  | 0,178240  | 0,184503   |
| 1850                 | 0,173444  | 0,184017  | 0,186095  | 0,192700   |
| 1900                 | 0,181033  | 0,191928  | 0,194277  | 0,201115   |
| 1950                 | 0,188620  | 0,200042  | 0,202702  | 0,209763   |
| 2000                 | 0,196513  | 0,208483  | 0,211080  | 0,218654   |
| 2050                 | 0,204623  | 0,216950  | 0,219746  | 0,227792   |
| 2100                 | 0,214038  | 0,225745  | 0,228739  | 0,236837   |
| 2150                 | 0,222581  | 0,234870  | 0,237960  | 0,246840   |
| 2200                 | 0,231354  | 0,243946  | 0,247567  | 0,256764   |
| 2250                 | 0,240363  | 0,253570  | 0,257374  | 0,267075   |
| 2300                 | 0,249610  | 0,263251  | 0,267235  | 0,277451   |
| 2350                 | 0,259101  | 0,273293  | 0,277534  | 0,288220   |
| 2400                 | 0,267850  | 0,283608  | 0,288115  | 0,299407   |
| 2450                 | 0,278968  | 0,294200  | 0,298996  | 0,310782   |
| 2500                 | 0,288129  | 0,305075  | 0,310162  | 0,322587   |
| 2550                 | 0,298684  | 0,316244  | 0,321632  | 0,334532   |
| 2600                 | 0,309580  | 0,327713  | 0,333434  | 0,346614   |
| 2650                 | 0,321641  | 0,339598  | 0,345674  | 0,359507   |
| 2700                 | 0,333061  | 0,351692  | 0,356952  | 0,372572   |
| 2750                 | 0,344943  | 0,364109  | 0,369796  | 0,386002   |
| 2800                 | 0,356825  | 0,376862  | 0,382936  | 0,399808   |
| 2850                 | 0,369086  | 0,389956  | 0,396437  | 0,414187   |
| 2900                 | 0,381676  | 0,403404  | 0,410307  | 0,428580   |
| 2950                 | 0,394608  | 0,417103  | 0,425250  | 0,443571   |
| 3000                 | 0,407990  | 0,431391  | 0,440193  | 0,458980   |
| 3100                 | 0,444618  | 0,460903  | 0,470696  | 0,491100   |
| 3200                 | 0,465163  | 0,492023  | 0,502897  | 0,525035   |
| 3300                 | 0,486558  | 0,524850  | 0,535908  | 0,560891   |
| 3400                 | 0,529722  | 0,559443  | 0,572782  | 0,598774   |
| 3500                 | 0,564106  | 0,595785  | 0,610602  | 0,638795   |
| 3600                 | 0,600354  | 0,634410  | 0,650641  | 0,681082   |
| 3700                 | 0,638565  | 0,674982  | 0,692852  | 0,725758   |
| 3800                 | 0,678855  | 0,717766  | 0,737415  | 0,772960   |
| 3900                 | 0,721321  | 0,762881  | 0,784456  | 0,822832   |
| 4000                 | 0,766084  | 0,810454  | 0,834114  | 0,875534   |
| 4100                 | 0,812275  | 0,861985  | 0,886144  | 0,931193   |

| Возраст,<br>млн. лет | $\lambda_e = 0,557 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_{\beta} = 4,72 \cdot 10^{-10}$ | $\lambda_e = 0,585 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_{\beta} = 4,72 \cdot 10^{-10}$ | $\lambda_e = 0,585 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_{\beta} = 4,83 \cdot 10^{-10}$ | $\lambda_e = 0,6 \cdot 10^{-10}$<br>$\lambda_{\beta} = 4,9 \cdot 10^{-10}$ |
|----------------------|---|---|---|--|
| 4200                 | 0,862022  | 0,913517  | 0,941876  | 0,990017   |
| 4300                 | 0,914464  | 0,969297  | 1,000285  | 1,052160   |
| 4400                 | 0,969752  | 1,028117  | 1,061953  | 1,117826   |
| 4500                 | 1,028030  | 1,09047   | 1,12706   | 1,187193   |
| 4600                 | 1,089773  | 1,155470  | 1,195797  | 1,260487   |
| 4700                 | 1,154542  | 1,224506  | 1,268330  | 1,337915   |
| 4800                 | 1,222828  | 1,297346  | 1,345021  | 1,409740   |
| 4900                 | 1,294791  | 1,373920  | 1,425762  | 1,496183   |
| 5000                 | 1,370656  | 1,454780  | 1,511039  | 1,587516   |
| 5200                 | 1,534983  | 1,625954  | 1,696302  | 1,785950   |
| 5400                 | 1,717582  | 1,824750  | 1,902670  | 1,999830   |
| 5600                 | 1,920511  | 2,041356  | 2,132665  | 2,264731   |
| 5800                 | 2,146039  | 2,282204  | 2,388950  | 2,540753   |
| 6000                 | 2,396654  | 2,549971  | 2,674477  | 2,838874   |

Слабая радиоактивность рубидия была серьезным препятствием для установления скорости его распада. Поэтому (хотя сама радиоактивность рубидия была открыта давно) только в настоящее время удалось определить скорость его распада с точностью, необходимой для геохронологических целей. Большая часть вычислений возраста стронциевым методом производится по двум константам:

$$T_{\text{Rb}} \cdot 5 \cdot 10^{10} \text{ лет}, \lambda_{\text{Rb}} = 1,39 \cdot 10^{-11} \text{ лет}^{-1};$$

$$T_{\text{Rb}} = 4,7 \cdot 10^{10} \text{ лет}, \lambda_{\text{Rb}} = 1,47 \cdot 10^{-11} \text{ лет}^{-1}.$$

При вычислении возраста по этим двум константам расхождение составляет 6%. Обычно используют константу  $\lambda_{\text{Rb}} = 1,39 \cdot 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$ .

Самостоятельных минералов рубидий не образует, а содержится в виде примеси в калийсодержащих минералах. Важнейшими из них являются биотит, мусковит, лепидолит, флогопит, а также калиевые полевые шпаты. В некоторых случаях для измерения возраста оказываются пригодными те глаукониты, которые содержат заметную примесь рубидия.

Природный стронций состоит из четырех изотопов с относительным распространением  $^{84}\text{Sr} = 0,56\%$ ,  $^{86}\text{Sr} = 9,86\%$ ,  $^{87}\text{Sr} = 7,02\%$ ,  $^{88}\text{Sr} = 82,56\%$ .

При расчетах возраста в качестве первичного отношения  $^{87}\text{Sr} : ^{86}\text{Sr}$  используют значение  $0,69884 \pm 0,00004$ , найденное как минимальное в некоторых ахондритовых метеоритах и образцах древнейших лунных горных пород. Чаще всего при определении возраста пород по стронцию используют метод изохрон. Он заключается в том, что масс-спектрометрическим способом определяют отношение  $^{87}\text{Sr} : ^{86}\text{Sr}$  и  $^{87}\text{Rb} : ^{86}\text{Sr}$  в исследуемом образце в нескольких минеральных фракциях, в которых содержание рубидия может быть разным. Затем найденные отношения наносят на график в координатах с  $^{87}\text{Sr} : ^{86}\text{Sr}$  (обычно ось ординат) и  $^{87}\text{Rb} : ^{86}\text{Sr}$  (обычно ось абсцисс). На основании нескольких точек (не менее трех) проводят прямую, которая представляет собой изохрону. Она образует угол с осью абсцисс. Тангенс этого угла представляет собой отношение, по которому легко можно найти возраст.

Однако часто бывают случаи, когда разные минеральные фракции одной и той же породы дают разный возраст по стронцию и не дают возможность построить изохрону. Это свидетельствует о миграции стронция и рубидия в течение истории породы и затрудняет получение надежных значений возраста. Вопросы, связанные с применением стронциевого метода, подробно рассмотрены в работах Э. К. Герлинга и И. М. Горохова (1963), П. В. Гаста (1963), В. Компстона и П. М. Джеффри (1963), Г. Фора и Дж. Пауэлла (1974).

## ВОЗРАСТ МЕТЕОРИТОВ

Возраст метеоритов (время с момента их затвердевания) в основном определяется от 4500 до 4650 млн. лет. В табл. 102 приведены некоторые данные, полученные при применении свинцового, аргонового и стронциевого методов.

Т а б л и ц а 102

Возраст метеоритов по данным разных методов (в млн. лет)

| Метеорит  | <sup>207</sup> Pb : <sup>206</sup> Pb | <sup>40</sup> Ar : <sup>40</sup> K | <sup>87</sup> Sr : <sup>87</sup> Rb |
|---|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Хондриты:</b>                                      |                                       |                                    |                                     |
| Форест-Сити   | 4500                                  | 4670                               | 4700                                |
| Модок   | 4420                                  | —                                  | —                                   |
| Саратов   | 4640                                  | —                                  | —                                   |
| Кунашак   | 4530                                  | 3800                               | —                                   |
| Еленовка  | 4420                                  | 4000                               | —                                   |
| Холбрук   | 4660                                  | 4400                               | —                                   |
| Ричардтон   | 4700                                  | 4150                               | —                                   |
| Алленде   | —                                     | 4550                               | 4620                                |
| <b>Ахондриты:</b>                                     |                                       |                                    |                                     |
| Нуево-Ларедо  | 4570                                  | 3600                               | —                                   |
| Нортон-Каунти   | 4500                                  | 4500                               | 4700 ± 100                          |
| Пасамонте   | —                                     | 3800                               | 4540                                |
| Ювинас  | —                                     | —                                  | 4600 ± 70                           |
| Ангра-дос-Роиш  | —                                     | —                                  | 4620                                |
| <b>Железные метеориты (по силикатным включениям):</b> |                                       |                                    |                                     |
| Викеру  | —                                     | 4560                               | 4500                                |
| Толука  | —                                     | 4540                               | 4600                                |
| Фор-Корнерс   | —                                     | 4640                               | 4500                                |
| Кадайканал  | —                                     | 3500                               | 3800                                |

Примечание. Заниженные данные по аргоновому методу объясняются потерей радиогенного аргона метеоритами.

## ВОЗРАСТ ЗЕМЛИ

Возраст Земли не может быть меньше возраста древнейших горных пород земной коры ( $\approx 3,9 \cdot 10^9$  лет), которые являются вторичными образованиями, и больше возраста тяжелых изотопов земного вещества ( $\approx 5,5 \cdot 10^9$  лет), которые формировались в космических условиях. Расчеты возраста Земли основывались главным образом на обработке данных свинцово-изотопных отношений земных пород и метеоритов. Большинство результатов расчетов возраста Земли дает величину  $4,6 \pm 0,1 \cdot 10^9$  лет. Однако эта величина относится ко времени существования Земли как дифференцированного тела, в котором произошло разделение вещества на отдельные оболочки и в глубинах планеты (в ее ядре) сохранился первичный свинец, близкий по своему изотопному составу к свинцу железных метеоритов типа I. Поскольку нам не известна длительность синтеза тяжелых ядер и длительность формирования Земли (по некоторым допущениям эти величины порядка  $10^8$  лет), то истинный возраст Земли как самостоятельно эволюционирующей планеты солнечной системы находится в пределах  $(4,6-5) \cdot 10^9$  лет. Последняя обработка свинцово-изотопных данных, выполненная А. Синха и Дж. Тилтоном (1973 г.), дает возраст Земли  $4,66 \cdot 10^9$  лет, что в общем довольно хорошо согласуется с возрастом большинства метеоритов, определенным разными методами и возрастом Луны ( $4,62 \cdot 10^9$  лет).

По геологическим данным, древнейшие горные породы Земли залегают в пределах докембрийских щитов. Радиологические данные показывают, что самые древние минералы и горные породы земной коры имеют возраст не менее 3500 млн. лет. Значения возраста древнейших известных минералов и горных пород приведены в табл. 103.

Возраст древнейших минералов и горных пород (в млн. лет)  
по данным разных методов

| Минерал, порода, местонахождение   | $^{207}\text{Pb} : ^{206}\text{Pb}$ | $^{40}\text{Ar} : ^{40}\text{K}$ | $^{87}\text{Sr} : ^{87}\text{Rb}$ |
|--|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Гнейсы, Гиброн, Лабрадор, Канада   | —                                   | —                                | $3600 \pm 70$                     |
| Циркон из гнейса Мортон, Миннесота, США  | 3500                                | —                                | —                                 |
| Гнейсы Викап, Северная Норвегия  | $3460 \pm 70$                       | —                                | —                                 |
| Древние гнейсы бассейна р. Вороньей, Кольский п-ов                             | —                                   | 3500                             | —                                 |
| Древние породы Приднепровья, р. Конка, Древний гранит Свазиленда, Южная Африка | 3500                                | 3500                             | —                                 |
| Серия Овервайт, Южная Африка   | —                                   | —                                | 3200                              |
| Чарнокиты, Земля Эндерби, Восточная Антарктида                                 | $3900 \pm 300$                      | —                                | 3440                              |
| Кристаллические породы системы Годтабид Западной Гренландия                    | 3600                                | —                                | $3700 \pm 100$                    |

### ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКАЯ ШКАЛА

На рис. 18 представлена геохронологическая шкала, принятая Комиссией по определению абсолютного возраста геологических формаций АН СССР в 1964 г. Она является обобщением большой работы, проведенной советскими геологами

Таблица 104

### Геохронологическая схема деления докембрия

| Эры               | Деление                            |  | Возраст, млн. лет              | Тектоно-магматические циклы                 |
|-------------------|------------------------------------|--|--------------------------------|---|
|                   | общее                              | частное (преимущественно для платформ)     |                                |   |
| Протерозойская    | Поздний докембрий                  | Верхний рифей                              | $630 \pm 30$                   | Катангский<br>Гренвильский                  |
|                   |                                    | Средний рифей                              | $1000 \pm 100$                 |   |
|                   |                                    | Нижний рифей                               | $1400 \pm 100$                 | Медвежьеозерный                             |
| Археозойская      | Средний докембрий                  | Преимущественно фундамент древних платформ | $1750 \pm 100$                 | Карельский —<br>свекофенский<br>Беломорский |
|                   |                                    |  | $1900 \pm 100$                 |   |
|                   | Ранний докембрий                   | Преимущественно древние ядра щитов         | $2600 \pm 100$                 | Шамваянский<br>Кольский<br>Белозерский      |
|                   |                                    |  | $3000 \pm 100$                 |   |
| Древний докембрий | Единые участки древней земной коры | $3500 \pm 100$                             | Древнейший магматизм           |   |
|                   |                                    | $3700 \pm 100$                             |                                |   |
|                   |                                    |  | Возраст Земли<br>$4650 \pm 50$ |   |

и радиологами за последние годы. Однако эта шкала по существу отражает уровень наших знаний в области геохронологии фанерозоя — позднейшего этапа истории развития земной коры. Подразделения для докембрия еще не общепризнаны и не разработаны окончательно.

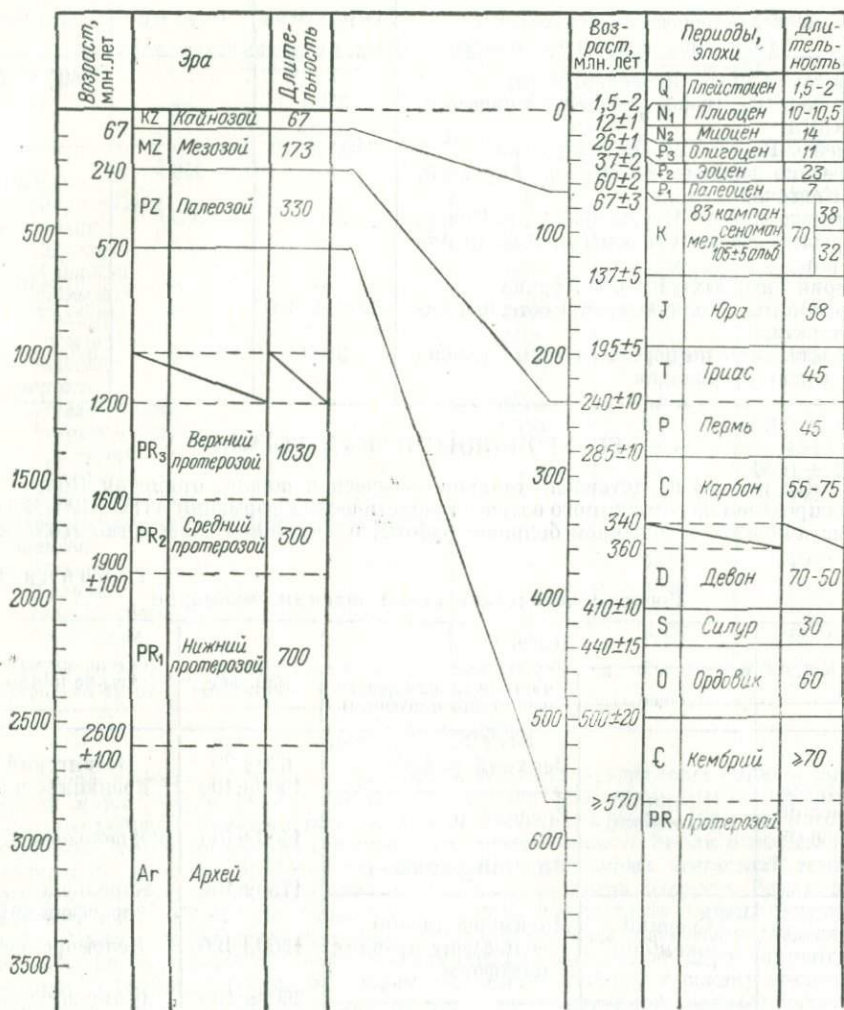


Рис. 18. Геохронологическая шкала по данным Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций при Отделении геологии, геофизики, геохимии АН СССР, 1964 г.

Для общего геохронологического деления докембрия должны быть использованы наиболее надежно датированные тектоно-магматические циклы, выражающие эпохи формирования докембрийских гранитов и эпохи древнего рудообразования. На основе обобщения большого геохронологического материала разных материков (Тугаринов, Войткевич, 1970) было установлено, что возраст наиболее важных тектоно-магматических эпох докембрия определяется в 1800—2000 млн. лет (или  $1900 \pm 100$  млн. лет) и 2500—2700 млн. лет (или  $2600 \pm 100$  млн. лет). В какой-то мере эти данные учтены при разделении докембрия в шкале 1964 г.

