Фр. Берч
Дж. Шерер и Г. Спайсер

СПРАВОЧНИК ДЛЯ ГЕОЛОГОВ ПО ФИЗИЧЕСКИМ КОНСТАНТАМ

И * Л

Издательство

иностранной

литературы

*

GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA

HANDBOOK
OF
PHYSICAL CONSTANTS

Edited by

FRANCIS BIRCH, *Chairman*

J. F. SCHAIRER

H. CECIL SPICER

1942

550:53(039)
Б—48

Ф.Р. БЕРЧ, ДЖ. ШЕРЕР и Г. СПАЙСЕР

СПРАВОЧНИК
ДЛЯ ГЕОЛОГОВ ПО ФИЗИЧЕСКИМ КОНСТАНТАМ

2598
2598

Перевод с английского
С. В. РЕНЦ
под редакцией
чл.-корр. АН СССР А. П. ВИНОГРАДОВА

1949
ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Не может быть двух мнений о том, что успехи, достигнутые в разрешении наиболее сложных геологических проблем, связанных с вопросами строения земной коры, диференциации магмы, метаморфизма пород и многих других, зависят, в частности, от полноты и точности наших знаний физических свойств горных пород, стекол, минералов... Различной точности данные по физическим свойствам горных пород и минералов разбросаны в многочисленных журнальных статьях.

В зарубежных странах неоднократно делались попытки систематизировать эти данные при составлении справочников по физическим константам или при составлении научно-технических энциклопедий. Сборник «Handbook of Physical Constants», составленный под редакцией Francis Birch, J. F. Schairer, H. C. Spicer и названный нами в русском переводе «Справочник для геологов по физическим константам», представляет собой пока что наиболее полную сводку, сконцентрировавшую в одном издании многочисленные, в большинстве случаев критически отобранные данные по физическим константам пород и минералов. В этом отношении книга, несомненно, заслуживает внимание советских читателей.

Сборник содержит сведенные в таблицы многочисленные константы по плотности, внутреннему трению, вязкости и т. д. при разных температурах и давлениях; механические константы по прочности, пластичности и др., также при разных температурах и давлениях; температуры плавления, теплоемкости, растворимости; магнитные, электрические и многие другие свойства для горных пород, стекол и минералов.

При отборе данных авторы стремились наиболее полно использовать материалы, содержащие новейшие данные, полученные при применении более совершенной методики, а целый ряд более ранних и, как правило, менее точных данных не был использован при составлении настоящего сборника. Особое внимание было уделено физическим и физико-химическим константам для горных пород, стекол и минералов, полученным при высоких температурах и давлениях.

Приведенные данные обычно сопровождаются кратким определением понятия и описанием метода получения числовых значений. Мы считаем уместным обратить здесь внимание читателей на значение не только данных, но и методов, какими эти данные были получены. Без надлежащего рассмотрения ряда методов и указанных пределов геологическая интерпретация соответствующих данных может оказаться недостаточно глубокой. Авторы сами отмечают трудности, с которыми они встретились при составлении сборника констант, особенно при их критическом отборе, и признают несовершенство своего издания.

Несомненно, в настоящее время со стороны геологического знания возникает необходимость более точного определения многих физических констант для пород и минералов.

По установившемуся на Западе и в США обыкновению, в книге «Справочник для геологов по физическим константам» работы советских авторов, за несколькими исключениями, не приведены.

Между тем, в результате грандиозного социалистического строительства в нашей стране развернулась огромная научно-исследовательская работа по геологии, геофизике, геохимии, технике; накопилось значительное число исследований по физическим свойствам горных пород и минералов, к сожалению, опубликованных лишь частично.

Достаточно напомнить исследования по физическим свойствам пород, произведенные рядом учреждений при постройке Днепрогэса, при строительстве Большой Волги, многочисленные работы в этом направлении в Донбассе (термический градиент, механические свойства и т. п.), при обширных разведках на нефть (скорость волн) и т. д. Следует пожелать, чтобы все эти обширные данные по механическим, тепловым, сейсмическим и многим другим физическим свойствам для различных горных пород были систематизированы, отобраны критически и сделались доступными широким кругам геологов, геофизиков, геохимиков.

С другой стороны, ряд научных институтов в СССР систематически вел исследования по физическим константам горных пород.

В Институте геологических наук АН СССР эти работы возникли еще по инициативе акад. Ф. Ю. Левинсона-Лессинга, а именно: работы по вязкости, температурам плавления, механическим, магнитным и электрическим свойствам пород и минералов. Работы М. П. Воларовича с сотрудниками и Б. В. Залесского частично были опубликованы (см., напр., Труды Института геологических наук № 58, 1948). По инициативе акад. Н. С. Курнакова в Институте общей и неорганической химии АН СССР его сотрудниками и учениками были получены многочисленные точные константы температур плавления, вязкости и других свойств для расплавов природных солей, из смесей и систем растворов, которые также лишь частично опубликованы в изданиях Института общей и неорганической химии. Изучение механических и других свойств горных пород велось во Всесоюзном институте минерального сырья и в других институтах.

Более систематически у нас собирались химические анализы пород. Был издан первый «Сборник анализов русских изверженных и метаморфических горных пород», составленный З. Н. Немовой, и второй «Сборник анализов изверженных и метаморфических горных пород СССР», составленный Э. А. Струве. В настоящее время подготавливаются сборники химических анализов пород Грузии, Урала и Казахстана. Определение возраста пород по радиоактивным методам возникло у нас в стране по инициативе покойного акад. В. И. Вернадского, вице-председателя Международной комиссии по определению возраста пород.

Поскольку в главе I настоящего справочника, содержащей сведенные в таблицы данные о химическом составе некоторых типов горных пород и метеоритов отсутствуют современные данные о среднем химическом составе земной коры, считаем уместным привести здесь составленную нами таблицу кларков литосферы. Приводимые данные относятся к литосфере (без гидросферы и атмосферы), к 16 км мощности. Данные для обычных химических элементов, а именно: O, Si, Al, Na,

Fe, Ca, Mg, K, S, приводятся по сводке Кларка и Вашингтона с несущественными поправками. Для большинства остальных химических элементов нами взяты наиболее достоверные современные данные, полученные исследователями на основе многочисленных и хороших определений либо смесей горных пород, либо серий разных пород определенного типа. В последнем случае приближенное среднее значение можно было рассчитать, принимая, что литосфера 100% = 70% гранитов + 30% базальтов. Числа, помещенные в скобках, рассчитаны были нами из разнородных данных и требуют проверки. При расположении данных в порядке их значений (% атомов) были приняты во внимание и экспериментальные данные, которые хотя и не давали абсолютных значений, но указывали на соотношение между отдельными близкими парами химических элементов в породах и литосфере. Поэтому порядок расположения в таблице и вероятные соотношения между близкими химическими элементами, например, $^{Ca}/_{Sr}$, $^{K}/_{Rb}$, $^{Cl}/_{Br}$, $^{Zr}/_{Hf}$, $^{Ni}/_{Co}$, $^{Nb}/_{Ta}$, $^{Th}/_{U}$ и др., которые легко могут быть получены из табличных данных, могут представить известный интерес для читателя.

Элемент	В % атомов	В весовых %	Элемент	В % атомов	В весовых %
O	58,0	47,2	Be	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$
H	(3,0)	(0,15)	Sn	$7{,}0 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Si	20,0	27,6	Y	$6 \cdot 10^{-4}$	$2{,}8 \cdot 10^{-3}$
Al	6,6	8,80	Ce	$6 \cdot 10^{-4}$	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$
Na	2,4	2,64	B	$6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Fe	2,0	5,10	Ga	$4 \cdot 10^{-4}$	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$
Ca	2,0	3,6	Nd	$3{,}5 \cdot 10^{-4}$	$2{,}5 \cdot 10^{-3}$
Mg	2,0	2,10	La	$2{,}5 \cdot 10^{-4}$	$1{,}8 \cdot 10^{-3}$
K	1,4	2,60	Sc	$3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$
Ti	$2{,}5 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	Ge	$2 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
C	$(1{,}5 \cdot 10^{-1})$	$(1 \cdot 10^{-1})$	Nb	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
P	$5{,}0 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	Pb	$1{,}6 \cdot 10^{-4}$	$1{,}6 \cdot 10^{-3}$
N	$(2{,}5 \cdot 10^{-2})$	$(1 \cdot 10^{-2})$	As	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Mn	$3{,}2 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	Gd	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
S	$3{,}0 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	Cs	$9{,}5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$
F	$2{,}8 \cdot 10^{-2}$	$2{,}7 \cdot 10^{-2}$	Pr	$9 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Cl	$2{,}6 \cdot 10^{-2}$	$4{,}5 \cdot 10^{-2}$	Sm	$9{,}0 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Li	$1{,}9 \cdot 10^{-2}$	$6{,}5 \cdot 10^{-3}$	Mo	$6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Ba	$5{,}7 \cdot 10^{-3}$	$5{,}0 \cdot 10^{-2}$	Th	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Sr	$1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	Hf	$5 \cdot 10^{-5}$	$3{,}2 \cdot 10^{-4}$
Cr	$8{,}0 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	Dy	$5 \cdot 10^{-5}$	$4{,}5 \cdot 10^{-4}$
V	$6{,}0 \cdot 10^{-3}$	$1{,}5 \cdot 10^{-2}$	Er	$5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Rb	$7 \cdot 10^{-3}$	$3{,}1 \cdot 10^{-2}$	Br	$4 \cdot 10^{-5}$	$1{,}6 \cdot 10^{-4}$
Zr	$4{,}0 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	Yb	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Ni	$3{,}2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	Ta	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Cu	$3{,}6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	U	$2 \cdot 10^{-5}$	$3{,}0 \cdot 10^{-4}$
Zn	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	Eu	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$
Co	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	Ho	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$

Элемент	В % атомов	В весовых %	Элемент	В % атомов	В весовых %
W	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	Re	$8{,}5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Se	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	Jr	$8{,}5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Lu	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	Pa	$(8 \cdot 10^{-12})$	$(1{,}0 \cdot 10^{-10})$
Tb	$1 \cdot 10^{-5}$	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$	Ra	$9{,}0 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-10}$
Tl	$(3 \cdot 10^{-5})$	$(3 \cdot 10^{-4})$	Ac	$(5 \cdot 10^{-15})$	$(6 \cdot 10^{-14})$
Tu	$8 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-5}$	Po	$(2 \cdot 10^{-15})$	$(2 \cdot 10^{-14})$
Cd	$(7{,}6 \cdot 10^{-6})$	$(5 \cdot 10^{-5})$	Pu	$7 \cdot 10^{-17}$	$1 \cdot 10^{-15}$
Sb	$(5{,}0 \cdot 10^{-6})$	$(4 \cdot 10^{-5})$	Rn	$(5 \cdot 10^{-17})$	$(7 \cdot 10^{-16})$
J	$4{,}0 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$	Ma		
Bi	$(1{,}7 \cdot 10^{-6})$	$(2 \cdot 10^{-5})$	61		
Ag	$1{,}6 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	85		
In	$(1{,}5 \cdot 10^{-6})$	$(1 \cdot 10^{-5})$	87		
Hg	$7 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-6}$	Cm		
Os	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$	Am	Количественные определения не надежны	
Pd	$1{,}6 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	He		
Te	$(1{,}3 \cdot 10^{-7})$	$(1 \cdot 10^{-6})$	Ar		
Ru	$(1 \cdot 10^{-7})$	$(5 \cdot 10^{-7})$	Ne		
Pt	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-7}$	Kr		
Au	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-7}$	Xe		
Rh	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$			

Книгу Берча, Шерера и Спайсера «Справочник для геологов по физическим константам» можно рекомендовать геологам, физикам, геофизикам и геохимикам, которые смогут найти в ней многие нужные сведения.

А. П. Виноградов.

ПРЕДИСЛОВИЕ СОСТАВИТЕЛЕЙ

Собранные здесь таблицы появились в результате решения Межсекционного комитета сопредельных областей знания Национального исследовательского совета (Interdivisional Borderlands Committee of the National Research Council). В связи с этим был утвержден административный комитет, членами которого были д-р Френсис Берч, председатель, представляющий Отделение физических наук, д-р Дж. Ф. Шерер, представляющий Отделение геологии и географии, и д-р Г. Г. Виллард, представляющий Отделение химии и химической технологии. Этот комитет обсудил вопросы тематики, содержания, организации дел и предполагаемого личного состава и сам создал издательский комитет для сбора и приведения в порядок намеченных данных.

Содержание, предложенное для этих таблиц, очевидно, никогда до этого специально не подбиралось, и потому возникла необходимость сначала определить объем этой новой работы. Было также очевидно, что в ряде тем, очень интересных для геологов, заметно недоставало надежных количественных данных, в других же имелась масса сведений, еще не включенных в стандартные таблицы физических констант. Толкование термина «геологические материалы» может быть широким и узким; объем добавочного материала, как, например, таблицы пересчета, число таблиц и т. д., может быть различным. Некоторым руководством могли служить многочисленные полезные таблицы, уже имеющиеся в таких работах, как Р. А. Дэли, «Изверженные породы и глубины Земли», и Gutenberg, «Lehrbuch der Geophysik». Эти таблицы помогли сосредоточить внимание на материале, оказавшемся полезным или интересным для геологии.

Интересы геологов охватывают необычайно широкую область знания, и вряд ли имеется такая отрасль естественных наук, которую они не могли бы использовать. Однако группа лиц, от которой исходила инициатива составления настоящего справочника, представляла физические науки и главным образом геофизику. К тому же этот раздел геологической науки легче других поддается изложению в форме таблиц. Было решено, что этот справочник следует составить из таблиц физических и физико-химических величин, важных в геологии, но даже при этом более ограниченном объеме не легко было логически разрешить вопрос отбора, и сделанный отбор не имеет других более обоснованных баз, чем те, которые приняли различные редакторы издания.

Конечная цель в общих чертах сводилась к следующему: 1) извлечь из литературы материал, представляющий особый интерес для геологов; 2) подвергнуть этот материал критическому просмотру; 3) включить краткие сведения к различным таблицам с целью разъяснить зна-

чения и пределы приведенных данных; 4) показать недостаточность имеющихся в распоряжении сведений об определенных материалах, в надежде стимулировать дальнейшее их исследование. С целью устранения отрицательных сторон издания было решено: 1) избегать повторения больших разделов из существующих руководств, 2) не помещать такие материалы, как, например, по оптической минералогии, которые в настоящее время хорошо изложены в специальных руководствах, 3) не помещать или очень кратко коснуться промышленных материалов, какими являются фарфор, огнеупорные кирпичи и строительные металлы.

Однако как положительные, так и отрицательные стороны этого решения могут оспариваться, и, вероятно, большие разговоры вызовут способы, какими они осуществлялись в данной работе.

Работа по составлению и редактированию этого материала должна была производиться безвозмездно, предпочтительно специалистами, работающими в различных областях исследования. Было обеспечено сотрудничество многих специалистов, благодаря чему и стало возможным составление настоящей книги. К счастью, административный комитет во-время узнал от В. К. Менденхола, что близкая по содержанию работа составляется для Геологической службы США Г. С. Спайсером, работающим в этой организации. Преимущества использования такой сводки в качестве исходного материала были очевидны, и в результате кооперации с группой должностных лиц Геологической службы эти преимущества были использованы. Спайсер вошел в издательский комитет Национального исследовательского совета и включился в работу по подготовке материала для справочника; его работа послужила основой для многих разделов.

Таким образом, этот справочник составлен из нескольких сообщений, подготовленных более или менее самостоятельно. Отсутствие полного единообразия в подборе материала, в его обработке и в точках зрения составителей является общим недостатком большинства таких сводок; это могло бы быть устранено лишь при наличии более тесного контакта между составителями, чем это было. Материал в различных разделах поневоле различен по качеству и поэтому должен быть по-разному использован. Его подбор отражает мнение каждого отдельного составителя, и, конечно, не всегда можно оправдать этот подбор. В общем, отдавалось предпочтение сравнительно новым работам, а известный более ранний материал, но теперь уже устаревший, не использовался. В отдельных разделах библиография исчерпывающая, в других же она охватывает только отобранную группу ссылок, считающихся показательными, хотя и неполными. Ввиду большого значения, которое в геологических науках придается данным, полученным для сравнительно высоких температур и давлений, была сделана попытка включить эти данные, даже если изученные в этом направлении материалы не имеют непосредственного отношения к геологии, и, наконец, исчерпывающе привести такие работы, которые содержат подлинно геологический материал. С другой стороны, меньше было обращено внимания на работы по низким температурам, невзирая на их теоретическое значение.

Список лиц, участвовавших в создании этой книги, — длинный, и имена, упомянутые в различных разделах, никоим образом не включают всех тех, кто помогал при их подготовлении. Среди этих неофициальных участников числятся: Л. Г. Адамс, Дж. Ф. Шерер и Г. В. Мо-

рей из Геофизической лаборатории, проф. П. В. Бриджмен из Харвардского университета, В. В. Рубей и С. Э. Ван-Орстранд из Геологической службы, Вальтер Д. Ламберт из Береговой геодезической службы США, проф. Клеренс Ценер из Государственного колледжа в Вашингтоне, проф. Адольф Кнопф из Иельского университета. Национальный исследовательский совет и издательский комитет приносят свою благодарность этим и другим участникам и институтам, оказавшим помощь в их работе.