Если учесть наиболее надежно датированные тектоно-магматические циклы докембрия, а также ряд тектонических соображений, выдвинутых советскими геологами за последнее время, то можно построить общую схему подразделения докембрия (табл. 104), в которой весь докембрий подразделяется на ранний, средний и поздний. Особо выделяется древний докембрий — ранний интервал в истории Земли, лишенный следов каменной летописи. Для наиболее древней геологической эры можно восстановить название археозой, поскольку оно логически согласуется с последующим протерозоем и учитывает большую древность жизни на Земле (3500 млн. лет).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдзайко Г. В. Роль изотопного анализа свинца в определении геологического возраста. — В кн.: Тр. 3-й сессии Комиссии по определению абс. возраста геол. формаций. М., 1955. с. 153—162.
- Амиранов Х. И., Брандт С. Б. Определение абсолютного возраста пород по радиоактивному превращению калия-40 в аргон-40. Махачкала, 1956. 170 с.
- Баранов В. И. Возраст Земли, тяжелых элементов и метеоритов. — «Астрономический журнал», 1966, № 5, с. 43—50.
- Виноградов А. П., Забороженый И. К., Зыков С. И. Изотопный состав свинцов и возраст Земли. — «Докл. АН СССР», 1955, т. 85, № 5.
- Войткевич Г. В. О возрасте Земли. — «Докл. АН СССР», 1951, т. 77, № 3, с. ...
- Войткевич Г. В. Радиогеология и ее значение в познании истории Земли. М., Геолтехиздат, 1956. 112 с.
- Войткевич Г. В. Проблемы Радиогеологии. М., Госгеолтехиздат, 1961. 352 с.
- Войткевич Г. В. Возраст Земли и геологическое летоисчисление. М., «Наука», 1965. 56 с.
- Войткевич Г. В. Радиоактивность в истории Земли. М., «Наука», 1970. 168 с.
- Гаст П. В. Рубидий-стронциевый метод. Пер. с англ. — В кн.: Вопросы геохронологии. М., 1963. с. 30—35.
- Герлинг Э. К. Современное состояние аргонного метода определения возраста и его применение в геологии. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1961. 132 с.
- Герлинг Э. К., Гогохов И. М. Современное состояние стронциевого метода определения возраста. — В кн.: 11-й сессии Комиссии по опр. абс. возраста геол. формаций. М., 1963, с. 150—165.
- Жилов К. К. и Зыков С. И. Генезис некоторых месторождений свинца по данным изотопных анализов. — «Геохимия», 1956, № 7.
- Калл Дж. Л., Бейт Г. Л., Брокер В. С. Современное состояние свинцового метода определения возраста радиоактивных минералов. Пер. с англ. — В кн.: Радиологические методы определения абсолютного геологического времени. М., 1959.
- Кюмлев Л. В., Данилевич С. И., Филиппов М. О возрасте некоторых редкометаллических гранитных интрузий Центрального Казахстана. — «Геохимия», 1957, № 8.
- Компстон В. и Джеффри П. М. Хронология метаморфизма по данным рубидий-стронциевого метода. Пер. с англ. — В кн.: Вопросы геохронологии. М., 1963, с. 36—44.
- Мелентьев В. В. Атлас номограмм для вычисления возраста пород радиоактивными методами. М., Изд-во АН СССР, 1955, с. ...
- Найденос В. М., Чердынцева В. В. Эволюция изотопного состава свинца земной коры и железных метеоритов. — «Геохимия», 1967, № 12.
- О позднемезозойском возрасте древнейших пород Антарктиды. — «Докл. АН СССР», 1974, т. 216, № 6. Авт.: М. Г. Равич, Э. В. Соболевич, Е. Н. Каменев, В. А. Рудник.
- Рабинович А. В., Рик Г. Р., Голубчина М. Н. Изотопный состав свинца некоторых пород и связанных с ними галенитов. — «Геохимия», 1956, № 7, с. 65—67.
- Рассел Р. Д., Рейнольдс П. Х. Возраст Земли. — В кн.: Проблемы геохимии. М., 1965.
- Старик И. Е. Ядерная геохронология. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1961. 400 с.
- Тугаринов А. И. Геология о методах определения абсолютного возраста горных пород. М., Госгеолтехиздат, 1961. 79 с.
- Тугаринов А. И., Войткевич Г. В. Докембрийская геохронология материков. М., «Недра», 1970. 432 с.
- Фор Г., Пауэлл Дж. Изотопы стронция в геологии. М., «Мир», 1974. 214 с.
- Patterson C. C., Goldberg E. D., Inghram M. Isotopic composition of quaternary leads from the Pacific ocean. — «Bull. Geol. Soc. of Amer.», 1953, v. 64, p. 2.
- Patterson C. C. The Pb<sup>207</sup>/Pb<sup>208</sup> ages of some stone meteorites. — «Geochimica et Cosmochimica Acta», 1955, v. 7, No 3—4.
- Stieff L. R., Stern T. W., Oshiro S. Tables for the calculation of lead isotopes ages. Geological Survey, professional paper, 1959, 334 p.
- Tilton G. R., Patterson C. C., Davis G. L. Isotopic composition of lead in olivine bombs. — «Bull. Geol. Soc. of Amer.», 1954, v. 65, No. 12, p. 2.
- Tilton G. R., Patterson C. C., Brown H., Isotopic composition and distribution of lead, uranium and thorium in a precambrian granite. — «Bull. Geol. Soc. of America», 1955, v. 66, No 9, p. 1131—1148.
- Alpher R. A. and Herman R. C. The primeval lead isotopic abundances and age of the earth's crust. — «Physical Review.», 1951, v. 84, p. 1111—1114.
- Chackett K. F. K<sup>40</sup> and the Age of the Atmosphere. — «Physical Review», 1951, v. 81, p. 1057—1060.

- Catanzaro E.* Zircon ages in Southwestern Minnesota. — «*Journ. Geophys. Research*», 1963, v. 68, No 7.
- Collins C. B., Russell R. M., Farquhar R. M.* The maximum age of the elements and the age of the earth's crust. — «*Canadian Journ. Physics*», 1953, v. 31, p. 402—410.
- Demay A.* Determination de l'âge absolu d'une pegmatite du gisement filonien de la Crouzille dans le massif granulitique de St-Sylvestre, au nord Limoges. — «*C. R. Acad. Sci.*», 1953, v. 237, p. 48—50.
- Engel A. E. J., Patterson C. C.* Isotopic composition of lead in Leadville limestone, hydrothermal dolomite, and associated ore. — «*Bull. Geol. Soc. of Amer.*», 1957, v. 68, No 12, p. 2.
- Hamilton E. I.* Applied Geochronology. Academic Press, London — New York, 1965, 286 p.
- Holmes A., Leland W. T., Nier A. O.* Age of uraninite from a pegmatite near Singar, Gaya district, India. — «*Amer. Mineralogist*», 1950, v. 248, p. 81—94.
- Holmes A., Besairie H.* Sur quelques mesures de géochronologie à Madagascar. — «*C. R. Acad. Sci.*», 1954, v. 236, p. 758—761.
- Holmes A.* The oldest dated minerals of Rhodesian shield. — «*Nature*», 1954, v. 173, 612—614 p.
- Holmes A.* How old is the Earth? — «*Trans. Edinb., Geol. Soc.*», 1956, v. 16, 3, p. 313—320.
- Holmes A.* A Revised Geological Time Scale. *Trans. Edinb. Geol. Soc.* 1959, v. 17, p. 213—220.
- Houtermans F. G.* Determination of the age of the Earth from the isotopic composition of meteorite lead. — «*Nuovo Cimento*», 1953, v. 10, p. 1623—1630.
- Marshall R. R., Helld D. C.* *Journ. Chem. Physics.* 1958, v. 28, 1258 p.
- Marshall R. R., Helld D. C.* *Helvetica Physica Acta.* 1959, No 4, 31.
- Masuda Akimasa.* Isotopic composition of primeval lead of the Earth. — «*Geochimica et Cosmochimica Acta*», 1958, v. 13, p. 143—150.
- Mc-Crady E.* The use of lead isotope ratios in estimating age of Earth. — «*Trans. Amer. Geophys. Union*», 1952, v. 33, p. 156—160.
- Nicolaysen L. O., Burger A. J., Liebenberg W.* Evidence for the extreme age of certain minerals from the Domonion Reef conglomerates and the underlying granites in the Western Transvaal. — «*Geochimica et Cosmochimica Acta*», 1962, v. 26, No 1, p. 27—38.
- Tilton G. R. and Patterson C. C.* The isotopic composition of lead in ultramafic rocks. — «*Trans. Amer. Geophys. Union*», 1956, v. 37, No 3, p. 361—362.
- Tilton G. R., Davis G. D., Wetherill G. W.* Isotopic ages of zircon from granites and pegmatites. — «*Trans. Amer. Geophys. Union*», 1957, v. 38, No 3, p. 370—380.
- Wetherill G. W., Tilton G. R., Aldrich L. T.* New determination of the age of the Bob Ingersoll pegmatite, Keystone S. Dakota. — «*Geochimica et Cosmochimica Acta*», 1956, v. 9, No 5—6.
- Wickman F. E.* Some graphs on the calculation of geological age. — «*Sveriges Geol. Undersökning Årsbok*», 1939, v. 33, No 7, p. 1—8.

# Глава VII

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАХОЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

### ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ

Любая геохимическая классификация элементов обычно объединяет химические элементы в определенные группы по признаку их геохимического сходства, т. е. по признаку их совместной концентрации в определенных природных системах. Поскольку геохимические и химические свойства элементов отчетливо выражаются в таблице Д. И. Менделеева, то эта таблица явилась основой для большинства предложенных классификаций элементов. Наиболее известные геохимические классификации элементов были предложены В. М. Гольдшмидтом, В. И. Вернадским, А. Е. Ферсманом и А. Н. Заварицким.

Классификация В. М. Гольдшмидта была предложена в 1924 г. По этой классификации все элементы таблицы Д. И. Менделеева подразделяются на четыре геохимические группы: элементы атмосферные, литофильные (оксифильные), халькофильные и сидерофильные. Особо выделялись биогенные элементы, из разных вышесказанных геохимических групп. Геохимическая классификация В. М. Гольдшмидта в 1952 г. была детализирована венгерским геохимиком Е. Садечки-Кардошем. Классификация В. М. Гольдшмидта и вариант классификации Е. Садечки-Кардоша приведены в табл. 105, 106.

Классификация В. И. Вернадского основана на следующих признаках:

1) присутствие или отсутствие в истории данного химического элемента химических и радиохимических процессов;

2) характер этих процессов — обратимость или необратимость;

3) присутствие или отсутствие в истории химических элементов в земной коре их химических соединений или молекул, состоящих из нескольких атомов. Классификация В. И. Вернадского приведена в табл. 107.

Классификация А. Е. Ферсмана основана на развернутой таблице Д. И. Менделеева. А. Е. Ферсман выделяет элементы, дающие концентрации в определенных магматических горных породах: кислых, средних и ультраосновных магм и сульфидных месторождений. Классификация А. Е. Ферсмана дана в табл. 108. Здесь выделяются три поля:

1) верхнее поле, заканчивающееся на элементе  $Z = 28$ , охватывает наиболее распространенные элементы литосферы — элементы гранитов и гидросферы;

2) для нижнего левого поля характерны преимущественно халькофильные элементы — элементы сульфидных месторождений;

3) в нижнее правое поле попадают элементы кислых магм — гранитных пегматитов; здесь же располагаются элементы ультраосновных пород, куда полностью входят элементы платиновой группы.

Классификация А. Н. Заварицкого основана на развернутой таблице Д. И. Менделеева, но несколько иначе, чем у А. Е. Ферсмана. По А. Н. Заварицкому, все поле таблицы делится на 10 блоков, объединяющих элементы геохимически особенно близкие (табл. 109). При этом выделяются следующие группы химических элементов:

1) благородные газы (от He до Rn);

2) элементы горных пород (Na, Mg, Al, Si, K, Ca и др.);

3) элементы магматических эманаций (B, F, P, Cl, S и др.);

4) элементы группы железа (Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni);

5) редкие элементы (Se, редкие земли, Nb, Ta и др.);

6) радиоактивные элементы (Ra, Th, U и др.);

7) элементы металлические рудные (Cu, Zn, Sn, Hg, Ag, Au и др.);

8) элементы металлоидные и металлогенные (As, Sb, Bi, Se и др.);

9) элементы группы платины;

10) тяжелые галоиды (Br, I).

## Геохимическая классификация элементов по В. М. Гольдшмидту с дополнениями В. В. Щербины

| Группы, элементы  | Строение иона   | Расположение на кривой атомных объемов | Магнитные свойства   | Специфическое химическое средство                           | Другие свойства   |
|---|---|--|--|---|---|
| Атмофильные.<br>H, He, N, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn.   | В большинстве случаев находятся в виде неионизированных дискретных атомов и молекул.  | На участках максимальных значений      | Большинство диамагнитны  | Обычно встречаются в природе в виде простых тел (элементов) | Характерно газообразное состояние   |
| Литофильные<br>Li, Be, B, C, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, (S), Cl, K, Ca, Se, Ti, V, Cr, Mn, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, I, Cs, Ba, TR, Hf, Ta, W, Ra, U, Th | Ионы построены по модели атома благородных газов, наружная оболочка из 8 электронов (2s и 6 p)  | На убывающих ветвях                    | Парамагнитны   | Средство к O, F, Cl   | Плотность окислов сравнительно невысокая  |
| Халькофильные<br>S, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Au, Hg, Ti, Pb, Bi, (Po?)   | Ионы построены по модели атома благородных газов, наружная оболочка из 18 электронов (2s, 6p и 10 d) за исключением S, Se, Te, As, Sb | На возрастающих ветвях                 | Диамагнитны<br>Диамагнетизм в пределах каждой группы периодической системы возрастает с порядковым номером | Средство к S, Se, Te  | Расплавленные сульфиды растворимы в расплаве FeS. Образуют комплексные сульфиды |
| Сидерофильные<br>Fe, Co, Ni, Mo, Tc, Ru, Rh, Os, Ir, Pt, P (?)  | Ионы переходного типа с числом электронов в наружной оболочке от 8 до 18  | На участках минимальных значений       | Ферромагнитны и парамагнитны   | Средство к C, P, A, (Sb)                                    | Большая плотность. Часто встречаются в самородном состоянии                     |

**Классификация элементов по геохимическим свойствам  
по Е. Садецки-Кардошу**

| Группы              | Элементы  | Среда концентрации   |
|---------------------|---|--|
| Сидерофильные       | Au, Fe, Co, Ni, Ru, Rh,<br>Pd, Os, Ir, Pt   | Накопление в металличе-<br>ской фазе                               |
| Сульфохалькофильные | Cu, Ag, Zn (?), Cd (?),<br>Hg, As, Sb, S, Se, Te,<br>P (?)  | Свойственны сульфид-<br>ной (троилитовой) фазе                     |
| Оксихалькофильные   | Ge, Sn, Pb, Ga, In, Tl,<br>Zn (?), Cd (?), P (?)  | Оксиды и сульфиды  |
| Литофильные         | Li (?), Na, K, Rb, Cs,<br>Be (?), Ca, Sr, Ba, Al, Si  | Чаще накапливаются в<br>период главной кристал-<br>лизации         |
| Пегматитофильные    | Ti, V, Zr, Mn   Переходные<br>Sc, Y,   Типичные<br>La—Lu, Th,   пегматито-<br>U, Hf (?), Nb,   вые<br>Ta, W, Mo | Пегматиты  |
| Седиментофильные    | B, C, (N), F, Cl, Br (?),<br>I (?)  | Легко летучие, химиче-<br>ски активные «агенты ми-<br>нерализации» |
| Атмофильные         | H (?), N (?), He, Ne, Ar,<br>Kr, Xe, Rn   | Легко летучие, инерт-<br>ные                                       |

Таблица 107

**Геохимические группы элементов по В. И. Вернадскому**

| № группы | Группы                             | Элементы  | n  | %     |
|----------|------------------------------------|---|----|-------|
| I        | Благородные газы                   | He, Ne, Ar, Kr, Xe  | 5  | 5,44  |
| II       | Благородные металлы                | Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au  | 7  | 7,66  |
| III      | Циклические элементы               | H, Be, B, C, N, O, F, Na,<br>Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca,<br>Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni,<br>Cu, Zn, Ge (?), As, Se, Sr,<br>Zr (?), Mo, Ag, Cd, Sn, Sb,<br>Te, Ba, Hf, W, Re, Hg,<br>Tl, Pb, Bi | 44 | 47,82 |
| IV       | Рассеянные элементы                | Li, Sc, Ga, Br, Rb, Y, Nb,<br>In, I, Cs, Ta   | 11 | 11,95 |
| V        | Элементы сильно радио-<br>активные | Po, Rn, Ra, Ac, Th, Pa, U   | 7  | 7,61  |
| VI       | Элементы редких земель             | La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm,<br>Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er,<br>Tm, Yb, Lu  | 15 | 16,30 |

## Классификация А. Е. Фермана

| Периоды | Г р у п п ы |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
|---------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
|         | I           | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  | VIII |      |      |    |
| 1       | —           | —    | —    | —    | —    | —    | (H)  | (He) | (Li) | (Be) | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |    |
| 2       | —           | —    | (B)  | (C)  | (N)  | (O)  | (F)  | Ne   | (Na) | (Mg) | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |    |
| 3       | —           | —    | (Al) | (Si) | (P)  | (S)  | (Cl) | Ar   | (K)  | (Ca) | (Sc) | (Ti) | (V)  | (Cr) | (Mn) | (Fe) | (Co) | (Ni) | 4  |
| 5       | (Cu)        | (Zn) | (Ga) | (Ge) | (As) | (Se) | (Br) | Kr   | (Rb) | (Sr) | (Y)  | (Zr) | (Nb) | (Mo) | (Ma) | (Ru) | (Rh) | (Pd) | 6  |
| 7       | (Ag)        | (Cd) | (In) | (Sn) | (Sb) | (Te) | (I)  | Xe   | (Cs) | (Ba) | (TR) | (Hf) | (Ta) | (W)  | (Re) | (Os) | (Ir) | (Pt) | 8  |
| 9       | (Au)        | (Hg) | (Tl) | (Pb) | (Bi) | (Po) | (?)  | (Rn) | (?)  | (Ra) | (Ac) | (Th) | (Pa) | (U)  | —    | —    | —    | —    | 10 |

Элементы

- кислых магм и пневматолитов
- средних магм
- сульфидных месторождений
- ультраосновных магм

Таблица 109

## Классификация А. И. Заварицкого

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |  |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|
|    | H  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |  |
| He | Li | Be | B  | C  | N  | O  | F  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |  |
| Ne | Na | Mg | Al | Si | P  | S  | Cl |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |  |
| Ar | K  | Ca | Sc | Ti | V  | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br |  |  |
| Kr | Rb | Sr | Y  | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I  |  |  |
| Xe | Cs | Ba | TR | Hf | Ta | W  | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At |  |  |
| Rn | Fr | Ra | Ac | Th | Pa | U  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |  |

ПАРАГЕНЕТИЧЕСКИЕ АССОЦИАЦИИ МИНЕРАЛОВ  
И ЭЛЕМЕНТОВ

Под парагенетическими ассоциациями элементов и минералов понимается совместное нахождение элементов и минералов, связанное с их генетическими особенностями. Парагенезис может быть обусловлен одновременным или последовательным образованием минералов в результате одного процесса, последовательным образованием их одного из другого путем замещения и т. д.

Общие представления о парагенезисе элементов в природе, связанных с геохимической дифференциацией, дают различные геохимические классификации элементов, рассмотренные ранее. В частности, парагенезис элементов в силикатной, сульфидной и троилитовой фазах метеоритного вещества отражен в геохимической классификации В. М. Гольдшмидта.

## Парагенетические ассоциации элементов и минералов в рудах

| Руды   | Ассоциации элементов          | Парагенезис минералов   |
|--|-------------------------------|---|
| <b>I. Магматические месторождения<br/>в ультраосновных и основных породах</b>                                |                               |   |
| Хромитовые, платиновые   | Cr, Fe, Mg, Pt, (Os, Ir), Fe  | Хромит, оливин, пироксен, платина, осмистый иридий  |
| Титаномagnetитовые   | Fe, Ti, V                     | Магнетит, ильменит, гематит, пироксен, основные плагиоклазы                                   |
| Медно-никелевые (сульфидные)   | Ni, Cu, (Pt, Pd, Co)          | Пирротин, пентландит, халькопирит, магнетит, минералы платиноидов                             |
| <b>II. Пегматиты кислых и щелочных пород</b>   |                               |   |
| Олово-вольфрамово-литиевые   | Sn, W, Li                     | Касситерит, вольфрамит, сподумен, полевой шпат, кварц, слюда                                  |
| Монацитовые  | TR церевой группы, Th         | Монацит, полевой шпат, мусковит   |
| Ниобиевые  | Nb, Ta, Ti, TR церевой группы | Пирохлор, ильменит, ильмено-рутил, сфен   |
| <b>III. Постмагматические (скарновые) месторождения, связанные с гранитами</b>                               |                               |   |
| Железные   | Fe (Ca, Al, Si)               | Гематит, магнетит, гранаты, пироксены   |
| Медные   | Cu, Fe (Ca, Al, Si)           | Пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит, магнетит, гематит, гранаты, пироксен                  |
| Молибдено-вольфрамовые   | Mo, W (Fe, Ca, Al, Si)        | Молибденит, шеелит, пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит, гранаты, пироксен                 |
| <b>IV. Постмагматические (гидротермальные) месторождения, связанные главным образом с кислыми интрузиями</b> |                               |   |
| Кварцево-касситеритовые  | Sn (W, Mo)                    | Касситерит, берилл, вольфрамит, молибденит, висмутит, топаз, флюорит                          |
| Медные и медно-молибденовые (прожилково-вкрапленные)   | Cu, Mo                        | Халькопирит, пирит, молибденит, кварц, серицит, андалузит                                     |
| Свинцово-цинковые  | Pb, Zn, Ag, (As, Bi, Zn)      | Галенит, сфалерит, пирит, блеклые руды, халькопирит, ориентит, кварц, кальцит, барит, серицит |
| Золотосульфидные   | Au, Cu, Fe, Pb, (As, Bi, Zn)  | Пирит, галенит, блеклые руды, сфалерит, арсенопирит, айкнит, золото, кварц, карбонаты         |

| Руды                               | Ассоциации элементов          | Парагенезис минералов   |
|------------------------------------|-------------------------------|---|
| Колчеданные                        | Fe, Cu, S<br>(Zn, Pb, Au, Ba) | Пирит, халькопирит, сфалерит, блеклые руды, галенит, борнит, кварц, серицит, кальцит, барит         |
| Сурьмяно-ртутные                   | Sb, Hg, F                     | Сурьмяный блеск, <sup>¶</sup> киноварь, кварц, кальцит, <sup>¶</sup> флюорит                        |
| Золото-серебряные                  | Au, Ag (Te, Se)               | Золото, серебро, электрум, камаверит, прустит, пираргирит, халцедон, адуляр, <sup>¶</sup> карбонаты |
| V. Месторождения коры выветривания |                               |   |
| Железистые латериты                | Fe, (Cr, Ni, Co)              | Гидросиликаты железа, силикаты Ni, асболоан   |
| Силикатно-никелевые                | Ni (Co)                       | Гидросиликаты железа, силикаты Ni, асболоан, силикаты Co  |
| Алюминиевые                        | Al (Fe)                       | Гидраты глинозема, гидрокислы Al, глинистые минералы, кварц, рутил и др.                            |
| VI. Осадочные месторождения        |                               |   |
| Железные                           | Fe                            | Гидроокислы железа, сидерит, шамозит  |
| Марганцевые                        | Mn                            | Пирролюзит, псиломелан, манганит, родохрозит, олигонит  |
| Алюминиевые                        | Al (Fe)                       | Диаспор, бёмит, гидраргиллит, шамозит, гидроокислы железа   |
| VII. Метаморфические месторождения |                               |   |
| Железистые кварциты                | Fe                            | Кварц, амфибол, гематит, сидерит  |
| Марганцевые                        | Mn                            | Марганцевые гранаты и пироксены, родонит, браунит, гаусманит  |

В табл. 110 приведены сведения о совместном нахождении элементов в различных минералах, образование которых связано с различными физико-химическими процессами.

### ИЗОМОРФИЗМ

Термин изоморфизм, введенный в 1819 г. Э. Митчерлихом, первоначально обозначал способность веществ с аналогичным составом кристаллизоваться в одинаковых формах. В настоящее время это понятие охватывает все явления, связанные с образованием непрерывных смесей и твердых растворов на основании замещения в кристаллической структуре минералов атомов и ионов одних элементов атомами и ионами других элементов, не сопровождающегося принципиальным изменением строения кристаллической решетки.

## Изоморфные ряды В. И. Вернадского (1910 г.)

|  |  |
|--|--|
| 1. $\underbrace{\text{AlFeCrMn}}_{\text{I}}   \text{TiB(Y)(Ce)V}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{II}}$<br>$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{III}}$ | 10. $\text{AuAgHgCuPbTl}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{I}}$<br>$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{II III}}$ |
| 2. $\text{BaCaSr}   \text{Pb}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{I}}$  | 11. $\text{PtFePdIrRhCu}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{III}}$   |
| 3. $\text{BrYCl}   \text{FOH}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{I}}$  | 12. $\text{OsRuRhIr}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{III}}$   |
| 4. $\text{VPAsSb?}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{I}}$<br>$\text{II III}$  | 13. $\text{CaMg}   \text{Mn}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{I?}}$  |
| 5. $\text{BiSbAs}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{I}}$<br>$\text{II III?}$  | 14. $\text{OFOH}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{III?}}$  |
| 6. $\text{NH}_4\text{KNaCsRb}   \text{TlLiH}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{I}}$<br>$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{II III}}$                   | 15. $\text{CoFeNi}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{I}}$<br>$\text{II}$  |
| 7. $\text{WMo}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{I}}$   | 16. $\text{SiTiZrMnTh?}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{II III}}$   |
| 8. $\text{Ge, Sn}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{I?}}$   | 17. $\text{NbTa}$  |
| 9. $\text{MgMnFeZnBeCdCuNiCo}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{I}}$<br>$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{II III}}$                                  | 18. $\text{SSeTe?}$<br>$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{II III}}$  |

I — кора выветривания (низкие температуры и давления).

II — область метаморфизации (высокие давления и средние температуры).

III — область магматическая (высокие температуры и давления).

Для установления генетической природы минералов-индикаторов важно знать законы, определяющие возможность изоморфных замещений в зависимости от кристаллохимических факторов и термодинамических условий минералообразования.

Наличие этих зависимостей впервые отметил В. И. Вернадский в 1910 г. Он указывал на более широкие пределы изоморфной сместимости для глубинных магматических и метаморфических образований с высокими значениями температуры и давления по сравнению с зоной гипергенеза. Эти положения нашли отражение в таблице изоморфных рядов В. И. Вернадского (табл. 111). Но если термодинамические условия обуславливают только степень совершенства изоморфного замещения элементов, то кристаллохимические факторы определяют еще и возможность этого замещения.

К факторам, определяющим возможность изоморфного замещения, относятся: координационное число (КЧ) атомов, тип конфигурации связей (в ковалентных соединениях) и отчасти валентность атомов. Факторами, определяющими совершенство изоморфизма, являются межатомные расстояния и состояние (тип) химической связи. Современное определение понятия изоморфизма может быть сформулировано следующим образом: изоморфизмом называется свойство аналогичных элементов замещать друг друга в структуре минерала,

Средние межатомные расстояния в оксидах  
и сульфидах важнейших элементов

| Элемент          | Межатомные расстояния, Å ( $10^{-8}$ см) |           |          |          |
|------------------|--|-----------|----------|----------|
|                  | Оксиды                                   |           | Сульфиды |          |
|                  | KЧ=4                                     | KЧ=6      | KЧ=4     | KЧ=6     |
| Li               | 2,00                                     | 2,12      | 2,47     | 2,60     |
| Na               | 2,40                                     | 2,52      | 2,83     | 2,96     |
| K                | 2,79                                     | 2,90      | 3,20     | 3,33     |
| Cu               | 1,84 *                                   | 2,30      | 2,35     | —        |
| Ag               | 2,05 *                                   | —         | 2,60     | 2,75     |
| Be               | 1,64                                     | —         | 2,10     | —        |
| Mg               | 1,97                                     | 2,10      | —        | 2,60     |
| Ca               | —  | 2,40      | —        | 2,84     |
| Sr               | —  | 2,57      | —        | 3,00     |
| Ba               | —  | 2,76      | —        | 3,19     |
| Mn <sup>2+</sup> | 2,09                                     | 2,22      | 2,42     | 2,61     |
| Fe <sup>2+</sup> | 2,00                                     | 2,14      | 2,36     | 2,45     |
| Co <sup>2+</sup> | 1,98                                     | 2,12      | —        | 2,33     |
| Ni <sup>2+</sup> | 1,97                                     | 2,10      | 2,32     | 2,38     |
| Cu <sup>2+</sup> | 1,95                                     | 2,06      | 2,28     | —        |
| Zn               | 1,96                                     | 2,08      | 2,34     | —        |
| Cd               | —  | 2,35      | 2,52     | —        |
| Hg               | 2,21                                     | —         | 2,53     | —        |
| Sn <sup>2+</sup> | 2,21                                     | —         | 2,66     | —        |
| Pb <sup>2+</sup> | 2,30                                     | 2,45      | —        | 2,96     |
| B                | 1,54                                     | —         | —        | —        |
| Al               | 1,78                                     | 1,91      | —        | —        |
| Cr <sup>3+</sup> | —  | 1,99      | —        | —        |
| Mn <sup>3+</sup> | —  | 2,03      | —        | —        |
| Fe <sup>3+</sup> | 1,89                                     | 2,01      | 2,20     | 2,33     |
| Y                | —  | 2,27      | —        | —        |
| La               | —  | 2,53 ***  | —        | 3,01**** |
| Ce               | —  | 2,51 ***  | —        | 2,98**** |
| Tl               | —  | 2,26      | —        | —        |
| As <sup>3+</sup> | 1,82 **                                  | 2,14      | 2,25 **  | —        |
| Sb <sup>3+</sup> | 2,08 **                                  | 2,36      | 2,45 **  | —        |
| Bi <sup>3+</sup> | 2,14 **                                  | 2,42      | 2,54 **  | 2,95     |
| Si               | 1,60                                     | 1,77      | 2,14     | —        |
| Ge               | 1,74                                     | 1,88      | 2,22     | —        |
| Ti               | —  | 1,96      | —        | 2,42     |
| Zr               | —  | 2,10      | —        | 2,58     |
| V <sup>4+</sup>  | —  | 1,96      | —        | —        |
| Mn <sup>4+</sup> | —  | 1,89      | —        | —        |
| Sn               | —  | 2,05      | 2,43     | —        |
| Pb               | —  | 2,16      | —        | —        |
| Ce <sup>4+</sup> | —  | 2,34 **** | —        | —        |
| Th               | —  | 2,41 **** | —        | 2,80     |
| U <sup>4+</sup>  | —  | 2,37 **** | —        | —        |
| Te <sup>4+</sup> | 1,98                                     | 2,22      | —        | —        |
| P                | 1,55                                     | —         | —        | —        |
| As               | 1,68                                     | —         | 2,22     | —        |

| Элемент          | Межатомные расстояния, Å ( $10^{-8}$ см) |      |          |      |
|------------------|--|------|----------|------|
|                  | Оксиды                                   |      | Сульфиды |      |
|                  | КЧ=4                                     | КЧ=6 | КЧ=4     | КЧ=6 |
| V                | 1,73                                     | —    | 2,19     | —    |
| Nb               | 1,87                                     | 2,01 | —        | —    |
| Ta               | 1,86                                     | 2,00 | —        | —    |
| Sb               | —  | 1,97 | —        | —    |
| S                | 1,48                                     | —    | —        | —    |
| Cr               | 1,65                                     | —    | —        | —    |
| Mo               | 1,79                                     | 1,93 | —        | —    |
| W                | 1,78                                     | 1,92 | —        | —    |
| Re <sup>6+</sup> | —  | 1,87 | —        | —    |
| U <sup>6+</sup>  | 1,90 *                                   | 2,30 | —        | —    |

\* КЧ=2; \*\* КЧ=3; \*\*\* КЧ=7; \*\*\*\* КЧ=8.

возможное только при одинаковых координационных числах атомов, а в ковалентных соединениях — при тождественной конфигурации связей, степень совершенства которого (при данных температуре  $T$  и давлении  $P$ ) определяется близостью межатомных расстояний, состоянием химической связи и строением электронной оболочки атомов.

Необходимо всегда помнить, что в природных условиях существенную поправку к степени совершенства изоморфизма дополнительно вносит физико-химический фактор — концентрация атомов в ходе того или иного геохимического процесса, изменение которой в широких пределах может оказаться основной причиной изменения степени изоморфизма. Поэтому наряду с кристаллохимическим существует также энергетический подход к проблеме изоморфизма, активно разрабатываемый советскими учеными (Перчук, 1970; Макаров, 1973; Урусов, 1975).

Данные по межатомным расстояниям в существенно ионных (оксиды) и существенно ковалентных (сульфиды) соединениях и важнейшие примеры изовалентного и гетеровалентного изоморфизма приведены в табл. 112—115.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МИНЕРАЛЫ

Наиболее важные минералы, используемые в народном хозяйстве, перечислены в табл. 116. Наряду с добываемыми сейчас минералами приведены также некоторые (для редких элементов) потенциально возможные к использованию в ближайшем будущем. По виду использования минералов выделяются: «руды» (минералы, из которых извлекаются элементы) и «минеральное сырье» (минералы, употребляемые в естественном состоянии).

### ПРИРОДНЫЕ ГАЗЫ

Природные газы находятся во всех оболочках нашей планеты и представляют особую форму нахождения элементов и их соединений в природе. В ряде случаев природные газы теснейшим образом связаны с природными водами, осадками и горными породами, что наиболее полно отражено в классификации В. А. Соколова (табл. 117).

Важнейшие примеры изовалентного изоморфизма в минералах с существенно ионной связью

| Элемент                              | $\Delta d$ , % | КЧ | Различие в ковалентной связи, % | Минералы                   | Характеристика изоморфизма  | Условия образования                |
|--------------------------------------|----------------|----|---------------------------------|----------------------------|---|------------------------------------|
| Li <sup>+</sup><br>Na <sup>+</sup>   | 18,9           | 6  | 1                               | Трифилин                   | Несовершенный. В трифиллине Li на 26% замещается Na; в варулите до 20% Na замещается Li | Средняя и высокая <i>T</i>         |
|                                      |                | 6  |                                 | Варулит                    |   |                                    |
|                                      |                | 6  |                                 | Амблигонит<br>Фремонит     |   |                                    |
| Na <sup>+</sup><br>K <sup>+</sup>    | 15,1           | 6  | 4                               | Сподумен                   | Ограниченный. В квасцах вулканического происхождения (Фумаролы) до 26% K замещается Na  | Средняя <i>T</i>                   |
|                                      |                | 8  |                                 | Квасцы                     |   |                                    |
|                                      |                | 8  |                                 | Альбит<br>Ортоклаз         |   |                                    |
| Mg <sup>2+</sup><br>Zn <sup>2+</sup> | 1,0            | 12 | 9                               | Ярозит                     | Ограниченный. В ярозите до 29% K замещается Na, а в натроярозите до 25% Na замещается K | Низкая <i>T</i>                    |
|                                      |                | 12 |                                 | Натроярозит                |   |                                    |
| Mg <sup>2+</sup><br>Fe <sup>2+</sup> | 1,9            | 6  | 2                               | Карбонаты                  | Ограниченный. До 20—25% Zn замещается Mg  | Низкая <i>T</i>                    |
|                                      |                | 6  |                                 | Сульфаты                   |   |                                    |
|                                      |                |    |                                 | Все кислородные соединения | Весьма совершенный. Непрерывные ряды замещения Mg—Fe                                    | Высокая, средняя и низкая <i>T</i> |

| Элемент                              | $\Delta d, \%$ | КЧ | Различие в ковалентной связи, % | Минералы                   | Характеристика изоморфизма  | Условия образования        |
|--------------------------------------|----------------|----|---------------------------------|----------------------------|---|----------------------------|
| Mg <sup>2+</sup><br>Mn <sup>2+</sup> | 5,7            | 6  | 1                               | Магнезит                   | Ограниченный. До 10% Mg замещается Mn и до 51% Mn замещается Mg                   | Средняя <i>T</i>           |
|                                      |                | 6  |                                 | Родохрит                   |   |                            |
| Mg <sup>2+</sup><br>Ca <sup>2+</sup> | 6,6            | 6  | 1                               | Магнезиоферрит             | Ограниченный. До 11% Mg замещается Mn и до 50% Mn замещается Mg                   | Высокая <i>T</i>           |
|                                      |                | 8  |                                 | Якобсит                    |   |                            |
|                                      |                | 8  |                                 | Гранаты                    |   |                            |
|                                      |                | 8  |                                 | Гранаты                    |   |                            |
| Mg <sup>2+</sup><br>Ca <sup>2+</sup> | 14,0           | 6  | 10                              | Магнезит                   | Несовершенный. До 11% Mg замещается Ca и до 22% Ca замещается магнием             | Средняя <i>T</i>           |
|                                      |                | 6  |                                 | Кальцит                    |   |                            |
| Mg <sup>2+</sup><br>Ba <sup>2+</sup> | 31             | 6  | 14                              | Энстатит                   | Ограниченное замещение и распад   | Высокая <i>T</i>           |
|                                      |                | 6  |                                 | Диоксид                    |   |                            |
| Fe <sup>2+</sup><br>Zn <sup>2+</sup> | 2,9            | 6  | 7                               | Оксиды                     | Весьма несовершенный. Практически изоморфное замещение отсутствует                | Высокая <i>T</i>           |
|                                      |                | 6  |                                 | Сульфаты                   |   |                            |
| Fe <sup>2+</sup><br>Zn <sup>2+</sup> | 2,9            | 6  | 7                               | Карбонаты                  | Весьма совершенный. Непрерывные ряды замещения Fe — Zn                            | Средняя и низкая <i>T</i>  |
|                                      |                | 6  |                                 | Фосфаты                    |   |                            |
| Fe <sup>2+</sup><br>Mn <sup>2+</sup> | 3,7            | 6  | 6                               | Все кислородные соединения | Весьма совершенный. Непрерывные ряды замещения Fe — Mn                            | Высокая и средняя <i>T</i> |
| Fe <sup>2+</sup><br>Cu <sup>2+</sup> | 3,9            | 6  | 14                              | Сульфаты                   | Совершенный. До 70% Cu замещается Fe (разрыв обусловлен геохимическими причинами) | Низкая <i>T</i>            |

| Элемент                              | $\Delta d$ , % | КЧ           | Различие в ковалентной связи, % | Минералы                      | Характеристика изоморфизма                                      | Условия образования         |
|--------------------------------------|----------------|--------------|---------------------------------|-------------------------------|---|-----------------------------|
| Fe <sup>2+</sup><br>Ca <sup>2+</sup> | 12,2           | 6<br>6       | 12                              | Сидерит<br>Кальцит            | Ограниченный. До 22% Fe замещается Ca и до 18% Ca замещается Fe | Средняя <i>T</i>            |
|                                      | 11             | 8            |                                 | Гранаты                       | Ряд замещения с разрывом от 41 до 75% Ca                        | Высокие <i>T</i> и <i>P</i> |
| Mn <sup>2+</sup><br>Ca <sup>2+</sup> | 8,1            | 6            | 9                               | Карбонаты                     | Ограниченный. Ряд замещения с небольшим разрывом                | Средняя <i>T</i>            |
|                                      | 7              | 8            |                                 | Гранаты                       | Ряд замещения с разрывом от 66 до 29% Ca                        | Высокие <i>T</i> и <i>P</i> |
| Sr <sup>2+</sup>                     | 7,5            | 9            | 2                               | Стронцианит                   | Ограниченный. Ряд замещения с большим разрывом                  | Низкая <i>T</i>             |
| Ba <sup>2+</sup>                     | 7,1            | 12<br>12     |                                 | Витерит<br>Целестин           | Совершенный. Непрерывный ряд замещения Sr — Ba                  | Средняя и низкая <i>T</i>   |
| Al <sup>3+</sup><br>Fe <sup>3+</sup> | 5,2            | 12<br>6<br>6 | 6                               | Барит<br>Варисцит<br>Штрэнгит | Весьма совершенный. Непрерывный ряд замещения Al — Fe           | Низкая <i>T</i>             |
|                                      |                | 6            |                                 | Са-гранат                     | Непрерывный ряд замещения                                       | Высокая <i>T</i>            |
|                                      |                | 6            |                                 | Эпидот                        | Ряд замещения с разрывом  | Средняя <i>T</i>            |
|                                      | 6,2            | 4            |                                 | Ортоклаз                      | Несовершенный. До 8% Al замещается Fe                           | Высокая <i>T</i>            |
| Fe <sup>3+</sup><br>Mn <sup>3+</sup> | 1,0            | 6<br>6       | 4                               | Гетерозит<br>Пурпурит         | Весьма совершенный. Непрерывный ряд замещения Fe — Mn           | Низкая <i>T</i>             |
| Sc <sup>3+</sup><br>Y <sup>3+</sup>  | 8,6            | 6            | 10                              | Тортвейтит                    | Ограниченный. Ряд замещения с разрывом. До 17% Sc замещается Y  | Высокая <i>T</i>            |

| Элемент                              | $\Delta d, \%$ | КЧ     | Различие в ковалентной связи, % | Минералы                   | Характеристика изоморфизма   | Условия образования        |
|--------------------------------------|----------------|--------|---------------------------------|----------------------------|--|----------------------------|
| Si <sup>4+</sup><br>Ti <sup>4+</sup> | 22,5           | 4      | 3                               | Силикаты                   | Весьма несовершенный. Отмечаются не вполне доказанные примеси Ti (10—12%)            | Высокая <i>T</i>           |
| Ti <sup>4+</sup><br>Zr <sup>4+</sup> | 13,3           | 6<br>8 | 16                              | Циркон                     | Весьма несовершенный. Изоморфное замещение Zr титаном не более 1%                    | Высокая <i>T</i>           |
|                                      | 7,1            | 6      |                                 | Группа ловенита-мозандрита | Ограниченный. До 10—15% (в сейдозерите до 25%) Zr замещается титаном                 |                            |
|                                      |                |        |                                 | Эвдиалит                   | Несовершенный. До 2,2% Zr замещается титаном   | Высокая <i>T</i>           |
| Nb <sup>5+</sup><br>Ta <sup>5+</sup> | 0,5            | 6      | 8                               | Оксиды                     | Весьма совершенный. Непрерывный ряд замещения Nb — Ta                                | Высокая и средняя <i>T</i> |
|                                      | 1,0            | 4      |                                 | Фергусонит                 | Совершенный. Ряд замещения с небольшим разрывом (геохимическая причина?)             | Высокая и средняя <i>T</i> |
| P <sup>5+</sup><br>As <sup>5+</sup>  | 8,5            | 4<br>4 | 3                               | Пироморфит<br>Миметезит    | Весьма совершенный. Непрерывный ряд замещения P — As                                 | Низкая <i>T</i>            |
| V <sup>5+</sup><br>As <sup>5+</sup>  | 3,0            | 4<br>4 | 1,5                             | Ванадинит<br>Миметезит     | Совершенный (?). До 60% V замещается As. В миметезите до 4,1% As замещается ванадием | Низкая <i>T</i>            |
| Mo <sup>6+</sup><br>W <sup>6+</sup>  | 0,5            | 4<br>4 | 10                              | Повеллит<br>Шеелит         | Ограниченный. До 10% Mo замещается W; в шеелите до 40% W замещается Mo               | Средняя и низкая <i>T</i>  |
|                                      |                |        |                                 | Вульфенит                  | Совершенный (?). До 50% Mo замещается вольфрамом                                     | Низкая <i>T</i>            |