В составлении настоящего справочника принимали непосредственное участие: Дж. Ф. Белл (Технологический институт в Массачусетсе и Харвардский университет), Г. Берман (Харвардский университет), Френсис Берч (Харвардский университет), В. Вакие (Компания по изучению и освоению Гольфа), Рой Л. Горансен (Геофизическая лаборатория), Дэвид Григгс (Харвардский университет), Клерк Гудмен (Технологический институт в Массачусетсе), Р. Э. Джибсон (Геофизическая лаборатория), Р. А. Дэли (Харвардский университет), Э. Б. Дэн (Харвардский университет), Р. Д. Ивенс (Технологический институт в Массачусетсе), Н. Б. Кивил (университет в Торонто), Ф. С. Крачек (Геофизическая лаборатория), Э. С. Ларсен (Харвардский университет), Л. Ла Форж (Научная школа учителей в Кэмбридже), Л. Д. Лит (Харвардский университет), Л. Б. Слитчтер (Технологический институт в Массачусетсе), Г. Сесиль Спайсер (Геологическая служба США), М. Телькес (Технологический институт в Массачусетсе).

ГЛАВА I

СРЕДНИЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИЗВЕРЖЕННЫХ ПОРОД, КАМЕННЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТОВ

Содержание

Таблица 1—I. Среднее из химических анализов некоторых типов изверженных пород 14

» 2—I. Приближенные минералогические составы главных типов изверженных пород 15

» 3—I. Химический состав каменных метеоритов 15

» 4—I. Химический состав железных метеоритов и метеоритного железа 16

Таблица 1—1

Среднее из химических анализов некоторых типов изверженных пород

Данные выражены в процентах; цифры в скобках означают количество анализов, из которых выведено среднее значение

(*Р. А. Дэли*)

Окислы	Гранит (546)	Сиенит (50)	Гранодиорит (40)	Кварцевый диорит (55)	Диорит (70)	Габбро (41)	Оливиновый диабаз (12)	Диабаз (90)	Дунит (10)	Верлит перидотит несвежий (5)	Лерцолит перидотит (13)	Плато-Базальт (43)	Среднее для кристаллического комплекса; поверхность Финляндии (Сиаль)	Средний гранит Финляндии
SiO_2	70,18	60,19	65,01	61,59	56,77	48,24	48,54	50,48	40,49	45,07	43,95	48,80	67,70	69,42
TiO_2	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_2O_3	14,47	16,28	15,94	61,21	16,67	17,88	15,24	15,34	0,86	5,75	4,82	13,98	14,69	14,70
Fe_2O_3	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_2O	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_2O	4,11	4,49	2,75	2,10	2,12	0,89	0,98	0,97	0,04	0,57	0,21	0,69	3,56	4,46
H_2O	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_2O_5	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

* Плюс „остаток" 0,13%.

Примечание. Каждый средний состав породы был вычислен из серии анализов образцов, которым соответствующие составители давали название, напечатанное вверху столбца. Эти средние данные характеризуют, таким образом, составы пород, которые принято описывать под данным названием. Для многих целей эти средние составы можно считать показательными для пород, приводимых под теми же названиями в других таблицах; однако для других целей необходим анализ индивидуальных образцов, на которых были сделаны измерения.

Так как большинство химиков-аналитиков пренебрегало адсорбцией воды образцами пород, истертых в порошок, данные для окисей обычно завышены. Анализы образцов пород, подвергшихся значительному выветриванию, по мере возможности были исключены из использованных данных. Около трех четвертей от общего количества воды было удалено при температурах не выше 105° С. Следует отметить, что содержание TiO_2 во многих старых анализах слишком низко. Эта ошибка сама собой сделала некоторые из указанных содержаний Al_2O_3 несколько завышенными.

Средний состав верхней части коренной породы Финляндии, который очень близок к среднему составу кристаллического фундамента каждого континента, был вычислен И. И. Седергольмом. Для сравнения приводятся его данные для среднего гранита Финляндии. Средние анализы (свыше 100) других типов пород даны в работе Р. А. Дэли, «Изверженные породы и глубины земли», ОНТИ, Л.—М., 1936. Относительно содержания газа в плутонических породах см. E. S. Shepherd, Amer. J. Sci., 35A, 312, 1938, и Rayleigh, Proc. Roy. Soc., 170, 451, 1939.

Таблица 2—I

Приближенные минералогические составы главных типов изверженных пород

Данные выражены в процентах

(*Э. С. Ларсен*)

Минералы	Порода								
	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							
Андезит			46	56	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	14	21	29	
Оливин						7	12	3	95
Магнетит	2	2	1	2	2	2	2	2	3
Ильменит	1	1				2	2	2	
Апатит	сл.	сл.	сл.	сл.	сл.				
Сфен	сл.	сл.	1	сл.	сл.				

Таблица 3—I

Химический состав каменных метеоритов

Данные выражены в весовых процентах

(*Л. Ла Форж*)

Окислы и элементы	Средний состав 125 каменных метеоритов [1]	Средний состав 53 каменных метеоритов [2]	Средний состав 63 каменных метеоритов (хорошие анализы) [3]	Элементы	Средний состав 63 каменных метеоритов [4]
SiO_2	39,12	38,68	38,41	O	37,96
TiO_2	0,02	0,18	0,16	Fe	13,61
SnO_2	0,02			Si	20,75
Al_2O_3	2,62	2,88	2,86	Mg	19,59
Fe_2O_3	0,38		0,92	S	2,18
Cr_2O_3	0,41	0,47	0,40	Al	1,74
FeO	16,13	14,58	13,60	Ca	1,69
NiO	0,21	0,48	0,40	Ni	0,38
CoO		0,06	0,06	Na	0,75
MnO	0,18	0,29	0,23	Cr	0,30
MgO	22,42	22,67	23,66	Mn	0,22
CaO	2,31	2,42	1,88	C	0,19
Na_2O	0,81	0,87	0,82	Co	0,06
K_2O	0,20	0,21	0,16	P	0,17
H_2O	0,20	0,75	0,47	K	0,16
P_2O_5	0,03	0,26	0,34	Ti	0,12
S	1,98	1,80	1,89	H	0,06
C	0,06	0,15	0,16	Cl	0,03
Cl		0,08	0,03	Cu	0,01
Fe	11,46	11,98	12,35		
Ni	1,15	1,15	1,09		
Co	0,05	0,07	0,10		
Cu, Mn, Sn	0,02	0,01	0,01		
	99,78	100,04	100,00		100,00

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 3—I

1. Farrington O. C., Field Mus. Nat. Hist., Pub. 151, Geol., Ser., vol. 3, No. 9, p. 211, 1911.
2. Merrill G. P., Nat. Acad. Sci. Mem., vol. 14, Mem. I, 29, 1916.
3. Merrill G. P., U. S. Nat. Mus., Bull. 149, p. 17, 1930.
4. Вычислено Laforge, 1937.

Таблица 4—1

Химический состав железных метеоритов и метеоритного железа

Данные выражены в весовых процентах

(*Л. Ла Форж*)

Элементы	Средний состав 318 железных метеоритов [1]	Средний состав 8 железных метеоритов (хорошие анализы) [2	Средний состав металла из 9 анализов 8 каменных метеоритов (хорошие анализы) [3]	Средний состав металла из 8 анализов 8 каменных метеоритов (хорошие анализы) 3]	Средний состав 16 железных метеоритов [4]
Fe	90,85	90,00	88,20	89,84	89,74
Ni	8,52	8,19	10,63	9,19	8,42
Co	0,59	0,68	0,61	0,44	0,54
Cu	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
Cr	0,01	0,01	0,03		0,02
Mn		сл.	0,08	0,02	0,03
P	0,17	0,19	0,09	0,04	0,15
S	0,04	0,03	0,04	0,01	0,04
C	0,03	0,10	0,06	0,01	0,04
Si		0,01	0,09	0,02	0,80
Cl		0,02	сл.		
Ca					0,05
As					0,04
Mg					0,03
Ge					0,02
Zn					0,01
Sn					0,01
Остаток		0,03			0,02
Сумма	100,23	99,28	99,85	99,59	100,00

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 4–I

1. Farrington O. C., Analysis of stone meteorites, Field Mus. Nat. Hist., Pub. 151, Geol., Ser., vol. 3, No. 9, p. 212, 1911.
2. Merrill G. P., U. S. Nat. Mus., Bull. 149, p. 9, 1930.
3. Merrill G. P., Loc. cit., p. 9, 1930.
4. Noddack I., Noddack W., Die Häufigkeit der chemischen Elemente, Die Naturwissenshaften, vol. 18 (2), p. 761, 1930 (анализы произведены после удаления всех заметных включений троилита и силикатов).