Важнейшие примеры гетеровалентного изоморфизма в минералах с существенно ионной связью

| Элементы                             | $\Delta d, \%$ | КЧ       | Схема замещения | Минералы               | Характеристика изоморфизма                              | Условия образования |
|--------------------------------------|----------------|----------|-----------------|------------------------|---|---------------------|
| K <sup>+</sup>                       | 4,8            | 8        | KSr — BaAl      | Полевые шпаты          | Совершенный. Непрерывный ряд замещения K — Ba           | Высокая T           |
| Ba <sup>2+</sup>                     |                | 8        | 2K — Ba         | Цеолиты                | Ограниченное замещение                                  | Средняя и низкая T  |
| Na <sup>+</sup><br>Ca <sup>2+</sup>  | 4,0            | 8<br>8   | NaSi — CaAl     | Плагиоклаз<br>Скаполит | Совершенный. Непрерывный ряд замещения Na — Ca          | Высокая T           |
|                                      |                |          | NaAl — CaMg     | Амфиболы               | Неполный ряд замещения                                  | Высокая и средняя T |
|                                      |                |          | 2Na — Ca        | Цеолиты                | Ограниченное замещение                                  | Средняя и низкая T  |
|                                      | 3,6            | 12       | NaNb — CaTi     | Лопарит                | Ограниченное замещение                                  | Высокая T           |
| Li <sup>+</sup><br>Fe <sup>2+</sup>  | 1,0            | 6<br>6   | LiAl — 2Fe      | Слюды<br>Турмалин      | Весьма совершенный. Непрерывный ряд замещения Li — Fe   | Высокая и средняя T |
| Ca <sup>2+</sup><br>Ce <sup>3+</sup> | 1,0            | 12<br>12 | 2Ca — NaCe      | Перовскит<br>Лопарит   | Неполный ряд замещения (геохимические причины!) Ca — Ce | Высокая T           |
|                                      | 2,0            | 9<br>9   | CaAl — CaFe     | Эпидот<br>Ортит        | Совершенный. Непрерывный ряд замещения Ca — Ce          | Высокая и средняя T |
|                                      | 2,5            | 8<br>8   | CaNb — CeTi     | Ферсмит<br>Эвксенит    | Непрерывный (?) ряд замещения                           | Высокая T           |

| Элементы                             | $\Delta d, \%$ | КЧ         | Схема замещения                              | Минералы                 | Характеристика изоморфизма  | Условия образования             |
|--------------------------------------|----------------|------------|--|--------------------------|---|---------------------------------|
| $\text{Ca}^{2+}$<br>$\text{Y}^{3+}$  | 5,7            | 8<br>8     | $3\text{Ca} - 2\text{Y}$                     | Пирохлор<br>Иттрофлюорит | Неполный ряд. До 70% Ca замещается на Ce (точнее — на TR)<br>Ограниченный. До 17% Ca замещается Y | Высокая T<br>Средняя и низкая T |
| $\text{Mg}^{2+}$<br>$\text{Al}^{3+}$ | 10,0           | 6<br>6     | $3\text{Mg} - 2\text{Al}$                    | Биотит<br>Мусковит       | Ограниченный. Ряд замещения с большим разрывом  | Высокая T                       |
| $\text{Al}^{3+}$<br>$\text{Si}^{4+}$ | 11,0           | 6,4<br>6,4 | $2\text{Al} - \text{MgSi}$                   | Авгит<br>Роговая обманка | Ограниченный. Ряды замещения с разрывом, увеличивается с понижением T                             | Высокая и средняя T             |
|                                      | 12,0           | 4<br>4     | $2\text{Al} - \text{MgSi}$                   | Мелилит                  | Ограниченный. Непрерывный ряд замещения Al — Si (при T плавления)                                 | Очень высокая T                 |
| $\text{Y}^{3+}$<br>$\text{U}^{4+}$   | 2,0            | 8<br>8     | $\text{YNb} - \text{UTi}$                    | Эксенит<br>Браннерит     | Ограниченный. Ряд замещения неполный, не более 10—15% Y замещается U                              | Высокая T                       |
|                                      |                |            | $2\text{Y} - \text{UFe}$                     | Самарскит                | Ограниченное замещение  | То же                           |
| $\text{Y}^{3+}$<br>$\text{Zr}^{4+}$  | 9,9            | 8<br>8     | $\text{YP} - \text{ZrSi}$                    | Ксенотим<br>Циркон       | Ограниченный. До 3% Y замещается Zr. В цирконе до 15% Zr замещается Y                             | Высокая T                       |
| $\text{Ti}^{4+}$<br>$\text{Nb}^{5+}$ | 2,0            | 6<br>6     | $3\text{Ti} - 2\text{Nb} +$<br>$+ \text{Fe}$ | Рутил<br>Ильменорутит    | Ограниченный. До 30% Ti замещается Nb (плюс Fe)   | Высокая T                       |

Важнейшие примеры изовалентного изоморфизма элементов в существенно ковалентных соединениях

| Элементы   | $\Delta d, \%$ | КЧ          | Различия<br>в ковалентной<br>связи, % | Минерал                          | Характеристика изоморфизма  | Условия<br>образования  |
|--|----------------|-------------|---------------------------------------|----------------------------------|---|---|
| Cu <sup>1+</sup><br>Ag <sup>1+</sup>   | 10,7<br>10,7   | 4<br>4      | 0<br>0                                | Тетраэдрит<br>Пирсит             | Совершенный. До 34% Cu замещается Ag<br>Совершенный. До 36% Ag замещается Cu  | Средняя <i>T</i> гидро-<br>терм<br>Низкая <i>T</i> гидро-<br>терм                         |
| Zn <sup>2+</sup><br>Cd <sup>2+</sup>   | 7,7            | 4<br>4      | 3                                     | Гринокит                         | Совершенный. До 58,3% Cd замещается Zn  | То же   |
| Pd <sup>2+</sup><br>Pt <sup>2+</sup>   | 7,7<br>2,7     | 4<br>4      | 3<br>7                                | Сфалерит<br>Брэггит              | Ограниченный (?). До 3,5% Zn замещается Cd<br>Ограниченный (?). До 39% Pt замещается Pd   | »<br>Высокая <i>T</i> гидро-<br>терм  |
| Fe <sup>2+</sup><br>Ni <sup>2+</sup><br>Ni <sup>2+</sup><br>Co <sup>3+</sup> | 6,6<br>?<br>?  | 6<br>6<br>6 | 0<br>1                                | Пирит —<br>ваэсит<br>Скуттерудит | Совершенный. В пирите содержание Ni достигает 20%, в ваэсите Fe до 16%  | Высокая и средняя<br><i>T</i> гидротерм   |
| As <sup>3+</sup><br>Sb <sup>3+</sup>   | 8,9<br>8,9     | 3<br>3      | 6<br>6                                | Тетраэдрит<br>Полпобазит         | Весьма совершенный. Существует непрерывный ряд замещения Co — Ni<br>Весьма совершенный. Существует непрерывный ряд замещения As — Sb<br>Совершенный. Изоморфный ряд As — Sb с разрывом; до 55% Sb замещается As | То же<br>Средняя <i>T</i> гидро-<br>терм  |
| Sb <sup>3+</sup><br>Bi <sup>3+</sup>   | 3,7            | 3<br>3      | 0                                     | Висмутин                         | Совершенный. До 17% Bi (в хоробетсуите — до 50%) замещается Sb  | Низкая <i>T</i> гидро-<br>термы или зона<br>цементации<br>Средняя <i>T</i> гидро-<br>терм |
| Ge <sup>4+</sup><br>Sn <sup>4+</sup>   | 3,7<br>9,5     | 4<br>4      | 0<br>6                                | Ульменит<br>Аргиродит            | Ограниченный. До 14% Sb замещается Bi (калит)<br>Весьма совершенный. Существует непрерывный ряд замещения Ge — Sn   | То же<br>Средняя и низкая<br><i>T</i> гидротерм   |

Минералы и некоторые минеральные агрегаты, используемые в промышленности, и содержание в них полезных элементов

| Элемент | Минерал или минеральный агрегат  | Формула минерала  | Полезный компонент; максимальное его содержание, %  | Вид использования   |
|---------|--|---|---|---|
| H       | Лед (вода)   | H <sub>2</sub> O  | 100<br>H 11,2   | М. сырье<br>Ист. H  |
| He *    | Газовые включения в радиоактивных минералах  | (Ce, Th)[PO <sub>4</sub> ], ThO <sub>2</sub> , U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ,<br>Th[SiO <sub>4</sub> ], UO <sub>2</sub> и др.  |   | Ист. He   |
| Li      | Сподумен<br>Эвкрипит<br>Петалит<br>Лепидолит<br><br>Амблигонит<br>Криолитионит   | LiAl[Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]<br>LiAl[SiO <sub>4</sub> ]<br>Li[AlSi <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ]<br>K { Li <sub>1,5</sub> Al <sub>1,5</sub> [AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ]F <sub>2</sub><br><br>LiAl[PO <sub>4</sub> ](F, OH)<br>Na <sub>3</sub> [Li <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> F <sub>12</sub> ]   | Li <sub>2</sub> O 8,1<br>Li <sub>2</sub> O 11,8<br>Li <sub>2</sub> O 4,9<br>Li <sub>2</sub> O<br>1,5—5,9<br>Li <sub>2</sub> O 10,1<br>Li 5,6  | Руда Li<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»  |
| Be      | Берилл<br>Фенакит<br>Берtrandит<br>Гельвин<br>Гентгельвин<br>Эпидидимит<br>Бавенит   | Be <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> [Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> ]<br>Be <sub>3</sub> [SiO <sub>4</sub> ]<br>Be <sub>4</sub> [Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ](OH) <sub>2</sub><br>Mn <sub>4</sub> [BeSiO <sub>4</sub> ] <sub>3</sub> S<br>Zn <sub>4</sub> [BeSiO <sub>4</sub> ] <sub>3</sub> S<br>Na <sub>2</sub> [Be <sub>2</sub> (Si <sub>6</sub> O <sub>13</sub> )(OH) <sub>4</sub> ]<br>Ca <sub>4</sub> [Be <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>9</sub> O <sub>26</sub> (OH) <sub>2</sub> ]   | BeO 14,0<br>BeO 45,6<br>BeO 36,5<br>BeO 13,6<br>BeO 12,7<br>BeO 9,8<br>BeO 5,3  | Руда Be<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»   |
| B       | Борацит<br>Сассолин<br>Суанит<br>Курчатовит<br>Ашарит<br>Людвигит<br>Сахаит<br>Колеманит<br>Гидроборацит<br>Улексит<br>Пандермит<br>Индерборит<br>Бура<br>Дабурит<br>Датолит | Mg <sub>3</sub> [B <sub>3</sub> B <sub>4</sub> O <sub>12</sub> ]OCl<br>H <sub>3</sub> [BO <sub>3</sub> ]<br>Mg <sub>2</sub> [B <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]<br>CaMg[B <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]<br>Mg <sub>2</sub> [B <sub>2</sub> O <sub>4</sub> OH]OH<br>(Mg, Fe) <sub>2</sub> Fe[BO <sub>3</sub> ]O <sub>2</sub><br>Ca <sub>12</sub> Mg <sub>4</sub> [BO <sub>3</sub> ] <sub>17</sub> [CO <sub>3</sub> ] <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub> Cl·H <sub>2</sub> O<br>Ca[B <sub>2</sub> BO <sub>4</sub> (OH) <sub>3</sub> ]·H <sub>2</sub> O<br>CaMg[B <sub>2</sub> BO <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O<br>NaCa[B <sub>3</sub> B <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (OH) <sub>4</sub> ] <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O<br>Ca <sub>2</sub> [B <sub>2</sub> BO <sub>4</sub> (OH) <sub>5</sub> ]·H <sub>2</sub> O<br>CaMg[B <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> (OH) <sub>5</sub> ]·5H <sub>2</sub> O<br>Na <sub>2</sub> [B <sub>2</sub> B <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ] <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O<br>Ca <sub>2</sub> [B <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ]<br>Ca <sub>2</sub> [B <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> (OH) <sub>2</sub> ] | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 62,1<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 56,3<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 46,3<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 42,0<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 41,4<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 12—16<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 19,9<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 50,9<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 50,6<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 43,0<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 50,0<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 32,8<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 36,6<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 28,4<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 21,8 | Руда B<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>» |
| C       | Алмаз<br>Графит<br>Каменный уголь  | C<br>C<br>Аморфный C с примесями  | C 85—98   | М. сырье<br>»<br>»  |

| Элемент | Минерал или минеральный агрегат | Формула минерала   | Полезный компонент; максимальное его содержание, % | Вид использования            |         |
|---------|---------------------------------|--|--|------------------------------|---------|
| N       | Селитра                         | $\text{Na}[\text{NO}_3]$   | $\text{N}_2\text{O}_5$ 63,5                        | М. сырье                     |         |
|         | Нитрокалит                      | $\text{K}[\text{NO}_3]$  | $\text{N}_2\text{O}_5$ 53,5                        | »                            |         |
|         | Нашатырь                        | $\text{NH}_4\text{Cl}$   | $\text{NH}_4$ 33,7                                 | »                            |         |
| O       | Лед (вода)                      | $\text{H}_2\text{O}$   | O 88,8   | Ист. O                       |         |
| F       | Флюорит                         | $\text{CaF}_2$   | F 48,9   | М. сырье                     |         |
|         | Криолит                         | $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  | F 54,4   | и ист. F<br>То же            |         |
| Na      | Галит                           | $\text{NaCl}$  | Na 39,4  | М. сырье<br>и руда<br>Na     |         |
|         | Селитра                         | $\text{Na}[\text{NO}_3]$   | $\text{Na}_2\text{O}$ 36,5                         | То же                        |         |
|         | Тенардит                        | $\text{Na}_2[\text{SO}_4]$   | $\text{Na}_2\text{O}$ 43,7                         | »                            |         |
|         | Мирабилит                       | $\text{Na}_2[\text{SO}_4] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ 19,3                         | »                            |         |
|         | Сода                            | $\text{Na}_2[\text{CO}_3] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ 21,6                         | »                            |         |
|         | Нефелин                         | $\text{KNa}_3[\text{AlSi}_3\text{O}_8]_4$  | $\text{Na}_2\text{O}$ 15,1                         | М. сырье                     |         |
|         | Анальцим                        | $\text{Na}[\text{AlSi}_2\text{O}_6] \cdot \text{H}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ 14,1                         | »                            |         |
|         | Альбит                          | $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$   | $\text{Na}_2\text{O}$ 11,8                         | »                            |         |
| Mg      | Магнезит                        | $\text{Mg}[\text{CO}_3]$   | MgO 47,6   | М. сырье<br>и руда           |         |
|         | Карналлит                       | $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   | Mg 8,7   | Mg<br>То же                  |         |
|         | Бишофит                         | $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  | Mg 11,8  | Руда Mg                      |         |
|         | Эпсомит                         | $\text{Mg}[\text{SO}_4] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   | MgO 16,3   | »                            |         |
|         | Кизерит                         | $\text{Mg}[\text{SO}_4] \cdot \text{H}_2\text{O}$  | MgO 29,0   | »                            |         |
|         | Брусит                          | $\text{Mg}(\text{OH})_2$   | MgO 69,0   | М. сырье                     |         |
|         | Шпинель                         | $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  | MgO 28,2   | »                            |         |
|         | Форстерит                       | $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$  | MgO 57,1   | »                            |         |
|         | Тальк                           | $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$   | MgO 31,7   | »                            |         |
|         | Серпентин                       | $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{16}](\text{OH})_8$   | MgO 43,0   | »                            |         |
|         | Флогопит                        | $\text{K} \{ \text{Mg}_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \}$                                  | MgO 21—30  | »                            |         |
|         | Вермикулит                      | $\text{Mg}_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$                       | MgO 14—23  | »                            |         |
|         | Пальгорскит                     | $\text{Mg}_5(\text{H}_2\text{O})_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}]_2(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | MgO 18—25  | »                            |         |
|         | Al                              | Гидраргиллит   | $\text{Al}(\text{OH})_3$                           | $\text{Al}_2\text{O}_3$ 65,4 | Руда Al |
|         |                                 | Диаспор  | $\text{AlOOH}$                                     | $\text{Al}_2\text{O}_3$ 85,0 | »       |
| Бемит   |                                 | $\text{AlO}(\text{OH})$  | $\text{Al}_2\text{O}_3$ 85,0                       | »                            |         |
| Боксит  |                                 | Смесь гидроокислов Al, $\text{SiO}_2$ , каолинита и др.  | $\text{Al}_2\text{O}_3$ 20—70                      | »                            |         |
| Алунит  |                                 | $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$   | $\text{Al}_2\text{O}_3$ 37,0                       | »                            |         |
| Нефелин |                                 | $\text{KNa}_3[\text{AlSi}_3\text{O}_8]_4$  | $\text{Al}_2\text{O}_3$ 33,2                       | »                            |         |
| Анортит |                                 | $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$  | $\text{Al}_2\text{O}_3$ 36,7                       | »                            |         |
| Лейцит  |                                 | $\text{K}[\text{AlSi}_2\text{O}_6]$  | $\text{Al}_2\text{O}_3$ 23,5                       | »                            |         |

| Элемент | Минерал или минеральный агрегат   | Формула минерала  | Полезный компонент; максимальное его содержание, %   | Вид использования   |
|---------|---|---|--|---|
|         | Ортоклаз<br>Корунд<br>Шпинель<br>Топаз<br>Дистен<br>Андалузит<br>Силлиманит<br>Гранаты<br>Мусковит<br>Пиррофиллит<br>Каолинит | $K[AlSi_3O_8]$<br>$Al_2O_3$<br>$MgAl_2O_4$<br>$Al_2[SiO_4]F_2$<br>$Al_2[SiO_4]O$<br>$AlAl[SiO_4]O$<br>$Al[AlSiO_5]$<br>$R_2^{2+}Al_2[SiO_4]_3$<br>$K\{Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2\}$<br>$Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2$<br>$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ | $Al_2O_3$ 18,4<br>»<br>$Al_2O_3$ 72,8<br>$Al_2O_3$ 55,4<br>$Al_2O_3$ 63,1<br>$Al_2O_3$ 63,1<br>$Al_2O_3$ 63,1<br>$Al_2O_3$ 20—26<br>$Al_2O_3$ 38,5<br>$Al_2O_3$ 28,3<br>$Al_2O_3$ 39,5 | М. сырье<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»              |
| Si      | Кварц<br>Халцедон<br>Опал   | $SiO_2$<br>$SiO_2$<br>$SiO_2 \cdot nH_2O$   |  | М. сырье<br>»<br>»  |
| P       | Апатит<br>Фосфорит  | $Ca_5[PO_4]_3(F, Cl)$<br>Аморфный $Ca_5[PO_4]_3(OH, CO_3)$<br>с различными примесями  | $P_2O_5$ 41—42<br>$P_2O_5$ 5—30  | Руда P<br>»   |
| S       | Сера<br>Пирит<br><br>Тенардит<br>Ангидрит   | $S_8$<br>$FeS_2$<br><br>$Na_2[SO_4]$<br>$Ca[SO_4]$  | S 53,4<br><br>$SO_3$ 56,3<br>$SO_3$ 58,8   | М. сырье<br>Ист.<br>$H_2SO_4$<br>М. сырье<br>»                          |
| Cl      | Галит<br><br>Сильвин  | $NaCl$<br><br>$KCl$   | Cl 60,6<br><br>Cl 47,5   | М. сырье<br>и ист. Cl<br>То же  |
| K       | Сильвин<br><br>Карналлит<br>Нитрокалит<br>Кашиит<br>Полигалит<br>Алунит<br>Лейцит<br>Ортоклаз                                 | $KCl$<br><br>$KMgCl_3 \cdot 6H_2O$<br>$K[NO_3]$<br>$KMg[SO_4]Cl \cdot 3H_2O$<br>$K_2Ca_2Mg[SO_4]_4 \cdot 2H_2O$<br>$KAl_3[SO_4]_2(OH)_6$<br>$K[AlSi_2O_6]$<br>$K[AlSi_3O_8]$  | K 52,5<br><br>K 14,1<br>$K_2O$ 46,5<br>$K_2O$ 18,9<br>$K_2O$ 15,6<br>$K_2O$ 11,4<br>$K_2O$ 21,5<br>$K_2O$ 16,9   | М. сырье<br>и ист. K<br>То же<br>»<br>»<br>»<br>»<br>М. сырье<br>»<br>» |
| Ca      | Кальцит<br><br>Арагонит<br>Доломит<br>Флюорит   | $Ca[CO_3]$<br><br>$Ca[CO_3]$<br>$CaMg[CO_3]_2$<br>$CaF_2$   | $CaO$ 56,0<br><br>$CaO$ 56,0<br>$CaO$ 30,4<br>$Ca$ 51,1  | М. сырье<br>и ист.<br>$CaO$<br>М. сырье<br>»<br>»                       |