ГЛАВА II

ПЛОТНОСТЬ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ И ОДНОЙ АТМОСФЕРЕ

Содержание

Таблица 1—II. Плотность минералов 18
» 2—II. Средние плотности полнокристаллических изверженных пород 22
» 3—II. Плотность кристаллов и отвечающих им стекол 23
» 4—II. Плотность природных стекол 24
» 5—II. Плотность кристаллических пород и отвечающих им стекол (искусственно полученных) 24
» 6—II. Пористость и объемный вес сухих и водонасыщенных осадочных отложений 25
» 7—II. Потери в весе в результате высушивания при повышенных температурах 39

2588

Таблица 1—II

Плотность минералов

(*Г. Берман*)

Название минерала	Плотность, г/см³	Название минерала	Плотность, г/см³
Авгит	3,2—3,6	Атакамит	3,77—3,94
Адамит	4,34—4,35	Аурипигмент	3,4—3,5
Адуляр	2,56		
Азурит	3,77—3,83	Бабингтонит	3,35—3,40
Акантит	7,2—7,33	Бавенит	2,72
Аквакрептит	2,05—2,08	Бадделеит	5,5—6,03
Акерманит	2,94—2,98	Бакерит	2,7—2,93
Аксинит	3,22—3,31	Барит	4,3—4,6
Актинолит	2,9—3,2	Баритокальцит	3,64—3,66
Алабандит *	4,05	Бастнезит	4,948
Александрит	3,644	Бёдантит	4,0—4,3
Алланит	2,78—4,32?	Берилл	2,63—2,91
Аллемонтит	5,8—6,3	Бериллонит	2,845
Аллофан	1,85—1,89	Бертрандит	2,57—2,60
Алмаз *	3,511	Бертьерит *	4,64
Алтаит	8,16	Биндгеймит	4,60—5,05
Алуминит	1,66	Биотит	2,69—3,16
Алунит	2,58—2,75	Бирюза	2,6—2,89
Алуноген	1,6—1,8	Бисмит	4,361
Алургит	2,835—3	Бисмутинит	6,55—6,73
Альбит	2,57—2,69	Битовнит	2,72—2,75
Альбит, чистый	2,62	Бишофит	1,59—1,65
Альвит	3,46—3,60	Бледит	2,22—2,28
Альгодонит	7,60—7,62	Боксит	2,55
Альмандин	3,69—4,33	Борацит	2,9—3
Амальгама	13,75—14,1	Борнит	4,9—5,4
Амезит	2,71—2,8	Ботриоген	2,04—2,14
Анальцим	2,2—2,285	Брандтит	3,671
Анауксит	2,524	Браунит	4,75—4,82
Ангидрит *	2,957±0,2	Брейнерит	3—3,2
Англезит *	6,35±0,2	Брейтгауптит	8,629
Андалузит	3,1—3,2	Бромирит	5,8—6
Андезин	2,64—2,69	Бромлит	3,706—3,718
Андорит *	5,35±0,2	Бронзит	3,18
Андрадит	3,64—3,9	Брукит	3,87—4,08
Анемузит	2,684	Брунсвигит	3,01
Анкерит	2,95—3,19	Брусит	2,38
Аннит	2,8—3,4	Брюстерит	2,45
Анортит	2,70—2,76	Буланжерит *	6,15
Анортит, чистый	2,76	Бура	1,69—1,72
Анортоклаз	2,56—2,65	Бурнонит *	5,83±0,03
Антигорит	2,55—2,62		
Антлерит	3,93	Вавеллит	2,32—2,36
Антофиллит	2,86—3,2	Валентинит	5,566
Апатит	3,15—3,27	Ванадинит	6,66—7,23
Апофиллит	2,3—2,4	Варисцит	2,47—2,54
Арагонит	2,85—2,94	Вермикулит	2,756
Аргентит	7,235—7,40	Вернерит	2,62—2,73
Аргиродит *	6,15—6,27	Вивианит	2,58—2,69
Арденнит	3,58—3,66	Виикит	3,8—4,8
Арсенолит	3,70—3,72	Виллемит	3,89—4,19
Арсенопирит *	6,07±0,15	Висмут *	9,75
Арфведсонит	3,44—3,45	Витерит	4,28—4,35
Астрофиллит	3,3—3,4	Волластонит	2,8—2,92

Продолжение табл. 1—II

Название минерала	Плотность, г/см³	Название минерала	Плотность, г/см³
Вольфрамит	7,1—7,5	Диопсид	3,2—3,38
Вульфенит	6,7—7,0	Диоптаз	3,05—3,35
Вюртцит	4,10	Дискразит	9,44—9,85
		Доломит	2,8—2,99
Гадолинит	4,0—4,67	Дюмортьерит	3,26—3,36
Ганит	4,48—4,60		
Гакманит	3,32—3,33	Жадеит	3,3—3,5
Галенит *	7,57	Железо, земное	7,3—7,8
Галит *	2,135	Железо, чистое	7,87
Галлуазит	2,0—2,2	Жисмондин	2,265
Ганксит	2,562		
Гармотом	2,34—2,50	Зейбертит	3,0—3,15
Гарниерит	2,27—2,87	Золото, чистое	19,33
Гастингсит	3,2	Зуниит	2,875
Гауерит	3,463	Идокраз	3,35—3,45
Гаюинит	2,4—2,5	Ильваит	3,8—4,1
Геденбергит	3,5—3,58	Ильменит	4,44—4,9
Гедрит	2,98—3,2	Иодирит	5,60—5,71
Гейландит	2,16—2,25	Иридистый осмий	18,8—21,12
Геленит	2,9—3,07		
Гематит *	5,26	Кабрерит	2,92—3,11
Гемиморфит	3,40—3,50	Кадмий, окись	6,143
Герсдорфит	5,9	Какоклазит	3,05—3,34
Гетит	4,0—4,4	Калаверит *	9,24±0,2
Гиалофан	2,6—2,8	Каледонит	6,4
Гиббсит	2,3—2,42	Каломель	6,482
Гидроапатит	3,0	Кальцит *	2,717
Гидромагнезит	2,14—2,18	Канкринит	2,42—2,5
Гиперстен	3,32—3,53	Канфильдит	6,276
Гипс	2,31—2,33	Каолинит	2,6—2,63
Глауберит	2,7—2,85	Карнинит	4,25—4,29
Глаукодот *	6,04±0,12	Карминит	4,105
Глауконит	2,2—2,8	Карналлит	1,60
Глаукофан	2,99—3,15	Карнегиит	2,57
Говлит	2,55—2,59	Карролит	4,85
Гортонолит	3,91—3,98	Касситерит	6,871
Гослярит	1,9—2,1	Катаплеит	2,74—2,8
Гранатовая группа	3,15—4,3	Кварц *	2,654
Гратонит *	6,22±0,2	Кейльгауит	3,52—3,77
Графит	2,09—2,25	Кераргирит	5,552
Гриналит	2,8	Кермезит	4,68
Гроссуляр	3,4—3,6	Кернит	1,953
Грюнерит	3,31—3,71	Кианит	3,56—3,67
Гумит	3,1—3,22	Киноварь	8,0—8,2
Гуммит	3,9—5,16	Кларкеит	6,39
		Клаудетит	3,85—4,15
Даналит	3,35—3,43	Клевеит	7,49
Данбурит	2,93—3,02	Клиногиперстен	3,4
Датолит	2,89—3,0	Клиногумит	3,1—3,21
Дафнит	3,0—3,17	Клиноклаз	4,19—4,38
Девейлит	2,0—2,4	Клинохлор	2,65—2,78
Деклуазит	5,86—6,20	Клиноцоизит	3,55—3,38
Джемсонит *	5,56±0,5	Клиноэнстатит	3,19
Джефферизит	2,30—2,38	Клинтонит	3,0—3,15
Диабантин	2,77—2,93	Кобальтин	6,33
Диаллаг	3,2—3,5	Ковеллин	4,65—4,68
Диаспор	3,3—3,0	Когенит	6,977
Дизаналит	4,02—4,26	Козалит	6,76
		Колеманит	2,417—2,428