| Элемент | Минерал или минеральный агрегат   | Формула минерала   | Полезный компонент; максимальное его содержание, %   | Вид использования   |
|---------|---|--|--|---|
|         | Ангидрит<br>Гипс<br>Волластонит   | $\text{Ca}[\text{SO}_4]$<br>$\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$<br>$\text{Ca}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]$   | $\text{CaO}$ 41,2<br>$\text{CaO}$ 32,5<br>$\text{CaO}$ 48,3  | М. сырье<br>»<br>»  |
| Sc      | Тортвейтит<br>Бацит   | $\text{Sc}_2[\text{Si}_2\text{O}_7]$<br>$\text{Be}_2\text{Sc}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$   | $\text{Sc}_2\text{O}_3$ 53,5<br>$\text{Sc}_2\text{O}_3$ 27,5   | Руда Sc<br>—  |
| Ti      | Рутил<br>Перовскит<br>Ильменит<br>Титанит<br>Рамзаит  | $\text{TiO}_2$<br>$\text{Ca}[\text{TiO}_3]$<br>$\text{FeTiO}_3$<br>$\text{CaTi}[\text{SiO}_4]\text{O}$<br>$\text{Na}_2\text{Ti}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]\text{O}_3$  | $\text{Ti}$ 60,0<br>$\text{TiO}_2$ 58,9<br>$\text{TiO}_2$ 52,6<br>$\text{TiO}_2$ 40,8<br>$\text{TiO}_2$ 36,6   | Руда Ti<br>»<br>»<br>»<br>—   |
| V       | Патронит<br>Сульванит<br><br>Ванадинит<br>Деклуазит<br>Карнит<br>Тюмююнит   | $\text{V}(\text{S}_2)_2$<br>$\text{Cu}_3\text{VS}_4$<br><br>$\text{Pb}_5[\text{VO}_4]_3\text{Cl}$<br>$(\text{Zn}, \text{Cu})\text{Pb}[\text{VO}_4]\text{OH}$<br>$\text{K}_2[(\text{UO}_2)(\text{VO}_4)_2] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$<br>$\text{Ca}[(\text{UO}_2)(\text{VO}_4)_2] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  | $\text{V}$ 28,5<br>$\text{V}$ 13,9<br><br>$\text{V}_2\text{O}_5$ 49,4<br>$\text{V}_2\text{O}_5$ 36,2<br>$\text{V}_2\text{O}_5$ 20,2<br>$\text{V}_2\text{O}_5$ 19,1   | Руда V<br>»<br><br>Руда V<br>»<br>»<br>»                                  |
| Cr      | Хромит<br>Магнезиохромит<br>Крокоит<br>Волконскоит  | $\text{FeCr}_2\text{O}_4$<br>$\text{Mg}(\text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_4$<br>$\text{Pb}[\text{CrO}_4]$<br>$\text{Mg}_{0,5}(\text{H}_2\text{O})_4 \cdot$<br>$\cdot \{\text{Cr}_2[\text{Al}_x\text{Si}_{4-x}\text{O}_{10}](\text{OH})_2\}$  | $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 68,0<br>$\text{Cr}_2\text{O}_3$ 70<br>$\text{Cr}_2\text{O}_3$ 31,1<br>$\text{Cr}_2\text{O}_3$ 18—30  | Руда Cr<br>»<br>—<br>—  |
| Mn      | Пирролюзит<br>Гаусманит<br>Псиломелан<br>Манганит<br>Браунит<br>Родохрозит<br>Родонит<br>Якобсит                                | $\text{MnO}_2$<br>$\text{MnMn}_2\text{O}_4$<br>$\text{BaMnMn}_9\text{O}_{20} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$<br>$\text{MnOOH}$<br>$\text{MnMn}_8\text{SiO}_{12}$<br>$\text{Mn}[\text{CO}_3]$<br>$\text{CaMn}_4[\text{Si}_5\text{O}_{15}]$<br>$\text{MnFe}_2\text{O}_4$  | $\text{Mn}$ 63,2<br>$\text{Mn}$ 72,0<br>$\text{Mn}$ 52,0<br>$\text{Mn}_2\text{O}_3$ 89,7<br>$\text{Mn}_2\text{O}_3$ 78,3<br>$\text{MnO}$ 61,7<br>$\text{MnO}$ 44,4<br>$\text{MnO}$ 30,8  | Руда Mn<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>М. сырье<br>—                    |
| Fe      | Гематит<br>Магнетит<br>Гётит<br>Лешидокроцит<br>Лимонит<br><br>Сидерит<br>Ильменит<br>Шамозит<br>Вивиянит<br>Скородит<br>Ярозит | $\text{Fe}_2\text{O}_3$<br>$\text{FeFe}_2\text{O}_4$<br>$\text{FeOOH}$<br>$\text{FeO}(\text{OH})$<br>Смесь гидроокислов Fe с $\text{SiO}_2$<br>и др. м. веществами<br>$\text{Fe}[\text{CO}_3]$<br>$\text{FeTiO}_3$<br>$\text{Fe}_4(\text{Fe}, \text{Al})_2[\text{Al}_8\text{Si}_2\text{O}_{10}](\text{OH})_8$<br>$\text{Fe}_3[\text{PO}_4]_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$<br>$\text{Fe}[\text{AsO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$<br>$\text{KFe}_3[\text{SO}_4]_2(\text{OH})_6$ | $\text{Fe}$ 70,0<br>$\text{Fe}$ 72,4<br>$\text{Fe}$ 62,9<br>$\text{Fe}$ 62,9<br>$\text{Fe}$ 40—62<br><br>$\text{Fe}$ 48,2<br>$\text{Fe}$ 36,8<br>$\text{FeO}$ 34—42<br>$\text{FeO}$ 43,0<br>$\text{Fe}_2\text{O}_3$ 34,6<br>$\text{Fe}_2\text{O}_3$ 47,9 | Руда Fe<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br><br>»<br>»<br>»<br>»<br>М. сырье<br>» |

| Элемент | Минерал или минеральный агрегат   | Формула минерала  | Полезный компонент; максимальное его содержание, %   | Вид использования  |
|---------|---|---|--|--|
| Co      | Линнеит<br>Кобальтин<br>Глаукокодот<br>Смальтин<br>Эритрин  | $\text{CoCo}_3\text{S}_4$<br>$\text{CoAsS}$<br>$(\text{Co}, \text{Fe})\text{AsS}$<br>$(\text{Co}, \text{Ni})\text{As}_{3-2}$<br>$\text{Co}_3[\text{AsO}_4]_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$   | Co 58,0<br>Co 35,5<br>Co 12—32<br>Co 28,2<br>CoO 37,5  | Руда Co<br>»<br>»<br>»<br>»  |
| Ni      | Миллерит<br>Подидимит<br>Пентландит<br>Ваэсит<br>Никелин<br>Раммельсбергит<br>Герсдорфит<br>Уиллемсеит<br>Непуит<br>Аннабергит                            | $\text{NiS}$<br>$\text{NiNi}_2\text{S}_4$<br>$(\text{Ni}, \text{Fe})_9\text{S}_8$<br>$\text{NiS}_2$<br>$\text{NiAs}$<br>$\text{NiAs}_2$<br>$\text{NiAsS}$<br>$\text{Ni}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$<br>$\text{Ni}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$<br>$\text{Ni}_3[\text{AsO}_4]_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  | Ni 64,7<br>Ni 57,9<br>Ni 34,6<br>Ni 46,0<br>Ni 43,9<br>Ni 28,2<br>Ni 35,4<br>NiO 58,6<br>NiO 59,0<br>NiO 37,5  | Руда Ni<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»                                      |
| Cu      | Медь<br>Куприт<br>Тенорит<br>Халькозин<br>Ковеллин<br>Борнит<br>Энарцит<br>Халькопирит<br>Кубанит<br>Малахит<br>Азурит<br>Халькантит<br>Диоптаз<br>Бирюза | $\text{Cu}$<br>$\text{Cu}_2\text{O}$<br>$\text{CuO}$<br>$\text{Cu}_2\text{S}$<br>$\text{Cu}_2\text{CuS}_2\text{S}$<br>$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$<br>$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$<br>$\text{CuFeS}_2$<br>$\text{CuFe}_2\text{S}_3$<br>$\text{Cu}_2[\text{CO}_3](\text{OH})_2$<br>$\text{Cu}_3[\text{CO}_3]_2(\text{OH})_2$<br>$\text{Cu}[\text{SO}_4] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$<br>$\text{Cu}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$<br>$\text{CuAl}_6[\text{PO}_4]_4(\text{OH})_8 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ | Cu 92—100<br>Cu 88,8<br>Cu 79,9<br>Cu 79,9<br>Cu 66,5<br>Cu 63,3<br>Cu 48,4<br>Cu 34,6<br>Cu 23,4<br>Cu 57,4<br>Cu 55,3<br>CuO 31,8<br>CuO 50,5<br>CuO 9,6 | Руда Cu<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>М. сырье<br>»<br>» |
| Zn      | Сфалерит<br>Вюрцит<br>Цинкит<br>Смитсонит<br>Гидроцинкит<br>Каламин<br>Виллемит   | $\text{ZnS}$<br>$\text{ZnS}$<br>$\text{ZnO}$<br>$\text{Zn}[\text{CO}_3]$<br>$\text{Zn}_5[\text{CO}_3]_2(\text{OH})_6$<br>$\text{Zn}_4[\text{Si}_2\text{O}_7](\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$<br>$\text{Zn}_2[\text{SiO}_4]$  | Zn 67,1<br>Zn 67,1<br>Zn 80,3<br>Zn 52,0<br>Zn 59,5<br>ZnO 67,5<br>ZnO 73,0  | Руда Zn<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»   |
| Ga      | Галлит<br>Зёнгейт<br>Примеси Ga в сульфидных силикатах  | $\text{CuGaS}_2$<br>$\text{Ga}(\text{OH})_3$<br>Механическая примесь в сульфидных и изоморфная примесь в алюмосиликатах   | Ga 35,2<br>Ga 57,8<br>Ga<br>0,01—0,1   | —<br>—<br>Руда Ga  |

| Элемент | Минерал или минеральный агрегат                                 | Формула минерала   | Полезный компонент; максимальное его содержание, %         | Вид использования   |
|---------|---|--|--|---|
| Ge      | Бриартит<br>Германит<br>Аргиродит<br>Стоттит<br>Итоит           | $Cu_2(Fe, Zn)GeS_4$<br>$Cu_6Fe_2GeS_8$<br>$Ag_8GeS_6$<br>$FeGe(OH)_6$<br>$Pb_4[GeO_2(OH)_2][SO_4]_3$ | Ge 18,8<br>Ge 6—12<br>Ge 6,4<br>Ge 31,5<br>Ge 6,9          | Руда Ge<br>»<br>»<br>—<br>—   |
| As      | Реальгар<br>Аурипигмент<br>Лёллингит<br>Арсенопирит<br>Скородит | $As_4S_4$<br>$As_2S_3$<br>$FeAs_2$<br>$FeAsS$<br>$Fe[AsO_4] \cdot 2H_2O$                             | As 70,0<br>As 60,9<br>As 72,8<br>As 46,0<br>$As_2O_5$ 49,8 | Руда As<br>»<br>»<br>»<br>»   |
| Se      | Умангит<br>Клаусталит<br>Клокманнит<br>Штиллеит                 | $Cu_3Se_2$<br>$PbSe$<br>$Cu_2CuSe_3Se$<br>$ZnSe$   | Se 45,3<br>Se 27,6<br>Se 55,2<br>Se 54,8                   | Руда Se<br>»<br>Основная масса Se добывается побочно из сульфидных концентратов |
| Br      | Бромйрит<br>Иодобромит  | $AgBr$<br>$Ag(Cl, Br, I)$  | Br 32,2<br>Br <10  | Добывается из морской рапы и нефтяных вод                                       |
| Rb *    | Примесь в силикатах   | $Cs[AlSi_2O_6]$ , $K[AlSi_2O_6]$ , лепидолит, мусковит, биотит, микроклин                            | Rb 0,1—4,5   |   |
| Sr      | Стронцианит<br>Целестин<br>Витчит<br>Гояцит                     | $Sr[CO_3]$<br>$Sr[SO_4]$<br>$Sr_2[B_2B_3O_8(OH)]_2[B(OH)_3]H_2O$<br>$SrAl_3[PO_4]_2(OH)_5H_2O$       | SrO 70,2<br>SrO 56,4<br>SrO 30,2<br>SrO 21,4               | Руда Sr<br>»<br>—<br>—  |

| Элемент | Минерал или минеральный агрегат  | Формула минерала   | Полезный компонент, максимальное содержание, %   | Вид использования                    |
|---------|--|--|--|--------------------------------------|
| Y       | Ксенохим<br>Чёрчит<br>Иттриалит<br>Таленит<br>Фергусонит<br>Гадолинит<br>Гагаринит | $Y[PO_4]$<br>$U[PO_4] \cdot 2H_2O$<br>$Y_2[Si_2O_7]$<br>$Y_3[Si_3O_{10}]OH$<br>$YNbO_4$<br>$Y_2Fe[Be_2Si_2O_{10}]$<br>$NaCaYF_6$   | $Y_2O_3$ 61,5<br>$Y_2O_3$ 51,3<br>$Y_2O_3$ 65,4<br>$Y_2O_3$ 64,0<br>$Y_2O_3$ 46,0<br>$Y_2O_3$ 48,3<br>Y 33,5                 | Руда Y<br>»<br>»<br>»<br>»<br>—<br>— |
| Zr      | Бадделит<br>Циркон<br>Катаплект<br>Эльпидит<br>Эвдиалит                            | $ZrO_2$<br>$Zr[SiO_4]$<br>$(Na, Ca)[Zr(Si_3O_9)] \cdot 2H_2O$<br>$Na_2[Zr(Si_6O_{15})] \cdot 3H_2O$<br>$Na_{12}Ca_6Fe_3Zr_3[Si_3O_9]_2 \times$<br>$\times [Si_9O_{26}(OH)_{32}]$ | Zr 74,0<br>$ZrO_2$ 67,1<br>$ZrO_2$ 30,6<br>$ZrO_2$ 20,5<br>$ZrO_2$ 11—16   | Руда Zr<br>»<br>»<br>»<br>»          |
| Nb      | Фергусонит<br>Колумбит<br>Пироклор<br>Бетафит<br>Самарскит<br>Луешит               | $YNbO_4$<br>$(Fe, Mn)(Nb, Ta)_2O_6$<br>$NaCaNb_2O_6(OH, F)$<br>$U_{1-x}TiNbO_{6-2x}(OH)_y \cdot nH_2O$<br>$Y(Fe, U)(Nb, Ta)_2O_8$<br>$NaNbO_3$                                   | $Nb_2O_5$<br>38—58<br>$Nb_2O_5$<br>59—76<br>$Nb_2O_5$<br>52—71<br>$Nb_2O_5$<br>21—35<br>$Nb_2O_5$<br>32—48<br>$Nb_2O_5$ 80,5 | Руда Nb<br>»<br>»<br>»<br>»<br>—     |
| Mo      | Молибденит<br>Молибдит<br>Повеллит<br>Дрисдаллит                                   | $MoS_2$<br>$MoO_3$<br>$Ca[MoO_4]$<br>$MoSe_2$  | Mo 60,0<br>Mo 66,7<br>Mo 50,5<br>Mo 37,8   | Руда Mo<br>»<br>»<br>—               |
| Ru      | Рутений<br>Лаурит  | $(Ru, Ir, Rh)$<br>$RuS_2$  | Ru до 70,0<br>Ru 65,2  | Руда Ru<br>—                         |
| Rh      | Родий<br>Холлингуорсит   | $(Rh, Pt)$<br>$RhAsS$  | Rh до 80,0<br>Rh 49,0  | Руда Rh<br>—                         |
| Pd      | Палладий<br>Высоцкит<br>Стибиопалладинит<br>Меренскит                              | Pd<br>PdS<br>$Pd_3Sb$<br>$PdTe_2$  | Pd 96—100<br>Pd 77,0<br>Pd 72,2<br>Pd 29,3   | Руда Pd]<br>»<br>—<br>—              |

| Элемент | Минерал или минеральный агрегат  | Формула минерала   | Полезный компонент; максимальное его содержание, %  | Вид использования                               |
|---------|--|--|---|---|
| Ag      | Серебро<br>Аргентит<br>Науманнит<br>Стефанит<br>Прустит<br>Пираргирит<br>Ag-содержащий галенит | Ag<br>Ag <sub>2</sub> S<br>Ag <sub>2</sub> Se<br>Ag <sub>5</sub> SbS <sub>4</sub><br>Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub><br>Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub><br>(Pb, Ag)S <sub>1-x</sub>  | Ag 50—100<br>Ag 87,1<br>Ag 73,0<br>Ag 68,5<br>Ag 65,4<br>Ag 60,0<br>Ag 0,1—0,6                        | Руда Ag<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»           |
| Cd      | Гринокит<br>Отавит<br>Кадмоселит   | CdS<br>Cd[CO <sub>3</sub> ]<br>CdSe  | Cd 77,7<br>CdO 74,3<br>Cd 58,6  | Руда Cd<br>»<br>—                               |
| In      | Индит<br>Рокезит<br>Сакураит   | FeIn <sub>2</sub> S <sub>4</sub><br>CuInS <sub>2</sub><br>Cu <sub>2</sub> ZnInS <sub>4-x</sub>   | In 55,6<br>In 47,5<br>In 26,4   | Руда In<br>—<br>—                               |
| Sn      | Касситерит<br>Герцшбергит<br>Станнин<br>Станноидит<br>Франкеит<br>Нигерит<br>Малаяит           | SnO <sub>2</sub><br>SnS<br>CuFeSnS <sub>4</sub><br>Cu <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> Sn <sub>8</sub> S <sub>8</sub><br>Pb <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> Sn <sub>3</sub> S <sub>14</sub><br>SnAl <sub>4</sub> O <sub>8</sub><br>CaSn[SiO <sub>4</sub> ]O | Sn 78,8<br>Sn 78,7<br>Sn 27,5<br>Sn 24,6<br>Sn 17,1<br>SnO <sub>2</sub> 36,8<br>SnO <sub>2</sub> 44,5 | Руда Sn<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>—<br>—      |
| Sb      | Антимонит<br>Кермесит<br>Валентинит<br>Стибиконит<br>Бурнонит                                  | Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub><br>Sb <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O<br>Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>SbSb <sub>2</sub> O <sub>6</sub> OH<br>CuPbSbS <sub>3</sub>  | Sb 71,6<br>Sb 75,3<br>Sb 83,5<br>Sb 76,4<br>Sb 42,5   | Руда Sb<br>»<br>»<br>»<br>—                     |
| Te      | Теллуробисмутит<br>Тетрадимит<br>Теллурит<br>Гёссит<br>Алтаит                                  | Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub><br>Bi <sub>2</sub> Te <sub>2</sub> S<br>TeO <sub>2</sub><br>Ag <sub>2</sub> Te<br>PbTe   | Te 48,0<br>Te 36,2<br>Te 80,0<br>Te 37,2<br>Te 37,7   | Руда Te<br>»<br>»<br>—<br>—                     |
| I       | Маршит<br>Иодаргирит   | CuI<br>AgI   | I 66,8<br>I 54,0  | Добывается из морских водорослей и нефтяных вод |

| Элемент | Минерал или минеральный агрегат  | Формула минерала   | Полезный компонент; максимальное его содержание, %  | Вид использования                                |
|---------|--|--|---|--|
| Cs      | Поллуцит<br>Родицит<br>Цезиокуплет-скит                                | $Cs[AlSi_2O_6]$<br>$Cs[Al_4(LiBe_3B_{12})O_{28}]$<br>$Cs_3Mn_7[Ti_2(Si_4O_{12})_2]O_2(OH)_5$                     | $Cs_2O$ 45,2<br>$Cs_2O$ 16,6<br>$Cs_2O$ 24,5  | Руда Cs<br>—<br>—                                |
| Ba      | Витерит<br>Барит<br>Баритокальцит<br>Санборнит<br>Бенитоит             | $Ba[CO_3]$<br>$Ba[SO_4]$<br>$BaCa[CO_3]_2$<br>$Ba_2[Si_4O_{10}]$<br>$Ba[Ti(Si_3O_9)]$                            | $BaO$ 77,7<br>$BaO$ 65,7<br>$BaO$ 51,5<br>$BaO$ 53,1<br>$BaO$ 37,0  | Руда Ba<br>»<br>М. сырье<br>»<br>»               |
| La      | Торнебомит<br>Лантанит<br>Примесь в минералах TR                       | $La_2Al[SiO_4]_2OH$<br>$LaCe[CO_3]_3 \cdot 5H_2O$  | $La_2O_3$ 62,4<br>$La_2O_3$ до 40   | Добывается из минералов, содержащих редкие земли |
| Ce      | Монацит<br>Рабдофанит<br>Бастнезит<br>Бритолиит<br>Церит<br>Стилвеллит | $Ce[PO_4]$<br>$Ce[PO_4] \cdot H_2O$<br>$Ce[CO_3]F$<br>$Ca_2Ce_8[SiO_4]_3OH$<br>$Ce_3[SiO_4]_3OH$<br>$Ce[BSiO_5]$ | $Ce_2O_3$ 70,0<br>$Ce_2O_3$ 65,0<br>$Ce_2O_3$ 75,0<br>$Ce_2O_3$ 62,4<br>$Ce_2O_3$ до 79<br>$Ce_2O_3$ 63,4 | Руда Ce<br>»<br>»<br>»<br>—<br>—                 |
| Hf      | Гафнон<br>Примесь в минералах Zr                                       | $Hf[SiO_4]$<br>$ZrO_2, Zr[SiO_4],$<br>$Na_2[Zr(Si_4O_{11})]$ и др.   | $HfO_2$ 85,0<br>$HfO_2$ 0,5—30,0  | Добывается из минералов циркония                 |
| Ta      | Таяталит<br>Микролит<br>Иксиолит<br>Форманит<br>Симпсонит              | $(Mn, Fe)(Ta, Nb)_2O_6$<br>$NaCaTaO_6(OH, F)$<br>$(Fe, Sn)TaO_4$<br>$YTaO_4$<br>$Al_4Ta_3O_{13}OH$               | $Ta_2O_5$ 63—86<br>$Ta_2O_5$ 68—80<br>$Ta_2O_5$ 60—70<br>$Ta_2O_5$ 61,5<br>$Ta_2O_5$ 75,8                 | Руда Ta<br>»<br>»<br>—<br>—                      |
| W       | Вольфрамит<br>Шеелит<br>Ферритунгстит<br>Тунгстенит                    | $(Fe, Mn)WO_4$<br>$Ca[WO_4]$<br>$Ca_2Fe_2Fe_2[WO_4]_7 \cdot 9H_2O$<br>$WS_2$                                     | $WO_3$ 75—77<br>$WO_3$ 80,6<br>$WO_3$ 73,7<br>W 74,1  | Руда W<br>»<br>»<br>—                            |