Продолжение табл. 1—II

Название минерала	Плотность, г/см³	Название минерала	Плотность, г/см³
Колумбит	5,26—7,3?	Морденит	2,08—2,19
Копиапит	2,1—2,2	Муассанит	3,2
Кордиерит	2,57—2,66	Муллит	3,03—3,16
Корунд *	4,02	Мусковит	2,76—3
Корундофилит	2,83—2,90	Мышьяк	5,64—5,78
Крёнкит	1,98—2,06		
Креннерит	8,62	Натрий	1,42—1,46
Кридит	2,71—2,73	Натриевая селитра	2,24—2,29
Криолит	2,95—3,0	Натролит	2,18—2,25
Кристобалит	2,27—2,34	Нашатырь	1,528
Крокидолит	3,20—3,26	Нефелин	2,55—2,65
Крокоит	5,9—6,1	Нефрит	2,96—3,1
Кронстедтит	3,34—3,44	Никелин	7,83
Кроссит	3,16	Нонтронит	2,5
Кукеит	2,67—2,70		
Куммингтонит	3,1—3,32	Озокерит	0,85—0,97
Куприт	6,14	Октаэдрит	3,83—3,95
Кюрит	7,192	Оливенит	4,1—4,4
		Олигоклаз	2,62—2,67
Лабрадор	2,68—2,72	Олово	7,178
Лавсонит	3,08—3,12	Опал	1,9—2,3
Лазулит	3,06—3,12	Ортоклаз	2,5—2,62
Лазурит	2,38—2,45		
Левинит	2,09—2,16	Палладий	11,3—11,8
Лед	0,918	Парафин	0,9
Лейхтенбергит	2,65—2,74	Паргасит	3,3—4,7
Лейцит	2,45—2,51	Пектолит	2,74—2,88
Лепидолит	2,8—2,9	Пеннин	2,6—2,85
Лепидомелан	3,0—3,29	Пентландит	4,60—4,64
Лимонит	3,6—4,0	Периклаз *	3,56
Линнеит *	6,5±0,4	Перовскит	3,95—4,04
Лёллингит	7,40±0,01	Петалит	2,39—2,47
Ломонтит	2,23—2,42	Пижонит	3,2—3,4
Лорандит	5,53	Пираргирит	5,85
		Пирит *	5,018
Магнезит *	3,08	Пироксеновая группа	2,8—3,7
Магнетит	4,97—5,18	Пиролюзит	4,73—4,89
Малакон	3,90—3,91	Пироморфит	6,5—7,12
Малахит	3,9—4,03	Пироп	3,5—3,8
Манганит	4,2—4,4	Пирофиллит	2,66—2,9
Марганцевый апатит	3,16—3,39	Пирохлор	4,2—4,36
Маргарит	2,99—3,01	Пирротин	4,7
Мариалит	2,50—2,69	Плагиоклаз (см. также табл. 3—II)	2,61—2,76
Марказит	4,887	Платина, самородная	13,35—19
Медь	8,8—8,9	Платина, чистая	21,46
Мезолит	2,2—2,4	Плюмбоярозит	3,63—3,67
Мейонит	2,70—2,82	Плюмозит	5,62
Мелантерит	1,89—1,90	Полианит	4,84—5,03
Мелилит	2,9—3,4	Полигалит	2,77—2,78
Метациннабарит	7,65	Пренит	2,80—2,95
Миаргирит	5,25±0,05	Прохлорит	2,78—2,9[illegible]
Микроклин	2,54—2,57	Прустит	5,57
Микролит *	6,0—6,4	Псевдобрукит	4,4—4,9
Миллерит	5,36	Псиломелан	3,7—4,7
Миметезит	6,98—7,25	Пьемонтит	3,40—3,52
Молибденит	5,05		
Монацит	4,9—5,31	Раммельсбергит	7,1±0,1
Монтичеллит	3,03—3,25	Реальгар	3,56
Монтмориллонит	2,04—2,52		

Продолжение табл. 1—II

Название минерала	Плотность, г/см³	Название минерала	Плотность, г/см³
Рибекит	3,39—3,44	Трифилин-литиофилит	3,42—3,56
Ризёрит	4,179	Трона	2,11—2,15
Роговая обманка	3—3,47	Турмалин	2,9—3,2
Родолит	3,838		
Родонит	3,4—3,68	Уваровит	3,42—3,81
Родохрозит	3,3—3,76	Улексит	1,65—1,91
Роскоэлит	2,92—2,97	Уралит	3,00—3,04
Ртуть, чистая	13,596	Уранинит * (клевеит)	9,15
Рутил *	4,2	Уранопилит	3,75—3,97
Самарскит	5,67	Фаматинит	4,52±0,05
Санидин	2,57—2,58	Фаялит, чистый	4,14
Селен	4,5	Фенацит	2,94—3,04
Селитра	2,09—2,14	Ферберит	6,8—7,1
Семсейит	6,08	Фергюсонит	4,98—5,78
Сепиолит	2,02	Ферроантофиллит	3,24
Сера *	2,07	Филлипсит	2,14—2,20
Сервантит	4,084	Флогопит	2,74—2,87
Серебро * (10,5, чистое)	10,1—11,1	Флюорит *	3,18±0,1
Серпентин	2,50—2,65	Форстерит *, чистый	3,19
Сидерит	3,00—3,88	Фосгенит	6,0—6,30
Силлиманит	3,23—3,25	Фоязит	1,923
Сильвин	1,97—1,99	Франклинит	5,07—5,22
Сирлезит	2,45	Франколит	3,1
Сколецит	2,16—2,4	Фторапатит	3,13—3,23
Скородит	3,1—3,3	Фуггерит	3,18
Смальтин	6,4—6,6		
Смитсонит	4,30—4,45	Хабазит	2,06—2,16
Содалит	2,14—2,4	Халцедон	2,55—2,63
Сперрилит	10,58	Халькантит	2,12—2,30
Спессартин	3,8—4,3	Халькопирит	4,283
Сподумен *	3,186	Халькоцит	5,5—5,8
Ставролит	3,65—3,77	Хлоантит	6,11—6,83
Станнит	4,437	Хлорапатит	3,14—3,20
Стефанит *	6,25±0,03	Хлоритовая группа	2,6—3,0
Стибнит	4,52—4,62	Хлоритоид	3,26—3,61
Стильбит	2,09—2,24	Хлоропал	1,820
Стильпномелан	2,76—2,96	Хондродит	3,1—3,22
Стриговит	3,144	Хризоберилл	3,5—3,84
Стронцианит	3,68—3,71	Хризоколла	2,4—2,42
Сурик	4,6	Хризолит	3,18—3,57
Сурьма *	6,68	Хризотил	2,36—2,5
Сфалерит *	4,083	Хромит	4,32—4,57
Тальк	2,7—2,8	Целестин *	3,978
Танталит	6,5—8,20	Цельзиан	3,3—3,45
Теллур	6,1—6,3	Централласит	2,45—2,51
Тенардит	2,68—2,69	Цеолитовая группа	2—2,4
Теннантит	4,62	Церит	4,86—4,91
Тенорит	5,82—6,45	Церуссит	6,46—6,57
Тетрадимит *	7,3±0,2	Цилиндрит *	5,46±0,3
Тетраэдрит	4,97	Цинк	6,9—7,2
Тефроит	4—4,12	Цинкенит *	5,30±0,05
Титан-оливин	3,25—3,27	Цинкит *	5,66±0,2
Топаз	3,4—3,65	Циннвальдит	2,8—3,3
Торбернит	3,22—3,6	Циркон	4,02—4,86
Торит	5,2—5,4	Циртолит	3,85—4,04
Тремолит	2,9—3,2	Цоизит	3,25—3,36
Тридимит	2,28—2,33		

Продолжение табл. 1—II

Название минерала	Плотность, г/см³	Название минерала	Плотность, г/см³
Чальмерзит	4,68	Эгирин-геденбергит	3,502
Чильдренит	3,18—3,24	Эденит	3,0—3,06
		Эдингтонит	2,69—2,78
Шеелит	5,88—6,14	Энаргит *	4,45±0,05
Шёрломит	3,78—3,88	Энигматит	3,73—3,76
Шпинель	3,5—4,1	Энстатит	3,1—3,43
Штренгит	2,84—2,87	Эпидесмин	2,16
Штромейерит	6,13—6,3	Эпидотовая группа	3,07—3,5
		Эпсомит	1,68
Эвклаз	3,05—3,10	Эпихлорит	2,76—2,79
Эвколит	2,8—3,10	Эринит (монтмориллонит)	2,04
Эвксенит	4,60—4,99	Эритрин	2,91—2,95
Эгирин-авгит	3,5		
Эгирин	3,5—3,56	Ярозит	3,15—3,26

Примечание. Перечисленные в табл. I—II плотности минералов выбраны из полного списка, составленного Розенгольцом и Смисом (Rosenholtz and Smith, Rensselaer Polytechnic Institute Eng. and Sci. Series, No. 34, Troy, 1931), который включал все опубликованные величины. Данные здесь пределы для плотности в большинстве случаев не существенны, так как они представляют собой сводку найденных в литературе величин, которые не были подвергнуты достаточной критике. Некоторые минералы обладают значительной разницей в плотности в результате изоморфного замещения, и в этих случаях необходимо согласовывать специальные данные химического анализа с данной величиной плотности. Для минералов, отмеченных звездочкой (*), цифры Розенгольца и Смиса заменены новыми данными.