| Элемент | Минерал или минеральный агрегат                                      | Формула минерала   | Полезный компонент; максимальное его содержание, %                 | Вид использования                |
|---------|--|--|--|----------------------------------|
| Re *    | Примесь в молибдените  | MoS <sub>2</sub>   | Re до 2  | Добывается из MoS <sub>2</sub>   |
| Os      | Осмий<br>Эрлихманит<br>Осарсит                                       | (Os, Ir)<br>OsS <sub>2</sub><br>OsAsS  | Os 50—70<br>Os 74,8<br>Os 64,0                                     | Руда Os<br>—<br>—                |
| Ir      | Иридий<br>Ирарсит  | (Ir, Os)<br>IrAsS  | Ir 60—90<br>Ir 64,0  | Руда Ir<br>—                     |
| Pt      | Платина<br>Куперит<br>Спириллит<br>Мюччит                            | (Pt, Fe, Ir)<br>PtS<br>PtAs <sub>2</sub><br>PtTe <sub>2</sub>  | Pt 80—98<br>Pt 85,9<br>Pt 56,5<br>Pt 43,3                          | Руда Pt<br>—<br>Руда Pt<br>—     |
| Au      | Золото<br>Калаверит<br>Сильванит<br>Петцит<br>Ауростибит<br>Нагнагит | (Au, Ag)<br>AuTe <sub>2</sub><br>AgAuTe <sub>4</sub><br>Ag <sub>3</sub> AuTe <sub>3</sub><br>AuSb <sub>2</sub><br>Pb <sub>5</sub> AuSbTe <sub>3</sub> S <sub>6</sub> | Au 50—100<br>Au 43,2<br>Au 24,2<br>Au 25,4<br>Au 44,7<br>Au 7,4—10 | Руда Au<br>»<br>»<br>»<br>—<br>— |
| Hg      | Киноварь<br>Тиманит<br>Ливингстонит<br>Монтроидит<br>Колорадоит      | HgS<br>HgSe<br>HgSb <sub>4</sub> S <sub>2</sub> S <sub>6</sub><br>HgO<br>HgTe  | Hg 86,2<br>Hg 75,2<br>Hg 21,3<br>Hg 92,5<br>Hg 61,0                | Руда Hg<br>»<br>»<br>—<br>—      |
| Tl      | Лорандит<br>Хатчинсонит<br>Хатчит<br>Рагинит<br>Карлинит             | TlAsS <sub>2</sub><br>TlPbAs <sub>5</sub> S <sub>9</sub><br>TlAgPbAs <sub>2</sub> S <sub>5</sub><br>TlFeS <sub>2</sub><br>Tl <sub>2</sub> S                          | Tl 59,5<br>Tl 18,9<br>Tl 24,6<br>Tl 63,0<br>Tl 93,0                | Руда Tl<br>»<br>—<br>—<br>—      |
| Pb      | Галенит<br>Церуссит<br>Англезит<br>Сурик<br>Фосгенит                 | PbS<br>Pb[CO <sub>3</sub> ]<br>Pb[SO <sub>4</sub> ]<br>Pb <sub>2</sub> PbO <sub>4</sub><br>Pb <sub>2</sub> [CO <sub>3</sub> ]Cl <sub>2</sub>                         | Pb 86,6<br>Pb 77,5<br>Pb 68,3<br>Pb 90,7<br>Pb 76,1                | Руда Pb<br>»<br>»<br>»<br>—      |



Классификация природных газов по В. А. Соколову (1966)

| Типы газов  | Химический состав              |  |   | Происхождение газа   |
|---|--------------------------------|--|---|--|
|   | Основные компоненты            | Компоненты, не всегда встречающиеся в значительных концентрациях | Микрокомпоненты   |  |
| <p>I. Газы атмосферы</p> <p>II. Газы земной поверхности и субаквальных отложений:</p> | $N_2, O_2, Ar, CO_2$           |  | $O_3, NO_2, N_2O, H_2$ , благородные газы   | Смесь газов химического, биохимического и радиогенного происхождения   |
| а) почвы и подпочвы   | $CO_2, N_2, O_2$ и другие газы | —  | $CH_4, CO, N_2O, H_2, H_2S, H_3$ , летучие органические вещества, благородные газы (из воздуха) | Газы преимущественно биохимического происхождения с примесью других газов. Газообмен с атмосферой приводит к тому, что основной образующийся в почве газ и другие газы примешаны к воздуху |
| б) болотные, торфяные   | $CH_4, CO_2, N_2$              | —  | $H_2, CO, N_2O, NH_3, H_2S$ , летучие органические вещества, благородные газы (из воздуха)      | Газы преимущественно биохимического происхождения с примесью других газов. Воздух присутствует иногда. Азот, присутствующий в газах, является в большей своей части воздушным              |
| в) морских субаквальных осадков   | $CO_2, OH_4, N_2$              | —  | $H_2, NH_3, H_2S$ , летучие органические вещества, благородные газы (из воздуха)                | Газы преимущественно биохимического происхождения. В газах глубоководных осадков, согласно отдельным анализам, основными компонентами являются $CO_2$                                      |

| Типы газов                                      | Химический состав  |  |   | Происхождение газа   |
|---|--|--|---|--|
|   | Основные компоненты  | Компоненты, не всегда встречающиеся в значительных концентрациях   | Микрокомпоненты   |  |
| <b>III. Газы осадочных пород:</b>               |  |  |   |  |
| а) нефтяных месторождений                       | CH <sub>4</sub> , Т. У.  | N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, He, Ar        | H <sub>2</sub> , благородные газы                           | Газы преимущественно химического происхождения, с примесью газов биохимического и иного происхождения. На значительных глубинах, где вследствие повышения температуры нормальная деятельность микроорганизмов прекращается, биохимические газы отсутствуют |
| б) газовых месторождений                        | CH <sub>4</sub>  | Т. У., N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, He, Ar | H <sub>2</sub> , благородные газы                           |  |
| в) угольных месторождений                       | CH <sub>4</sub>  | CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>                  | Т. У., H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> , благородные газы |  |
| г) соленосных отложений                         | CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>                    | H <sub>2</sub> S, Т. У.  | Благородные газы  |  |
| д) рассеянные                                   | CO <sub>2</sub>  | H <sub>2</sub> , Т. У., H <sub>2</sub> S, N <sub>2</sub>           | Благородные газы  | Газы химического происхождения с примесью газов радиационно-химического и радиогенного происхождения<br>То же  |
| <b>IV. Газы метаморфических пород</b>           | CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>                    | CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S, Т. У.                          | Благородные газы  |  |
| <b>V. Газы гранитной и базальтовой оболочек</b> | CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>                                     | N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, HCl, HF                         | CH <sub>4</sub> , благородные газы                          | Газы химического происхождения с примесью газов радиационно-химического и радиогенного происхождения<br>Вулканические газы — в той или иной степени измененные газы верхней мантии   |
| <b>VI. Вулканические газы:</b>                  |  |  |   |  |
| а) магматические (лаво-вых озер)                | CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , HCl, HF         | CO, N <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub>                               | CH <sub>4</sub> , благородные газы                          |  |
| б) фумарольные                                  | CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> | CO, HCl, HF, N <sub>2</sub>  | CH <sub>4</sub> , благородные газы                          |  |
| Т. У. — тяжелые углеводороды.                   |  |  |   |  |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бетехтин А. Г. Минералогия. М., Гостеолтехиздат, 1950. 956 с.  
 Винчелл А. Н., Винчелл Г. Оптическая минералогия. М., Изд-во иностр. лит., 1953.  
 561 с.  
 Гольдшмидт В. М. Кристаллохимия. М., ОНТИ, 1937. 62 с.  
 Коржинский Д. С. Физико-химические основы парагенезисов минералов. М., Изд-во АН СССР, 1957. 184 с.  
 Лебедев В. И. Основы энергетического анализа геохимических процессов. Л., Изд-во ЛГУ, 1957. 342 с.  
 Летников Ф. А. Изобарные потенциалы образования минералов (химическое родство) и их применение в геохимии. М., «Недра», 1965. 116 с.  
 Макаров Е. С. Изоморфизм атомов в кристаллах. М., Атомиздат, 1973. 288 с.  
 Перельман А. И. Геохимия эпигенетических процессов. М., «Недра», 1968. 331 с.  
 Перчук Л. Л. Равновесия породообразующих минералов. М., «Наука», 1970. 391 с.  
 Поваренных А. С. О главных факторах, определяющих изоморфизм элементов. — «Минерал. сб. Львовского геол. об-ва», 1964, № 18, вып. 2, с. 126—144.  
 Поваренных А. С. Кристаллохимическая классификация минеральных видов. Киев, «Наукова думка», 1966. 547 с.  
 Распространенность элементов в земной коре (под ред. Л. Аренса). М., «Мир», 1972.  
 273 с.  
 Соколов В. А. Геохимия газов земной коры и атмосферы. М., «Недра», 1966. 320 с.  
 Урусов В. С. Энергетическая кристаллохимия. М., «Наука», 1975. 335 с.  
 Энгельм У., Брилли Л. Аналитическая геохимия. Л., «Недра», 1975. 296 с.  
 Riley J. P., Skirrow G. Chemical Oceanography. Academic Press, London and New York, 1965. 350 с.  
 Strunz H. Mineralogische Tabellen. 5. Aufl. Leipzig, 1970. 621 s.

## Основные учебные пособия, монографии и справочные издания по геохимии

- Алексин О. А. Химия океана. Л., Гидрометеозидат, 1966. 248 с.  
 Алексин О. А. Основы гидрохимии. Л., Гидрометеозидат, 1970. 44 с.  
 Аллер Р. Распространенность химических элементов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1963. 358 с.  
 Берг Г. Геохимия месторождений полезных ископаемых. Пер. с нем. М., ОНТИ, 1937.  
 397 с.  
 Беус А. А. Геохимия Литосферы. М., «Недра», 1972. 296 с.  
 Бэрч Ф., Шерер Дж., Стайсер Г. Справочник для геологов по физическим константам. М., Изд-во иностр. лит., 1949. 300 с.  
 Ваяшко М. Г. Геохимические закономерности формирования месторождений калийных солей. М., Изд-во МГУ, 1962. 327 с.  
 Вернянский В. И. Очерки геохимии. Избр. соч. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1962. 392 с.  
 Вернянский В. И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М., «Недра», 1965. 374 с.  
 Виноградов А. П. Геохимия живого вещества. М., Изд-во АН СССР, 1932. 67 с.  
 Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М., Изд-во АН СССР, 1957. 237 с.  
 Виноградов А. П. Химическая эволюция Земли. М., Изд-во АН СССР, 1959. 44 с.  
 Виноградов А. П. Введение в геохимию Океана. М., «Наука», 1967. 216 с.  
 Войткевич Г. В. Проблемы Радиогеологии. М., Гостеолтехиздат, 1961. 352 с.  
 Войткевич Г. В. Радиоактивность в истории Земли. М., «Наука», 1970. 168 с.  
 Войткевич Г. В. Происхождение и химическая эволюция Земли. М., «Наука», 1973.  
 168 с.  
 Войткевич Г. В., Лебедев Г. И. Полезные ископаемые и металлогения докембрия. М., «Недра», 1975. 230 с.  
 Войткевич Г. В., Закруткин В. В. Основы геохимии. М., «Высшая школа», 1976. 370 с.  
 Гаурусевич Б. А. Основы общей геохимии. М., «Недра», 1968. 328 с.  
 Гаррелс Р. М. Минеральные равновесия. Пер. с англ. Изд-во иностр. лит., 1962. 360 с.  
 Гаррелс Р. М. Круговорот углерода, кислорода и серы в течение геологического времени. М., «Наука», 1975. 48 с.  
 Гаррелс Р. М. и Крайст Ч. Л. Растворы, минералы, равновесия. Пер. с англ. М., «Мир», 1968. 368 с.  
 Геология и геохимия рудных месторождений. Пер. с англ. М., «Мир», 1971. 272 с.  
 Геохимия гидротермального рудообразования. Сб., посвященный 60-летию проф. В. В. Щербины. М., «Наука», 1971. 228 с.  
 Геохимия литогенеза. Под ред. А. Б. Рогова. М., Изд-во иностр. лит., 1963. 460 с.  
 Геохимия осадочных пород и руд. Сб. материалов VII Всесоюзной литологической конференции. Под ред. Н. М. Страхова. М., «Наука», 1968. 444 с.  
 Гинзбург И. И. Опыт разработки теоретических основ геохимических методов поисков руд цветных и редких металлов. М., Гостеолтехиздат, 1957. 200 с.  
 Деенс Э. Т. Геохимия осадочных образований. Пер. с англ. М., «Мир», 1967. 299 с.  
 Ермаков Н. П. Геохимические системы включений в минералах. (Включения минералообразующих сред — источник геохимической информации). М., «Недра», 1972. 376 с.  
 Коржинский Д. С. Физико-химические основы парагенетического анализа минералов. М., Изд-во АН СССР, 1957. 184 с.  
 Коржинский Д. С. Теория процессов минералообразования. М., Изд-во АН СССР, 1962. 24 с.  
 Котляр В. Н. Основы теории рудообразования. М., «Недра», 1970. 464 с.

- Лебедев В. И. Основы энергетического анализа геохимических процессов. Л., Изд-во ЛГУ, 1957. 320 с.
- Лукашев К. И. Очерки геохимии гипергенеза. Минск. изд-во АН БССР, 1963. 446 с.
- Лукашев К. И., Лукашев В. К. Геохимические поиски элементов в зоне гипергенеза. Кн. 1, 380 с.; кн. 2, 300 с. Минск, «Наука и техника», 1967.
- Мейсон Б. Основы геохимии. Пер. с англ. М., «Недра», 1971. 312 с.
- Метасоматизм и рудообразование. Под ред. Ю. В. Казинца, М., «Недра», 1975. 280 с.
- Метасоматиты и орудуение. Под ред. Н. Н. Перцева. М., «Наука», 1975. 344 с.
- Мияки Я. Основы геохимии. Пер. с англ. Л., «Недра», 1969. 328 с.
- Нигглы П. Магма и ее продукты. Пер. с нем. М., Госгеолгиздат, 1947. 90 с.
- Николаев В. А., Долово-Добровольский В. В. Основы теории процессов магматизма и метаморфизма. М., Госгеолтехиздат, 1961. 360 с.
- Овчинников А. М. Гидрогеохимия. М., «Недра», 1970. 200 с.
- Очерки современной геохимии и аналитической химии. Сб., посвященный 75-летию акад. А. П. Виноградова. М., «Наука», 1972. 642 с.
- Перельман А. И. Геохимия эпигенетических процессов. М., «Недра», 1968. 272 с.
- Перельман А. И. Геохимия ландшафта. Изд. 2-е. М., «Высшая школа», 1975. 344 с.
- Польнов Б. В. Кора выветривания. М., Изд-во АН СССР, 1956. 751 с.
- Поваренных А. С. Кристаллохимическая классификация минеральных видов. Киев, «Наукова думка», 1966. 548 с.
- Проблемы Геохимии. Юбилейный сборник, посвященный 70-летию акад. А. П. Виноградова. Ред. Н. И. Хитаров. М., «Наука», 1965. 512 с.
- Радиоактивные элементы в горных породах. Материалы первого всесоюзного радиогеохимического совещания. Новосибирск, «Наука», 1975. 296 с.
- Распространенность элементов в земной коре. Под ред. Л. Аренса. Пер. с англ. и фран. М., «Мир», 1972. 274 с.
- Рябчиков И. Д. Термодинамический анализ поведения малых элементов при кристаллизации силикатных расплавов. М., «Наука», 1965. 120 с.
- Сауко А. А. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. М., Изд-во МГУ, 1963. 248 с.
- Сауко А. А. Геохимия. М., «Наука», 1966. 488 с.
- Смирнов С. С. Зона окисления сульфидных месторождений. М., Изд-во АН СССР, 1955. 332 с.
- Смит Ф. Г. Физическая Геохимия. Пер. с англ. М., «Недра», 1968. 476 с.
- Соботович Э. В. Изотопная космохимия. М., Атомиздат, 1974. 203 с.
- Соколов В. А. Геохимия газов земной коры и атмосферы. М., «Недра», 1966. 320 с.
- Соколов В. А. Геохимия природных газов. М., «Недра», 1971. 336 с.
- Справочник физических констант горных пород. Под ред. С. Кларка мл. Пер. с англ. М., «Мир», 1969. 544 с.
- Страхов Н. М. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М., Госгеолтехиздат, 1963. 536 с.
- Тейлер Р. Дж. Происхождение химических элементов. Пер. с англ. М., «Мир», 1975. 232 с.
- Термодинамика геохимических процессов. Под ред. В. В. Щербини. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960. 260 с.
- Тузаринов А. И. Общая геохимия. М., Атомиздат, 1973. 288 с.
- Успенский В. А. Введение в геохимию нефти. Л., «Недра», 1970. 312 с.
- Ферман А. Е. Избранные труды. Т. I—VI. М., Изд-во АН СССР, 1952—1959.
- Химия земной коры. М., «Наука», т. I, 1963, 432 с.; т. II, 1964, 664 с. (Тр. геохимической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В. И. Вернадского).
- Чердынцев В. В. Ядерная вулканология. М., «Наука», 1973. 208 с.
- Чухров Ф. В. Коллоиды в земной коре. М., Изд-во АН СССР, 1955. 679 с.
- Шуклоков Ю. А., Левский Л. К. Геохимия и космохимия изотопов благородных газов. М., Атомиздат, 1972. 336 с.
- Щербина В. В. Основы геохимии. М., «Недра», 1972. 296 с.
- Щербина У., Брилли Л. Аналитическая геохимия. Пер. с англ. Л., «Недра», 1975. 296 с.
- Advances in Organic Geochemistry*. Edited by B. Tissot and Binner. — «Proc. 6-th Int. Meeting on Organic Geochemistry». Ruel — Malmaison, France. Editions Technip. Pub. Paris, 1973, 670 p.
- Ahrens L. H. (Editor). *Origin and distribution of the elements*. Pergamon Press, Oxford, London, 1968. 700 p.
- Blatt H., Middleton G. V. and Murrey R. *Origin of Sedimentary Rocks*. Prentice — Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1972. 643 p.
- Brancazio P. J. and Cameron A. G. W. (Editors). *The Origin and Evolution of Atmospheres and Oceans*. J. Wiley, New York, 1964. 314 p.
- Brooks R. R. *Geobotany and Biogeochemistry in Mineral Exploration*. Harper-Row, 1973. 290 p.
- Brunfelt A. O. and Steinnes E. (Editors). *Activation Analysis in Geochemistry and Cosmochemistry*. Proceeding of the NATO Advances Study Institute, Kjeller, Norway, 1970. 468 p.
- Clarke F. W. *The Data of Geochemistry* (fifth edition) U. S. Geol. Surv. Bull. 770, 1924. 841 p.
- Craig H., Miller S. L., Wasserburg G. J. (Editors). *Isotopic and Cosmic Chemistry*. Dedicated to H. Urey on his birthday, Amsterdam, 1964. 553 p.
- Fairbridge R. W. (Editor). *The Encyclopedia of Geochemistry and Environmental Sciences*. Van Nostrand Reinhold Company. New York — Cincinnati — Toronto — London — Melbourne, 1972. 1322 p.
- Goldschmidt V. M. *Geochemistry* Oxford at the Clarendon Press, 1954. 730 p.
- Krauskopf K. B. *Introduction to Geochemistry*. Mac-Graw Hill Company, New York, 1967. 721 p.
- Levinson A. A. *Introduction to Exploration Geochemistry*. Applied Publishing, Ltd. Calgary, 1974. 611 p.