Таблица 2—II

Средние плотности полнокристаллических изверженных пород

(*Р. А. Дэли*)

Порода	Количество образцов	Средняя плотность, г/см³	Пределы плотности, г/см³
Гранит	155	2,667	2,516—2,809
Гранодиорит	11	2,716	2,668—2,785
Сиенит	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 оливиновое габбро	27	2,976	2,850—3,120
Диабаз, свежий	40	2,965	2,804—3,110
Перидотит, свежий	3	3,234	3,152—3,276
Дунит, свежий	1	3,289	
Верлит	1	3,370	
Лерцолит	1	3,330	
Пироксенит	8	3,231	3,10—3,318
Анортозит	12	2,734	2,640—2,920
Сиаль, основной комплекс Финляндии (вычислено из средних анализов пород комплекса)		2,705	

Таблица 3—II

Плотность кристаллов и отвечающих им стекол

(Р. А. Дэли, см. также табл. 2—III)

Минерал	Плотность, г/см³		Уменьшение при витрификации, %	Ссылка
	кристалл	стекло		
Анортит, Монте-Сомма..	2,750	2,665	3,1	5
Анортит.....	2,765	2,700	2,35	7
$Ab_1\ An_5$.....	2,733	2,648	3,1	7
$Ab_1\ An_2$.....	2,710	2,591	4,4	7
$Ab_1\ An_1$.....	2,679	2,533	5,5	7
$Ab_2\ An_1$.....	2,660	2,483	6,7	7
$Ab_3\ An_1$.....	2,649	2,458	7,2	7
Альбит.....	2,605	2,382	8,6	7
Альбит, Тироль	2,625	2,373	9,6	5
Ортоклаз.....	2,551	2,351	7,8	14
Санидин, Иския	2,597	2,400	7,6	1
Адуляр, Сант-Готтард ..	2,575	2,370	7,6	5
Лейцит.....	2,480	2,410	2,8	5
Кварц (низкотемпературный).....	2,651	2,203	16,9	13
Силлиманит	3,022	2,53	16,3	12
Диопсид (искусственный)	3,265	2,846	12,8	12
Диопсид	3,275	2,830	13,6	10
$MgSiO_3$ (искусственный, моноклинный)	3,183	2,735	14,1	12
Волластонит.....	2,906	2,895	0,4	12
Энстатит.....	3,175	2,743	13,6	10
Авгит, Гваделупа.....	3,266	2,835	13,2	4
Тремолит.....	2,990	2,780	7,0	5
Актинолит	3,040	2,810	7,6	5
Паргасит.....	3,109	2,790	10,3	5
Роговая обманка, Оран..	3,216	2,826	12,1	4
Оливин, Фого.....	3,381	2,831	16,3	4
Форстерит (искусственный)	3,216			3
Фаялит (искусственный).	4,068			2
Гранат, Гренландия.....	3,90	3,05	21,8	11
Гроссуляр.....	3,63	2,95	18,7	11
Акерманит (искусственный).....	2,944	2,955	—0,4	6
Геленит (искусственный)	3,038	2,884	5,1	6
$K_2Si_4O_9$ (искусственный)	2,335	2,384	—0,2	8
B_2O_3	2,460	1,78—1,85		9

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 3 — II

1. Abich
2. Adams
3. Bowen, Anderson
4. Deville
5. Douglas
6. Ferguson, Buddington
7. Geophys. Lab.
8. Goranson, Kracek
9. Kracek, Morey, Merwin (плотность кристаллов)
10. Larsen
11. Magnus
12. Smithson Tables
13. Sosman
14. Wolff

Таблица 4—II

Плотность природных стекол

(*Р. А. Дэли*)

Стекло	Количество определений	Пределы плотности, г/см³	Средняя плотность, г/см³	Ссылка
Риолитовый обсидиан.....	15	2,330—2,413	2,379	3
Риолитовый обсидиан, Кавказ	6	2,347—2,363	2,352	2
Трахитовый обсидиан.....	3	2,435—2,467	2,450	3
Смоляной камень.....	4	2,321—2,37	2,338	1
Андезитовое стекло	3	2,40—2,573	2,474	1
Дацитовое стекло		2,45—2,55	2,505	1
Лейцито-тефритовое стекло	2	2,52—2,58	2,55	1
Базальтовое стекло.... ...	11	2,704—2,851	2,772	3

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 4 — II

1. George, Journ. Geol., 32, 353, 1924.
2. Mickey, Centralbl. Mineralogie (A), p. 416, 1930.
3. Tilley, Miner. Mag., 19, 275, 1922.

Таблица 5—II

Плотность кристаллических пород и отвечающих им стекол

(искусственно полученных)

(*Р. А. Дэли*)

Порода	Плотность, г/см³		Разность в плотности, %	Ссылка
	порода	стекло		
Гранит, Шеп-Феллс.....	2,656	2,446	7,90	3
Гранит, Петерхед	2,630	2,376	9,66	3
Сиенит, Плауэн	2,724	2,560	6,02	3
Тоналит, Новая Зеландия...	2,765	2,575	6,87	3
Диорит, Гарнсей.....	2,833	2,680	5,40	3
Диорит, Маркфильд.....	2,880	2,710	5,90	3
Габбро, Каррок-Фелл.....	2,940	2,791	5,07	3
Оливиновый долерит, Кли-Хиллс.....	2,889	2,775	3,95	3
Долерит, Раулей-Рег.....	2,800	2,640	5,71	3
Долерит, Уин-Силл.....	2,925	2,800	4,27	3
Диабаз, Палисадес.....	2,975	2,761	7,19	1
Диабаз, Вайнел-Хэвен.....	2,96	2,76	6,8	2
Эклогит.....	3,415	2,746 (?)	19,6	4

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 5—II

1. Day, Sosman, Hostetter, Am. Journ. Sci., 37, I, 1914.
2. Dane, не опубликована.
3. Douglas, Quart. Journ. Geol. Soc. London, 63, 145, 1907.
4. Joly, Poole, Phil. Mag., 3, 1242, 1927.

Таблица 6—II

Пористость и объемный вес сухих и водонасыщенных осадочных отложений
(Г. С. Спайсер)

Характер и возраст отложений	Местонахождение	Пористость, %	Объемный вес в сухом состоянии	Объемный вес в состоянии насыщения H_2O	Ссылка
Почва, ил, аллювий					
Черная почва гумбо	Округ Карибу, Айдахо	54,1	1,19	1,73	31
Почва, формация Кеп-Мей, плейстоцен	Абзекон, Нью-Джерси	23,4—39,9	1,55—1,85	1,95—2,08	31
Почва современная	Ольд-Бридж, Нью-Джерси	43,6—46,6	1,47—1,48	1,92—1,94	31
Почва, формация Кеп-Мей, плейстоцен	Плизентвилл, Нью-Джерси	25,5—30,0	1,67—1,77	1,97—2,02	31
Почва современная	Прейнстон, Нью-Джерси	53,2	1,25	1,78	31
Почва, формация Кеп-Мей, плейстоцен	Раньон, Нью-Джерси	30,8—45,3	1,47—1,52	1,83—1,92	31
Мелкопесчаная почва			1,33		26
Известково-песчаная почва			1,6—1,7		26
Рыхлая, сухая черная почва			1,13		26
Почвы		40,0—50,0	1,00—2,00	1,50—2,40	35
Поверхностный слой почвы			1,55—1,95		26
Суглинистая почва, хрящеватая	Округ Фремонт, Айдахо	53,7	1,19	1,73	31
Песчанистый суглинок			1,65—2,15		26
Лёсс	Округ Карибу, Айдахо	69,4	0,75	1,44	31
Лёсс	Округ Фремонт, Айдахо	61,1	1,01	1,62	31
Лёсс	Округ Джером, Айдахо	53,2	1,25	1,78	31
Лёсс, плейстоцен	Колинсвилл, Нью-Йорк	46,6—47,3	1,42—1,46	1,89—1,93	12
Лёсс		20,0—60,0	0,80—1,60	1,40—1,80	35
Песчанистый ил, формация Форт-Юнион, третичный	Округ Розбад, Монтана	31,4—53,6	1,27—1,84	1,81—2,15	31
Ил, современный	Округ Розбад, Монтана	49,9	1,36	1,86	31
Гумусовый покров			1,22—1,68		26
Аллювий, современный	Округ Сент-Чарлз, Миссури	42,3—43,3	1,53—1,55	1,96—1,97	12
Песок					
Песок, формация Форт Юнион, третичный	Округ Розбад, Монтана	32,9—34,9	1,79—1,81	2,14	31
Сыпучий песок, формация Ленс, меловой	Округ Розбад, Монтана	43,0	1,54	1,97	31
Песок, формация Киркуд, миоцен	Атлантик-Сити, Нью-Джерси	44,3	1,47	1,91	31

Продолжение таблицы 6—II

Характер и возраст отложений	Местонахождение	Пористость, %	Объемный вес в сухом состоянии	Объемный вес в состоянии насыщения H_2O	Ссылка
Песок, Маунт-Лаурель, верхнемеловой	Имлейстоун, Нью-Джерси	44,4	1,48	1,92	31
Песок, формация Киркуд, миоцен	Мергет-Сити, Нью-Джерси	41,2	1,56	1,97	31
Песок, формация Киркуд, миоцен	Ошеан-Сити, Нью-Джерси	30,2—38,5	1,66—1,81	2,04—2,11	31
Грубый песок, формация Ритен, верхнемеловой	Саус Ривер и др., Нью-Джерси	35,7—48,4	1,37—1,75	1,85—2,11	31
Песок	Р. Бивер, Оклахома	36,6—63,2	1,52—1,65	2,02—2,15	7
Галечник					
Галечник, плейстоцен (?)	Округ Фергус, Монтана	25,1	1,89	2,14	31
Галечник, терраса, плейстоцен	Округ Розбад, Монтана	20,2—29,3	1,36—2,19	1,65—2,39	31
Галечник	Р. Бивер, Оклахома	37,7	1,75	2,13	7
Галечник, очень влажный			1,95—2,05		26
Песчаник					
Песчаник, формация Темблор, миоцен	Кетлмен-Хиллс, Калифорния	3,9—21,9	2,06—2,61	2,28—2,65	35
Песчаник, миоцен	Кетлмен-Хиллс, Калифорния	9,3—17,2	2,18—2,43	2,35—2,52	35
Песчаник, формация Доменджайн, эоцен	Нью-Белридж, Калифорния	9,7—11,1	2,56—2,63	2,67—2,73	35
Полосчатый песчаник, эоцен	Англия, различные местности	33,8	1,73	2,07	22
Пестроцветный песчаник, триасовый		6,6—30,8	1,81—2,48	2,12—2,55	22
Кейперовый песчаник, триасовый		16,5—28,6	1,85—2,18	2,14—2,34	22
Мергелистый песчаник, триасовый		10,1—20,2	2,04—2,33	2,24—2,43	22
Песчаник		13,3—14,1	2,25—2,29	2,39—2,42	14
Песчаник		2,5—18,2	2,15—2,57	2,33—2,60	22
Доломитовый песчаник		14,1	2,31	2,45	14
Карлейльский песок, миссисипский	Карлейл, Иллинойс	20,6—27,6	1,93—2,11	2,21—2,32	21
Песчаник Дакота, верхнемеловой	Льюис, Айова	33,8—38,2	1,65—1,76	2,03—2,10	7
Песчаник Дакота, верхнемеловой	Су-Сити, Айова	35,7	1,73	2,09	7
Песок Уэйсайд, пенсильванский	Округ Монтгомери, Канзас	9,7	2,47	2,57	21
«Нефтяной песок», среднедевонский	Ревенэ, Кентукки	10,4—11,9	2,55	2,65—2,67	21
«Газовый песок»	Монро, Луизиана	14,3—31,6	1,87—2,30	2,19—2,44	21

Продолжение табл. 6—II

Характер и возраст отложений	Местонахождение	Пористость, %	Объемный вес в сухом состоянии	Объемный вес в состоянии насыщения H_2O	Ссылка
«Газовый песок»	Округ Уачита, Луизиана	41,3	2,15	2,56	21
Газоносная порода Монро, верхнемеловая	Шривпорт, Луизиана	27,2	1,95	2,22	21
Песок Вудбайн, верхнемеловой.....		17,4	2,23	2,43	21
Другие песчаники ...		9,2—37,7	1,69—2,68	2,07—2,77	21
Кварцевый песчаник	Округ Изабелла, Мичиган	19,7	2,13	2,33	35
«Газовый песок».....	Джексон, Миссисипи	17,4	2,13	2,30	35
Песчаник, формация Форт-Юнион, третичный	Баккей, Монтана	22,6	2,09	2,32	31
Песчаник, формация Ленс, меловой.....	Округ Фергус, Монтана	26,8	1,97	2,24	31
Песок Кет-Крик, меловой		23,2—25,8	1,96—2,06	2,22—2,29	31
Песчаник Игл, верхнемеловой		23,6—27,1	1,93—2,06	2,20—2,30	31
Песчаник, формация Фронтиер, верхнемеловой.....	Округ Джек, Монтана	5,0—18,6	2,15—2,57	2,34—2,62	21
Песчаник, формация Ленс, меловой.....		26,7—36,6	1,73—2,00	2,10—2,27	31
Песчаник, формация Ленс, меловой.....		24,8—38,4	1,66—2,08	2,04—2,33	31
Песчаник, формация Форт-Юнион, третичный.....	Округ Розбад, Монтана	27,7	1,93	2,21	31
Песчаник, формация р. Джудайс, верхнемеловой.....		32,3—51,2	1,73—1,91	2,23—2,24	31
Песчаник, формация Форт-Юнион, третичный		9,4—32,9	1,81—2,50	2,14—2,59	31
Песчаник Санта-Роза, триасовый.....	Санта Роза, Нью-Мексико	18,0	2,16	2,34	21
Песчаник Уайт Медайне, силурийский	Округ Эри, Нью-Йорк.....	10,5	2,35	2,46	35
Песчаник Медайне ..	Ниагара, Нью-Йорк	7,9	2,45	2,53	21
Песок Биг-Инджун, миссисипский	Льюисвилл, Огайо.....	11,3—13,1	2,31—2,36	2,44—2,47	21
«Газовый песок»	Округ Монро, Огайо.....	13,0	2,38	2,51	21
Песчаник Бириэ, миссисипский.....	Огайо (различные местности)	4,7—16,8	2,23—2,54	2,40—2,59	21
Кинерский песок, миссисипский.....	Огайо (различные местности)	11,3—16,9	2,21—2,35	2,38—2,46	21
Песчаник, формация Атока, пенсильванский.....	Долина р. Арканзас, Оклахома	0,0—20,6	2,09—2,60	2,30—2,60	3
Песчаник Хартшорн, пенсильванский....		7,1—10,7	2,36—2,46	2,47—2,53	3

Продолжение табл. 6—II

Характер и возраст отложений	Местонахождение	Пористость, %	Объемный вес в сухом состоянии	Объемный вес в состоянии насыщения H_2O	Ссылка
Песчаник Форт-Смис, пенсильванский	Долина р. Арканзас, Оклахома	8,4—10,3	2,38—2,43	2,48—2,51	3
Песчаник Саванна, пенсильванский		5,4—8,4	2,42—2,50	2,50—2,55	3
Песок Хикмен	Барбенк, Оклахома	7,4—32,7	1,82—2,48	2,15—2,55	21
Чейенинский песчаник, нижнемеловой	Саймеррон, Оклахома	19,1—38,0	1,61—2,15	1,99—2,34	7
Песчаник Дакота, верхнемеловой	Саймеррон, Оклахома	27,8—39,4	1,69—1,96	2,08—2,24	7
Бартлсвиллский песок, пенсильванский	Округ Крик, Оклахома	16,4—28,9	1,91—2,21	2,20—2,37	21
Гленнский песок, пенсильванский	Округ Крик, Оклахома	21,4	2,12	2,33	21
Песок Уэйсайд (?), пенсильванский	Кейстон, Оклахома	6,7—20,1	2,15—2,52	2,35—2,59	21
Песчаник	Норзерн, Оклахома	6,0—40,0	1,60—2,50	2,00—2,56	1
Динерский песок, пенсильванский или миссисипский	Окфуски, Оклахома	12,5	2,36	2,48	21
Кингвудский песок, пенсильванский или миссисипский	Окфуски, Оклахома	16,0	2,27	2,43	21
Бартлсвиллский песок, пенсильванский	Першинг, округ Уседж, Оклахома	12,1—37,7	1,64—2,35	2,02—2,47	21
Кливлендский песок, пенсильванский		17,7	2,21	2,39	21
Красный песчаник		10,9—17,5	2,25—2,46	2,42—2,57	21
Блуждающие пески		15,2	2,32	2,47	21
Песчаник Джекфорк, пенсильванский	Горы Уачита, Оклахома	0,9—9,6	2,44—2,60	2,54—2,61	3
Песчаник Кристал-Маунтэн, ордовик(?)		17,5	2,19	2,36	3
Блейлокский песчаник, силур		2,3—17,4	2,18—2,56	2,35—2,58	3
Песчаник Сент-Питер, ордовичский		3,6—14,1	2,28—2,55	2,42—2,59	3
Бетсвилльский песчаник, миссисипский	Озаркское плато, Оклахома	13,3—17,3	2,19—2,28	2,36—2,41	3
Хельский горизонт песчаника, пенсильванский		13,8—18,1	2,24—2,28	2,42	3
Лейтонский песок, пенсильванский	Округ Пауни, Оклахома	22,1—26,3	1,97—2,07	2,23—2,29	21
Шиннерский песок, пенсильванский	Округ Пауни, Оклахома	13,9	2,32	2,46	21
Вильсонский песок, пермь (?)	Округ Стефенс, Оклахома	20,0	2,16	2,36	21
Баргесский песок, пенсильванский	Вашингтонский округ, Оклахома	16,4	2,23	2,39	21
Баульдерский песок	Округ Алледжени, Пенсильвания	4,4—12,6	2,31—2,56	2,44—2,60	21