- Mason B. (Editor). Handbook of Elemental Abundances in Meteorites. v. 1 of series of extraterrestrial chemistry. Gordon and Breach. New York and London, 1971. 555 p.
- Polanski A. Geochemia Izotopow. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1961, 392 p.
- Polanski A., Smulikowski K. Geochemia. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1969, 663 p.
- Rankama K., Sahama Th. G. Geochemistry (2-nd impression). Chicago, 1952. 700 p.
- Riley J. P., and Skirrow G. (Editors). Chemical Oceanography. Academic Press, London, 1965, v. 1, 712 p., v. 11. 508 p.
- Rösler H. J. und Lange H. Geochemische Tabellen. VEB, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1975, 500 p.
- Smales A. A., Wager L. R. (Editors). Methods in Geochemistry. Interscience Publishing, New York — London, 1960. 400 c.
- Swain F. M. Non — Marine Organic Geochemistry. Cambridge, University Press, New York, 1971. 200 p.
- Urey H. The Planets their origin and Development. New—Haven, Yale Univ. Press, 1952. 246 p.
- Vinogradov A. P. Elementary chemical composition of marine organisms. New Haven, 1953. 210 p.
- Wedepohl K. H. (Executive Editors). Handbook of Geochemistry. Springer — Verlag, Berlin — Heidelberg — New York, v. 1, 1969, 442 p.; vol. II, 1970. 667 p.
- Wedepohl K. H. Geochemistry. Helt, Rinehart — Winston — New York, 1971. 231 p.

## Важнейшие физико-химические константы

Атомная единица массы а. е. м. —  $1/16$  массы изотопа кислорода  $^{16}\text{O}$ .  
 1 а. е. м. =  $1,66035 \cdot 10^{-24}$  г  
 Заряд электрона  $e^- = (4,80294 \pm 0,00008) \cdot 10^{-10}$  Кл  
 Масса покоя электрона  $m_e = (9,1086 \pm 0,0003) \cdot 10^{-28}$  г  
 Отношение заряда электрона к его массе покоя

$$\frac{e^-}{m_e} = (1,75888 \pm 0,00003) \cdot 10^7 \text{ Кл} \cdot \text{г}^{-1}$$

Масса протона  $m_p = (1,67248 \pm 0,00031) \cdot 10^{-24}$  г  
 Масса нейтрона  $m_n = (1,67470 \pm 0,00004) \cdot 10^{-24}$  г  
 Масса атома водорода  $m_H = (1,67339 \pm 0,00012) \cdot 10^{-24}$  г  
 Масса альфа-частицы  $m_\alpha = (6,64422 \pm 0,00012) \cdot 10^{-24}$  г  
 Отношение массы протона к массе электрона

$$m_p : m_e = 1836,13 \pm 0,02$$

Атомная масса протона  $1,0075957 \pm 0,000001$  а. е. м.  
 Атомная масса водорода  $1,0081445 \pm 0,000001$  а. е. м.  
 Отношение единицы физической и химической шкал атомных масс

$$16,00435 : 16 = 1,00027$$

Число молекул в  $1 \text{ см}^3$  при нормальных условиях (число Лошмидта)  
 2,68709 · 10<sup>19</sup>

Объем 1 грамм-молекулы при нормальных условиях  $22,4136 \pm 0,0030$  л  
 Энергия, соответствующая 1 эВ,  $(1,60256 \pm 0,00016) \cdot 10^{12}$  эрг  
 Энергия, соответствующая 1 МэВ,  $(1,60256 \pm 0,00016) \cdot 10^6$  эрг  
 Переводной множитель от 1 а. е. м. к 1 МэВ, 1 а. е. м. = 931,04 МэВ  
 Объем 1 кг чистой воды (4° С, 760 мм рт. ст.), 1 л = 1000,028 см<sup>3</sup>  
 Плотность ртути (0° С, 760 мм рт. ст.)  $13,59504 \pm 0,00006$  г/см<sup>3</sup>  
 1 стандартная атмосфера = 1 013 250 дин · см<sup>-2</sup>  
 1 мм рт. ст. = 1333,2237 дин · см<sup>-2</sup>  
 1 кал = 4,1855 ± 0,0004 Дж

Температура абсолютного нуля 0 К = -273,15° С

Значения основных физических постоянных в последнее время принимаются по рекомендации Ассамблеи Международного союза чистой и прикладной физики. Эти значения выбраны с учетом перехода на новую шкалу атомных масс  $\text{C}^{12} = 12$  (точно). Некоторые новые значения важнейших физических постоянных по новой шкале приводятся ниже\*.

Единица атомной массы  $n \cdot 1/12$  массы изотопа  $\text{C}^{12}$  (точно)  
 Скорость света в вакууме  $c$   $(2,997925 \pm 0,000003) \cdot 10^{10}$  см/с  
 Элементарный заряд  $e$   $(4,80298 \pm 0,00020) \cdot 10^{10}$  Кл  
 Постоянная Авогадро  $N_A$   $(6,02252 \pm 0,00028) \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>

Масса покоя электрона  $m_e$   $(5,48597 \pm 0,00009) \cdot 10^{-4}$  г

Константа Фарадея  $F$   $(9,64870 \pm 0,00016) \cdot 10^4$  Кл/моль

Постоянная Планка  $h$   $(6,6256 \pm 0,005) \cdot 10^{-27}$  эрг/с

Универсальная газовая постоянная  $R$  8,31434 Дж/(моль · градус)

Нормальный объем моля идеального газа  $V_0$   $(2,24136 \pm 0,00030) \cdot 10^4$  см<sup>3</sup> ×

× моль<sup>-1</sup>

Постоянная Больцмана  $k$   $(1,38054 \pm 0,00018) \cdot 10^{-16}$  эрг · градус<sup>-1</sup>

\* Термические константы веществ. Ред. В. И. Глушко. М., 1965 [Всероссийский ин-т научн. и техн. информ.].

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аварунит 67  
 Авгит 66, 67, 159  
 Авогадро постоянная 177  
 Адуляр 150  
 Азот 94, 107, 108, 162  
 Азурит 33, 38, 165  
 Айкинит 149, 171  
 Акаганеит 67  
 Актино-урановый ряд 119  
 Алабадин 35, 69  
 Алмаз 29, 67, 161  
 Алтаит 35, 168  
 Алунит 162, 163  
 Алюминий 94, 162  
 Альбит 34, 38, 67, 69, 154, 162  
 Альфа-распад 118  
 Амблигонит 154, 161  
 Амфибол 72, 150, 158  
 Анальцим 34, 162  
 Анатаз 31  
 Ангидрит 33, 37, 38, 39, 163, 164  
 Англезит 33, 39, 40, 170  
 Ангриты 65  
 Андалузит 33, 149, 163  
 Андезит 47, 76, 107  
 Анкармит 75  
 Аннабергит 165  
 Анортит 34, 38, 67, 69, 162  
 Анортозит 36, 74  
 Анортозит лунный 13, 71, 132  
 Антимонит 168  
 Антрацит 88  
 Апатит 57, 69, 70, 163  
 Аплит 77, 79  
 Арагонит 33, 39, 163  
 Аргентит 35, 40, 168  
 Аргиродит 160, 166  
 Аргон 94, 134  
 Аргоновый метод геохронологии 134, 135, 136—139  
 Аркантит 33  
 Аркозовый песчаник 82, 110  
 Армаколит 70  
 Арсенолит 30  
 Арсенопирит 149, 166  
 Асболян 150  
 Астраханит 67  
 Атмосфера 9, 61, 62, 105  
 Атмофильные элементы 145, 146, 147  
 Атомная единица массы 177  
 Атомные радиусы 17—18  
 Аурипигмент 37, 39, 40, 166  
 Ауростибнит 170  
 Ахондриты 65, 69, 70, 110, 133, 140  
 Ашарит 161  
  
 Бавенит 161  
 Бадделейт 31, 70, 167  
 Базальт 47, 75, 107, 132  
 Базальт лунный 13, 71, 132  
 Баланс водный Земли 10  
 Банакит 78, 79  
 Барий 97, 169  
 Барит 33, 37, 38, 149, 150, 156, 169  
 Баритокальцит 169  
 Барринджерит 67, 68  
 Бастнезит 169  
 Бацит 164  
 Бениюгоит 169  
 Берешит 79  
 Берилл 149, 161  
 Бериллий 94, 161  
 Берринит 32  
 Бертрандит 161  
 Бетафит 167  
 Биенит 30, 150, 162  
 Биенит 30  
 Биксбит 31  
 Бигит 159, 166  
 Биофильные элементы 145  
 Вирюза 165  
 Висмит 171  
 Витовнит 67  
 Вишюфит 162  
 благородные газы 145, 147  
 благородные металлы 147  
 Воксит 162  
 Больцмана постоянная 177  
 Борацит 161  
 Борнит 40, 67, 150, 165  
 Бостонит 78  
 Бравоит 67  
 Граннерит 159, 171  
 Браунит 150, 164  
 Вржезиннит 67, 68  
 Брианит 67, 68  
 Бриарит 166  
 Бром 95, 166  
 Бромаргирит 37  
 Бромелит 30  
 Бромирит 30, 166  
 Бронзит 66, 67  
 Брошантит 33  
 Брусит 31, 162  
 Брэггит 160  
 Бузенит 31  
 Бура 33, 161  
 Бурнонит 168  
 Бэта-распад 117  
  
 Вавелит 39, 67  
 Валентинит 31, 37, 39, 168  
 Валерит 67  
 Ванадий 95, 164  
 Ванадинит 164  
 Варисцит 156  
 Варулит 154  
 Васит 160, 165  
 Вейсит 40  
 Венера 15  
 Верилит 72, 73  
 Вермикулит 162  
 Вивьянит 164  
 Виллиамит 30  
 Виллемит 34, 165  
 Виоларит 67  
 Висмут 29, 36, 171  
 Висмутин 149, 160, 171  
 Витерит 33, 38, 39, 156, 169  
 Витлокит 67, 68, 70  
 Витчит 166  
 Вогезит 78  
 Водород 94, 103, 104—105, 161  
 Воды морские 57, 58, 59  
 — внутренние 85  
 — озерные 86, 87  
 — речные 86, 87  
 Волконскоит 164  
 Волластонит 33, 38, 67, 164  
 Вольфрам 98  
 Вольфрамит 149, 169  
 Вульфенит 157  
 Вюрцит 40, 67, 165  
 Вюстит 31, 67  
 Высоцит 167  
  
 Габбро 36, 47, 72, 73, 115  
 Габбро-анортозит лунный 13  
 Газовая постоянная 177  
 Гагаринит 167  
 Гадолий 97  
 Гадолянит 167

- Газы вулканические 89  
 Газы природные 172—173  
 Галенит 35, 38, 149, 150, 168, 170, 171  
 Галит 30, 37, 162, 163  
 Галлий 95, 165  
 Галлит 165  
 Галоиды 30  
 Галуазит 35  
 Гарцбургит 72  
 Гаусманит 31, 150, 164  
 Гафний 44, 98, 169  
 Гафния 31  
 Гафнон 169  
 Гейзерит 82  
 Гейкилит 32  
 Геоид 5  
 Геохронологическая шкала 141—143  
 Геохронология докембрия 141, 142  
 Гексаэдриты 66  
 Гелий 94, 161  
 Гельвин 161  
 Гематит 31, 39, 67, 149, 150, 164  
 Гентгельвин 161  
 Герватит 74  
 Германий 95, 166  
 Германин 166  
 Герцдорфит 165  
 Герценбергит 35, 168  
 Герцинит 32, 67, 168  
 Гессит 40  
 Гетерозит 156  
 Гетит 38, 67, 104  
 Гиббсит 30  
 Гидраргиллит 162  
 Гидроборацит 161  
 Гидроксилантит 67  
 Гидроникит 67  
 Гидросфера 10, 105  
 Гидроцинкит 165  
 Гиперстен 66, 67  
 Гипс 33, 39, 67, 164  
 Глаукоцит 165  
 Глет (красный) 31  
 Глина красная 84, 132  
 Глины (химический состав) 80, 81  
 Говардиты 66  
 Гольмий 98  
 Гортонолит 67  
 Горючие вещества 88  
 Гояцит 166  
 Гранат 149, 155, 156, 163  
 Гранит 36, 72, 73, 76, 110, 132, 141  
 Гранодиорит 36, 72, 73, 76, 115, 132  
 Графит 29, 67, 161  
 Графтонит 67  
 Гриналит 67  
 Гриноцит 34, 160  
 Грорудит 77  
 Гросуляр 67  
 Гутенберга раздел 7, 8  
 Гунтит 32  
 Данбурит 161  
 Датолит 161  
 Дацит 77  
 Дацит лунный 13  
 Дейтерий 94, 103, 104  
 Деклуазит 164  
 Дженджерит 67, 68  
 Диабаз 36, 72, 73, 74  
 Диаллагит 72  
 Диамагнитные элементы 146  
 Диаспор 30, 150, 162  
 Диатомит 82, 109, 110  
 Диксит 35  
 Диогениты 66  
 Диоксид 33, 38, 66, 67, 155  
 Диоптаз 165  
 Диорит 36, 47, 72, 73, 75, 115, 132  
 Диорит кварцевый 72, 73, 75, 76, 132  
 Дирфшерит 68  
 Диспрозий 98  
 Дистен 163  
 Добреелит 68  
 Доломит 32, 67, 83, 105, 110, 163  
 Долерит 36, 74, 75  
 Домейкит 40  
 Дрессина 88  
 Древнейшие минералы и породы (возраст) 141  
 Дрисдаллит 167  
 Дунит 36, 47, 72, 73, 107, 110, 115, 132  
 Дурбахит 78  
 Европий 97  
 Жадеит 33  
 Железо 70, 95, 164  
 Железо-α 29, 67  
 Железные руды (осадочные) 110  
 Живое вещество 60, 61, 105  
 Земля внутреннее тепло 11, 12  
 — масса 5, 15  
 — плотность 5, 6, 15  
 — состав 7, 8, 9  
 — строение 6, 7  
 — энергетический баланс 9—12  
 Зёнгерит 165  
 Зола (углей) 88  
 Золото 29, 36, 67, 99, 149, 150, 170  
 Известь 30  
 Известняки 80, 83, 105, 110  
 Изобары 91  
 Изоморфизм 150—153  
 Изоморфные ряды Вернадского 151  
 Изотопы (распространение) 91—102  
 Изотопы 91  
 Иксиолит 169  
 Ил известковый 84  
 Ил кремневый 84  
 Ильменит 32, 67, 70, 149, 164  
 Ильменорутил 159  
 Индит 168  
 Индий 168  
 Индерборнит 161  
 Иод 12, 97  
 Иодаргирит 168  
 Иодерит 30  
 Иодобромит 166  
 Ионные радиусы 18—21  
 Ирарсит 170  
 Иридий 98, 170  
 Исит 74  
 Итоит 166  
 Иттербий 98  
 Иттриалит 167  
 Иттрий 96, 167  
 Иттрофлюорит 159  
 Кадмий 96, 168  
 Кадмоселит 168  
 Каянит 39, 163  
 Калаверит 150  
 Каламин 165  
 Калифиллит 34, 38  
 Калий 11, 94, 163  
 Калаверит 170  
 Каломель 30, 37  
 Калькурмолит 171  
 Кальций 94  
 Кальцит 32, 38, 39, 67, 83, 150, 155, 156, 163  
 Камасит 66, 67, 68  
 Каолинит 34, 163  
 Карбонаты 106, 154, 155  
 Кардинит 170  
 Карлсберит 68  
 Карналлит 162, 163  
 Карнотит 164  
 Касситерит 31, 149, 168  
 Катаплет 167  
 Квасцы 154

Кварц 31, 37, 39, 67, 70, 72, 149, 150, 163  
Кератофир 77, 78, 79  
Кераргерит 30, 37  
Кермезит 168  
Керсантит 76  
Киазит 33  
Кизерит 39, 162  
Кимберлит 72  
Киноварь 35, 40, 150, 170  
Кислород 2, 9, 94, 108—111  
Клари 42  
Клаусталит 35, 166  
Клиноэстатит 33, 67  
Клокманнит 166  
Кобальт 95, 165  
Кобальтин 165  
Ковалентная связь 26  
Ковеллин 35, 39, 165  
Когенит 67, 69, 70  
Колеманит 161  
Колорадоит 170  
Колумбит 167  
Комендит 77  
Конкреции марганцевые 85  
Константа радиоактивного распада 117,  
121, 122, 135, 139  
**Координационное число (КЧ) 17, 18**  
Копепода 87  
Кордиерит 67  
Корунд 30, 37, 163  
Коффинит 171  
Косит 31  
Кремний 29, 94  
Кремнистые породы 82, 84  
Криолитионит 161  
Криолит 30, 162  
Криновит 67, 68  
Крисобалит 31, 39, 67, 70  
Криштон 95  
Крокоит 164  
Ксенон 97  
Ксенотим 159, 167  
Кубанит 67, 165  
Куперит 35, 170  
Куприт 31, 165  
Курчатовит 161  
Кюрит 171  
  
Лабрадор 67, 72  
Лантан 97, 169  
Лантанил 169  
Ларнит 34  
Лавриктит 78  
Латит 77, 78, 79  
Лауренсит 67, 68  
Лаурит 167  
Лаусонит 34  
Лейцит 34, 38, 162, 163  
Леллингит 166  
Леонардит 34  
Лепидокрокит 38, 67, 164  
Лепидолит 161, 166  
Лерцолит 73  
Лед 161, 162  
Ливингстонит 170  
Лигнит 88  
Лимонит 164  
Линнеит 165  
Липарит 77  
Литий 94, 161  
Литофильные элементы 145, 146, 147  
Ловенитомозандрит 157  
Лодраниты 66  
Лонсдейлит 67  
Лопарит 158  
Лорандит 170  
Луешит 167  
Луна 12—14, 15  
Людвигит 161  
Лютеций 98  
Люцерна 87

Маггемит 67  
Магматические месторождения 149  
Магнезиоферрит 32, 155  
Магнезиохромит 164  
Магнетит 32, 38, 67, 155, 162  
Магнетит 31, 39, 67, 72, 164  
Магний 94 162  
Макиноит 67  
Малахит 32, 38, 165  
Малаяит 168  
Маллордит 39  
Манганит 150, 164  
Манганозит 31  
Мантия Земли 6, 8, 9, 62  
Марганец 70, 95, 164  
Марганцевые конкреции 85  
Марказит 40  
Марс 15  
Маршит 168  
Маскелинит 67  
Массикот (желтый) 31  
Маршит 168  
Медь 29, 67, 70, 95, 165  
Меднонит 68  
Медистые породы 83, 84  
Мезосидериты 66, 69  
Меймчит 72  
Мел 83  
Мелантерит 38, 39  
Мелицит 67, 159  
Меренскит 167  
Мериллит 68  
Меркурий 15  
Меррихейт 67, 68  
Металдит 40  
Метапниннабарит 40  
Металлическая фаза 65  
Метеориты железные 65, 66, 115, 133, 140  
— железокремнистые 65, 66, 110, 115  
— каменные 65, 106  
Микролин 166  
Микролит 169  
Миллерит 35, 40, 165  
Миметезит 157  
Минетта 78  
Мирабилит 33, 40, 162  
Модельный возраст 131  
Молекулярная масса минералов 29—35  
Молекулярный объем минералов 29—35  
Молибден 37, 96, 167  
Молибденит 35, 37, 149, 167, 170  
Молибдит 31, 167  
Моллизит 37  
Монацит 130, 149, 169  
Монтичелит 34, 67  
Монтмориллонит 67  
Монтроядит 31, 170  
Мондонит 78, 115  
Мончетит 170  
Мохоровичича раздел 6  
Муссонит 67  
Мусковит 149, 159, 163, 166  
Мышьяк 29, 95, 166  
  
Нагиагит 170  
Найнинггерит 67, 68  
Наклиты 66  
Настуран 171  
Натрий 94, 162  
Натроярзит 154  
Науманит 40, 168  
Нашатырь 162  
Нейтрон 94  
Неодим 97  
Неон 94  
Непгун 15  
Непгунивый ряд 93, 120  
Непуит 165  
Нефелин 34, 38, 67, 162  
Нигерит 168  
Ниобий 96, 167  
Никелистое железо 66, 67, 69, 70

- Нивелин 165  
 Нивель 29, 95, 165  
 Нитрокалит 162, 163  
 Нордмаркит 78  
 Норит 13, 36, 74, 115  
 Норит лунный 13
- Обриты 66**  
 Обсидиан трахитовый 107  
 Объем идеального газа 177  
 Оддо — Гаркинса правило 42, 99  
 Одицит 74, 76  
 Океанит 75  
 Окислы 155, 157  
 Оксигальфильные элементы 147  
 Октаэдриты 66  
 Оливин 33, 66, 67, 69, 70, 72, 107, 149  
 Олигоклаз 67, 72  
 Олигонит 150  
 Олово 93, 96, 168  
 Ольдгамит 35, 67, 68  
 Опал 163  
 Опока 82  
 Ортит 130  
 Ортоклаз 34, 69, 72, 154, 156, 163  
 Осарцит 176  
 Осборнит 67, 68  
 Осмий 98, 170  
 Осмистый иридий 149  
 Оссидит 74  
 Отавит 32  
 Отенит 171
- Палладий 96, 167**  
 Палласиты 66  
 Пальгорскит 67, 162  
 Пандермит 164  
 Панетит 67, 68  
 Парагенезис элементов 142  
 Парамагнитные элементы 146  
 Патронит 164  
 Пегматит 149  
 Пелагические осадки 84  
 Пентландит 67, 149, 165  
 Перидотит 36, 72, 73, 115  
 Перит 67, 68  
 Периклаз 31, 37  
 Период полураспада 117  
 Перовскит 32, 67, 70, 158, 164  
 Песчаники 109, 110  
 Песталит 161  
 Петцит 170  
 Пижонит 67  
 Пикрит 72  
 Пираргирит 150, 168  
 Пирит 35, 39, 40, 67, 150, 160, 163  
 Пироксен 66, 69, 70, 149  
 Пироксенит 36, 115  
 Пироксферроит 70  
 Пирролизит 31, 150, 164  
 Пироморфит 157  
 Пиррофиллит 163  
 Пиррохлор 149, 159, 167  
 Пиррохромит 32  
 Пирротин 37, 40, 67, 149  
 Пирсит 160  
 Плаггиоклаз 158  
 Планеты 15  
 Планка постоянная 177  
 Платина 29, 98, 149, 170  
 Плотность горных пород 36  
 — Земли 6  
 — Луны 15  
 — планет 15  
 — Солнца 14  
 Плутон 15  
 Повеллит 157, 167  
 Полевой шпат 67, 70, 158  
 Полибазит 160  
 Полигалит 38, 163  
 Полидимит 165  
 Полуцит 169
- Портландит 30  
 Постмагматические месторождения 149  
 Потенциалы ионизации 22—24  
 Почва 60, 61  
 Празеодим 97  
 Проверсит 78  
 Прометий 97  
 Протий 103, 104  
 Прустит 150, 168  
 Псиломелан 150, 164  
 Пуласкит 78  
 Пуршурит 156  
 Пэзанит 77
- Раббит 67  
 Рагинит 170  
 Радий 119  
 Радиоактивные ряды 93, 118, 119, 120  
 Радиолярит 82, 109  
 Радиусы атомные 17—18  
 Радиусы ионные 18—21  
 Рамзанит 164  
 Раммельсбергит 165  
 Распространенность элементов в гидросфере 56, 57, 58  
 — — горных породах 47, 48, 49, 50, 52, 53, 54  
 — — земной коре 44, 45, 46  
 — — лунных породах 51, 55, 56  
 — — метеоритах 47, 48, 49, 50  
 — — солнечной системе 42, 43, 99  
 Растения 60, 61, 87  
 Реальгар 37, 39, 40, 166  
 Реголит лунный 71  
 Реддерит 67  
 Редкоземельные элементы 42  
 Резерфордит 171  
 Реки (состав вод) 86, 87  
 Рений 44, 98  
 Ривезит 67  
 Рингвудит 67, 68  
 Риолит 77, 107  
 Роговая обманка 159  
 Роддерит 68  
 Родий 66, 167  
 Родицит 169  
 Родонит 33, 150, 164  
 Родохрозит 33, 38, 150, 155, 164  
 Рокезит 168  
 Ромбенпорфир 78, 79  
 Руть 99, 170  
 Рубидий 95  
 Рутений 96, 167  
 Рутил 31, 67, 70, 150, 159, 164
- Сакаловит 75  
 Сакураит 168  
 Самарий 97  
 Самарскит 159, 167, 171  
 Саркозид 67  
 Сассолит 161  
 Сатурн 15  
 Сахат 161  
 Сашит 30  
 Свинец 29, 36, 99, 170  
 Свинцовый метод геохронологии 121—134  
 Свободная энергия образования минералов 29—35  
 Седиментофильные элементы 147  
 Сейсмические волны 6, 7  
 Селайт 30  
 Селен 29, 95, 166  
 Селитра 33, 37, 162  
 Сера (изотопный состав) 111—115  
 Сера- $\alpha$  29, 67, 163  
 Сера- $\beta$  29  
 Сера (газ) 29, 35, 36  
 Серидит 149  
 Серная кислота 33  
 Сернистые газы 31  
 Серебро 29, 36, 96, 150, 168  
 Серпентин 67, 162

- Сода 162  
 Сидерит 32, 38, 67 150, 156, 164  
 Сидерофильные элементы 145, 146, 147  
 Сидерофиты 66  
 Сиенит 36, 72, 73, 78, 115  
 Силикаты 157  
 Силикатная фаза метеоритов 65  
 Силлиманит 33, 163  
 Сильванит 170  
 Сильвсбергит 78  
 Сильвин 30, 37, 163  
 Симсонит 169  
 Синоит 67, 68  
 Скандий 94, 164  
 Скаполит 158  
 Скородит 164, 166  
 Скорость света 117  
 Скуттерудит 160  
 Слюда 149, 158  
 Смальтин 165  
 Смитсонит 33, 38, 165  
 Содалит 67  
 Солнце 14  
 Соляная кислота (газ) 30  
 Спериллит 170  
 Спесартит 76  
 Спидит 75  
 Сподумен 149, 154, 161  
 Спонголит 82  
 Сродство к электрону 26  
 Станнин 168  
 Станноидит 168  
 Станфильдит 67, 68  
 Стекло гранитное 36  
 Стекло сиенитовое 36  
 Стекло тоналитовое 36  
 Стекло долеритовое 36  
 Стефанит 168  
 Стибионалладит 167  
 Стибиокондит 168  
 Стибнит 37  
 Стилвеллит 169  
 Стоттит 166  
 Стренгит 32  
 Стронций 95, 166  
 Стронцианит 33, 38, 156, 166  
 Стронциевый метод геохронологии 135, 139  
 Суанит 161  
 Сульванит 164  
 Сульфаты 112, 154, 155  
 Сульфидная фаза метеоритов 65  
 Сульфохалькофильные элементы 147  
 Сульфиды 67, 112  
 Сурик 170  
 Сурьма 29, 96  
 Суссекит 79  
 Сфалерит 35, 40, 67, 149, 150, 160, 165  
 Сфероид Бесселя 5  
 Сфероид Красовского 5  
 Сфероид Хейфорда 5
- Таленит 167  
 Таллий 99  
 Тальк 34, 162  
 Тантал 98, 169  
 Танталит 169  
 Теллур 29, 97, 168  
 Теллурид 31, 168  
 Теллуробисмутит 168  
 Температура плавления 27, 28, 36, 37, 38  
 — разложения природных соединений 38  
 — фазовых превращений 39  
 Тенардит 33, 162, 163  
 Тенорит 31, 34, 165  
 Тепловой поток Земли 10, 11  
 — — Луны 14  
 Теплота образования минералов 29—35  
 Тербий 98  
 Термические свойства элементов 26—28  
 Термодинамические свойства минералов 28, 29—35  
 Тетрадимит 168, 171
- Тетраэдрит 160  
 Технеций 96  
 Тиманит 170  
 Тингуаит 79  
 Титан 70 94, 164  
 Титанит 164  
 Топаз 149, 163  
 Торбастнезит 171  
 Торбернит 171  
 Торинанит 31, 129, 171  
 Ториевый ряд 120  
 Торий 11, 12, 99, 171  
 Торит 171  
 Торнебоминт 169  
 Тортвейтит 156, 164  
 Торф 88  
 Транквилитит 70  
 Трапшковые формации 74, 132  
 Трахиандезит 78, 79  
 Трахит 78, 79, 107  
 Треворит 32  
 Тремолит 33  
 Трепел 82  
 Тридимит 31, 39, 67, 70  
 Тритий 94  
 Трифицит 154  
 Троицит 35, 37, 65, 67, 69, 70, 112  
 Трондьемит 76  
 Тулий 98  
 Тунгстенит 35, 169  
 Турмалин 158  
 Тэниг 66, 67  
 Тюлмуонит 164, 171  
 Тылаит 74
- Угарный газ (идеальный газ) 30  
 Углекислота (идеальный газ) 30  
 Углерод 94, 105—107, 161  
 Уголь 83, 105, 106, 161  
 Уиллемсеит 165  
 Улексит 161  
 Ульвошинель 32, 70  
 Ульманит 160  
 Умангит 166  
 Умохоит 171  
 Умштектит 78  
 Уран (планета) 15  
 Уран (элемент) 11, 42, 99, 171  
 Уранинит 31, 130, 171  
 Урановый ряд 93, 118  
 Уреилиты 65  
 Уранофан 170  
 Ускорение силы тяжести 6
- Фарадея константа 117  
 Фаррингтонит 67, 68  
 Фаялит 34, 38, 67  
 Фенакит 34, 161  
 Фергусонит 157, 167  
 Ферсмана классификация 145, 148  
 Ферсмит 158  
 Ферриттунгстент 169  
 Ферромагнитные вещества 146  
 Ферросилит 35  
 Флюгопит 34, 162  
 Флюорит 30, 37, 149, 162, 163  
 Форманит 169  
 Форстерит 34, 38, 67, 162  
 Фосгенит 170  
 Фосфор 94, 163  
 Фосфаты 155  
 Фосфорит 163  
 Франкеит 168  
 Фтор 94  
 Фторапатит 32, 37  
 Фторфлюгопит 34  
 Фурмарьерит 171
- Хайдеит 68  
 Халцедон 150, 163  
 Халькантит 33, 39, 165  
 Халькозин 35, 37, 40, 165

- Халькопирит 40, 67, 149, 150, 165  
Халькофильные элементы 145, 146  
Хатчинсонит 170  
Хатчит 170  
Хизлевудит 67  
Хлор 29, 94  
Хлорапатит 37, 67  
Хлормагнезит 30  
Холлингурсит 167  
Хондриты 47, 48, 49, 50, 65, 110, 133, 140  
Хондриты обычные 66, 67, 69  
— углистые 66, 67, 69, 110, 133  
— анстатитовые 66, 67, 69  
Хром 70, 95, 164  
Хромит 32, 67, 69, 70, 149, 164  
Хэксонит 68
- Цезий 97, 169  
Цезиокуплетскит 169  
Цейнерит 171  
Целестин 33, 37, 156, 166  
Цеоциты 158  
Церий 97, 169  
Церит 169  
Церуссит 33, 170  
Циклические элементы 147  
Цинк 29, 95, 165  
Цинкит 31, 165  
Цинковит 33, 39  
Цирианит 31  
Циркон 34, 67, 70, 129, 130, 141, 157, 159, 167  
Цирконий 70, 96, 167
- Чарнокит 141  
Человек (состав тела) 87  
Черчит 167
- Шамозит 67, 150, 164  
Шассиньиты 66  
Шеелит 149, 157, 169
- Шпинель 32, 67, 70, 162, 163  
Шрейберзит 67, 68, 69, 70  
Штиллеит 166  
Штрентгит 156  
Штроммейнит 40
- Эвдиалит 157, 167  
Эвкайрит 40  
Эвкрипит 161  
Эвкрит 158, 159  
Эвксенит 158, 159  
Эканит 171  
Эклогит 36, 72  
Электрон (свойства) 177  
Электронные оболочки 17  
Электроотрицательность 25, 26  
Электрум 150  
Эльпидит 167  
Энарцит 165  
Энстатит 38, 67, 155  
Энтропия минералов 29—35  
Эпидидимит 161  
Эпидот 156, 158  
Эпсомит 33, 39, 67, 162  
Эрбий 98  
Эритрин 165  
Эрлихманит 170  
Эсколант 31
- Юпитер 15  
Юритт 67, 68
- Яггит 67, 88  
Ядро Земли внешнее 7, 8, 9  
— — внутреннее 7, 9  
— — свойства 7, 8, 9  
Ядерная геохронология 117—144  
Якобсит 155, 164  
Ярозит 67, 154, 164  
Яшма 82

# О Г Л А В Л Е Н И Е

|  |           |  |            |
|--|-----------|--|------------|
| Предисловие ко второму изданию . . . . .                                       | 3         | Средний химический состав литосферы Земли . . . . .  | 63         |
| Предисловие к первому изданию . . . . .  | 4         | Список литературы . . . . .  | 63         |
| <b>Г л а в а I. Общие сведения о Земле</b>                                     | <b>5</b>  | <b>Г л а в а IV. Химический состав горных пород и других природных образований . . . . .</b> | <b>65</b>  |
| Размеры Земли . . . . .  | 5         | Химический и минеральный состав метеоритов . . . . .   | 65         |
| Основные свойства Земли и внутреннее строение . . . . .                        | 5         | Химический состав лунных пород   | 70         |
| Энергетический баланс и внутреннее тепло Земли . . . . .                       | 9         | Состав изверженных горных пород  | 71         |
| Средний химический состав Земли в целом . . . . .                              | 12        | Химический состав осадочных горных пород . . . . .   | 79         |
| Луна . . . . .   | 12        | Химический состав природных вод  | 84         |
| Солнце . . . . .   | 14        | Состав некоторых организмов, горючих веществ и вулканических газов . . . . .                 | 87         |
| Сравнительная характеристика планет солнечной системы . . . . .                | 15        | Список литературы . . . . .  | 89         |
| Происхождение Земли и планет   | 15        | <b>Г л а в а V. Изотопы в геохимии</b>   | <b>91</b>  |
| Список литературы . . . . .  | 16        | Основные закономерности распространения изотопов . . . . .                                   | 91         |
| <b>Г л а в а II. Некоторые свойства элементов, минералов и горных пород</b>    | <b>17</b> | Процессы разделения изотопов в природных условиях . . . . .                                  | 102        |
| Распределение электронов в атомах элементов . . . . .                          | 17        | Изотопы водорода . . . . .   | 104        |
| Атомные радиусы элементов . . . . .  | 17        | Изотопы углерода . . . . .   | 105        |
| Ионные радиусы элементов . . . . .   | 18        | Изотопы азота . . . . .  | 107        |
| Потенциалы ионизации атомов и ионов . . . . .                                  | 18        | Изотопы кислорода . . . . .  | 108        |
| Электроотрицательность элементов   | 25        | Изотопы серы . . . . .   | 111        |
| Некоторые термические свойства элементов . . . . .                             | 26        | Список литературы . . . . .  | 116        |
| Термодинамические свойства минералов . . . . .                                 | 28        | <b>Г л а в а VI. Ядерная геохронология</b>   | <b>117</b> |
| Плотность горных пород . . . . .   | 28        | Вводные замечания . . . . .  | 117        |
| Температура плавления минералов  | 28        | Свинцовый метод . . . . .  | 121        |
| Температура разложения природных соединений . . . . .                          | 41        | Вычисление возраста по изотопному составу обычного свинца                                    | 130        |
| Температура фазовых превращений . . . . .                                      | 41        | Аргонный метод . . . . .   | 134        |
| Список литературы . . . . .  | 41        | Стронциевый метод . . . . .  | 135        |
| <b>Г л а в а III. Распространенность химических элементов</b>                  | <b>42</b> | Возраст метеоритов . . . . .   | 140        |
| Вводные замечания . . . . .  | 42        | Возраст Земли . . . . .  | 140        |
| Атомные распространенности химических элементов . . . . .                      | 42        | Геохронологическая шкала . . . . .   | 141        |
| Средние содержания химических элементов в земной коре . . . . .                | 44        | Список литературы . . . . .  | 143        |
| Средние содержания химических элементов в главных типах горных пород . . . . . | 44        | <b>Г л а в а VII. Геохимические особенности нахождения элементов</b>                         | <b>145</b> |
| Распространенность элементов в горных породах земной коры . . . . .            | 51        | Геохимические классификации элементов . . . . .  | 145        |
| Распространенность элементов в горных породах Луны . . . . .                   | 51        | Парагенетические ассоциации минералов и элементов . . . . .                                  | 148        |
| Распространенность элементов в гидросфере . . . . .                            | 51        | Изоморфизм . . . . .   | 150        |
| Распространенность элементов в живом веществе . . . . .                        | 60        | Используемые минералы . . . . .  | 153        |
| Состав атмосферы Земли . . . . .   | 61        | Природные газы . . . . .   | 153        |
|  |           | Список литературы . . . . .  | 174        |
|  |           | Основные учебные пособия, монографии и справочные издания по геохимии . . . . .              | 174        |
|  |           | <b>П р и л о ж е н и е</b> Важнейшие физико-химические константы                             | 177        |
|  |           | Предметный указатель . . . . .   | 178        |

ИБ № 1901

**Георгий Витольдович Войткевич, Анатолий Ефимович Мирошников, Александр Сергеевич Цоваренных, Владимир Георгиевич Прохоров**

**КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК ПО ГЕОХИМИИ**

*Издание второе, переработанное и дополненное*

Редактор издательства Л. Н. Федорова  
Переплет художника В. В. Силваева  
Художественный редактор В. В. Евдокимов

Технические редакторы В. В. Соколова,  
А. В. Трофимов  
Корректор С. С. Борисова

Сдано в набор 18/II 1977 г. Подписано в печать 17/VI 1977 г. Т-12706.  
Формат 60 × 90<sup>1/16</sup>. Бумага № 1. Печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 19,73. Тираж 17800 экз.  
Заказ 35/5876—2. Цена 1 р. 40 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19  
Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
196006, Ленинград, Московский пр., 91.

Периодическая система элементов Д. И. Менделеева

|   | I                | II              | III              | IV              | V                | VI              | VII             | VIII                                   |                 |                  |                 |
|---|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|--|-----------------|------------------|-----------------|
| 1 |                  |                 |                  |                 |                  |                 | 1 H<br>1,00797  | 2 He<br>4,0026                         |                 |                  |                 |
| 2 | 3 Li<br>6,939    | 4 Be<br>9,0122  | 5 B<br>10,811    | 6 C<br>12,01115 | 7 N<br>14,0067   | 8 O<br>15,9994  | 9 F<br>18,9984  | 10 Ne<br>20,183                        |                 |                  |                 |
| 3 | 11 Na<br>22,9898 | 12 Mg<br>24,312 | 13 Al<br>26,9815 | 14 Si<br>28,086 | 15 P<br>30,9738  | 16 S<br>32,064  | 17 Cl<br>35,453 | 18 Ar<br>39,948                        |                 |                  |                 |
| 4 | 19 K<br>39,102   | 20 Ca<br>40,08  | 21 Sc<br>44,956  | 22 Ti<br>47,90  | 23 V<br>50,942   | 24 Cr<br>51,996 | 25 Mn<br>54,938 | Триады<br>переходных<br>элементов<br>→ | 26 Fe<br>55,847 | 27 Co<br>58,9332 | 28 Ni<br>58,71  |
|   | 29 Cu<br>63,54   | 30 Zn<br>65,37  | 31 Ga<br>69,72   | 32 Ge<br>72,59  | 33 As<br>74,9216 | 34 Se<br>78,96  | 35 Br<br>79,909 | 36 Kr<br>83,80                         |                 |                  |                 |
| 5 | 37 Rb<br>85,47   | 38 Sr<br>87,62  | 39 Y<br>88,905   | 40 Zr<br>91,22  | 41 Nb<br>92,906  | 42 Mo<br>95,94  | 43 Tc<br>(99)   | Триады<br>переходных<br>элементов<br>→ | 44 Ru<br>101,07 | 45 Rh<br>102,905 | 46 Pd<br>106,4  |
|   | 47 Ag<br>107,87  | 48 Cd<br>112,4  | 49 In<br>114,83  | 50 Sn<br>118,69 | 51 Sb<br>121,75  | 52 Te<br>127,6  | 53 I<br>126,9   | 54 Xe<br>131,30                        |                 |                  |                 |
| 6 | 55 Cs<br>132,905 | 56 Ba<br>137,34 | 57 La<br>138,91  | 72 Hf<br>178,49 | 73 Ta<br>180,948 | 74 W<br>183,85  | 75 Re<br>186,2  | Триады<br>переходных<br>элементов<br>→ | 76 Os<br>190,2  | 77 Ir<br>192,2   | 78 Pt<br>195,09 |
|   | 79 Au<br>196,967 | 80 Hg<br>200,59 | 81 Tl<br>204,37  | 82 Pb<br>207,19 | 83 Bi<br>208,98  | 84 Po<br>(210)  | 85 At<br>(210)  | 86 Rn<br>(222)                         |                 |                  |                 |
| 7 | 87 Fr<br>(223)   | 88 Ra<br>(226)  | 80 Ac<br>(227)   | 104 Ku<br>(261) |                  |                 |                 |  |                 |                  |                 |

Лантаноиды

|                 |                  |                 |                |                 |                 |                 |                  |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 58 Ce<br>140,12 | 59 Pr<br>140,907 | 60 Nd<br>144,24 | 61 Pm<br>(147) | 62 Sm<br>150,35 | 63 Eu<br>151,25 | 64 Gd<br>157,25 | 65 Tb<br>158,924 | 66 Dy<br>162,50 | 67 Ho<br>164,93 | 68 Er<br>167,26 | 69 Tm<br>168,93 | 70 Yb<br>173,04 | 71 Lu<br>174,97 |
|-----------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|

Актиноиды

|                  |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                   |                   |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| 90 Th<br>232,038 | 91 Pa<br>(231) | 92 U<br>238,03 | 93 Np<br>(237) | 94 Pu<br>(242) | 95 Am<br>(243) | 96 Cm<br>(247) | 97 Bk<br>(247) | 98 Cf<br>(249) | 99 Es<br>(254) | 100 Fm<br>(253) | 101 Md<br>(256) | 102 (No)<br>(256) | 103 (Lr)<br>(257) |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|

2067

МЕДРА