Продолжение табл. 6—II

Характер и возраст отложений	Местонахождение	Пористость, %	Объемный вес в сухом состоянии	Объемный вес в состоянии насыщения H_2O	Ссылка
Бредфордский песок, девонский (3-й, 4-й, 5-й)	Бредфорд-Филд, Пенсильвания	4,6—18,6	2,17—2,68	2,36—2,73	21
Спичлейский песок, девонский	Округ Батлер, Пенсильвания	4,3—15,4	2,28—2,64	2,43—2,68	21
Тридцатифутовый песок	Округ Гленшоу, Пенсильвания	7,2—9,8	2,37—2,42	2,47—2,49	21
Песок Бириэ, миссисипский	Округ Харрисен, Пенсильвания	15,4—17,2	2,21—2,26	2,38—2,41	21
Песчаник	Баркбарнетт, Техас	28,0—28,9	1,89—2,04	2,18—2,32	21
Песчаник	Команч, Техас	17,1	2,19	2,36	21
Песчаник	Айвэн, Техас	19,4	2,18	2,37	21
Песчаник, газоносный	Мексиа-Гросбек, Техас	10,7—37,7	1,68—2,46	2,06—2,57	21
Песчаник, газо- и нефтеносный	Петролиа, Техас.	18,5—26,6	1,95—2,16	2,22—2,34	21
Песчаник	Ренджер, Техас	11,0	2,31	2,42	21
Песчаник	Округ Стефенс, Техас	14,6—19,3	2,18—2,28	2,37—2,43	21
Песчаник	Тоунсайт, Техас	24,6	2,00	2,25	21
Песчаник Кебин-Крик 92	Дауэс, Зап. Виргиния	19,3	2,16	2,35	21
Песчаник Кол-Ривер		18,7	2,17	2,36	21
Песчаник (Сарчоск)		4,8—6,1	2,50—2,53	2,56—2,58	21
Песок Орискени, газоносный, девонский	Округ Кенэвэ, Зап. Виргиния	17,8	2,18	2,36	35
Плотинный песчаник, миссисипский или девонский	Келлей-Крик, Зап. Виргиния	13,7	2,30	2,44	21
Биг-Инджин, миссисипский	Меннингтон, Зап. Виргиния	12,8	2,32	2,45	35
ПесокУолл-Крик, меловой	Биг-Мадди, Вайоминг	20,2—23,4	2,02—2,10	2,25—2,30	21
Формация Фронтиер, меловая	Грасс-Крик, Вайоминг	27,0	1,93	2,20	21
Песчаник Пиэй, формация Фронтиер, меловой	Грейбалл, Вайоминг	28,6	1,90	2,19	21
Песчаник Торчлайт, формация Фронтиер, меловая	Грейбалл, Вайоминг	28,9	1,87	2,16	21
Песчаник Дакота, меловой	Ленс-Крик, Вайоминг	16,8—21,8	2,07—2,22	2,29—2,39	35
Песчаник Ньюкестл, из толщи сланцев Гренерос, меловой	Ленс-Крик, Вайоминг	14,9—19,0	2,14—2,29	2,33—2,44	21
Формация Санденс, юрская	Лост-Солджер, Вайоминг	19,4	2,14	2,33	35
Тенслипский песчаник, пенсильванский	Орегон-Безин, Вайоминг	26,5	1,95	2,22	35
Песчаник Ньюкестл, из толщи сланцев Грэнерос, меловой	Уседж, Вайоминг	8,8—26,0	2,00—2,44	2,26—2,53	21

Продолжение табл. 6—II

Характер и возраст отложений	Местонахождение	Пористость, %	Объемный вес в сухом состоянии	Объемный вес в состоянии насыщения H_2O	Ссылка
Песок Уолл-Крик, известковый, меловой	Паудер-Ривер Хауз, Вайоминг	7,6	2,47	2,55	21
Песок Уолл-Крик	Пайн Маунтэн, Вайоминг	3,4	2,57	2,60	21
Песок Ферст Уолл-Крик, меловой	Солт-Крик, Вайоминг	19,8—20,4	2,11—2,18	2,31—2,38	21
Песок в коренном залегании		25,8	1,96	2,22	21
Песчаник Шеннон, из толщи Стилского сланца, меловой		26,8	1,95	2,22	21
Пестроцветный песчаник (испытан на крутильных весах).			2,25		26
Песчаник, третичный	.....,		1,86	2,18	26
Песчаник, пермский и триасовый	.....		2,07	2,27	26
Кварцит	Нанитон, Англия	6,4	2,48	2,54	14
Кварцит золотоносный	Зап. Африка и Родезия	1,9—2,8	2,59—2,61	2,62—2,63	22
Кварцит	Англия	0,8	2,63	2,64	22
Глина					
Донные осадки океана	Атлантический океан	48,6—51,9	1,21—1,34	1,73—1,83*	35
Глина, верхняя свита	Р. Мохев, Калифорния	43,1	1,55	1,98	21
Глина, нижняя свита	Р. Мохев, Калифорния	35,7	1,73	2,09	21
Фуллерова земля, высушена при 30°С	Куинси, Флорида	53,0	1,06—1,50	1,59—2,03	35
Фуллерова земля, насыщена водой в грунте	Куинси, Флорида	52,9	1,59	2,12	35
Красная глина между потоками лавы	Дюбуаз, Айдахо	42,4	1,51	1,93	31
Глина	Округ Джефферсон, Айдахо	62,9	1,00	1,63	31
Белая огнеупорная глина, пенсильванская	Фултон, Миссури	10,1	2,37	2,47	12
Глина в слое песка Кохенсей, миоценовая (?)	Кросслей, Нью-Джерси	36,6—37,4	1,66—1,68	2,03—2,05	12
Голубая глина Алловея, миоценовая, с глубины 4 м	Йорктаун, Нью-Джерси	38,6	1,68	2,07	12
Желтоватая глина Алловея, миоценовая, с глубины 3,3 м		40,3	1,62	2,02	12
Желтая глина Алловея, миоценовая, с глубины 12 м		51,9	1,30	1,82	12

* Плотность морской воды =1,028.

Продолжение табл. 6—II

Характер и возраст отложений	Местонахождение	Пористость, %	Объемный вес в сухом состоянии	Объемный вес в состоянии насыщения H_2O	Ссылка
Глобигериновый ил	Дно Тихого океана	1,8	2,79	2,81	35
Миддендорфская белая глина, меловая	Округ Эйкен, Юж. Каролина	39,0	1,60	1,99	12
Миддендорфская белая глина, меловая	Округ Ричленд, Юж. Каролина	42,3	1,51	1,93	12
Глина и песок, третичные			1,90		26
Глина, каменноугольная			1,51		26
Мергель (испытан на крутильных весах)			2,40		26
Среднее для глины с глубины менее 30 м		40,0—50,0	1,30—1,60	1,80—2,00	1
	Глинистый сланец				
Глинистый сланец	Бетсвилл, Арканзас	1,5	2,85	2,86	35
Глинистый сланец Салинас, миоценовый, обнажение	Голета-Лендинг, Калифорния	33,3	1,78	2,11	21
Глинистый сланец Крейнхагена, третичный	Нью-Белридж, Калифорния	3,9—4,3	2,56—2,63	2,60—2,67	35
Глинистый сланец, каменноугольный	Англия	1,6	2,58	2,60	22
Глинистый сланец, силурийский	Англия	3,8—10,1	2,45—2,65	2,55—2,69	22
Глинистый сланец, средний карбон	Англия	4,0—7,3	2,50—3,17	2,57—3,21	22
Глинистый сланец Вестона, пенсильванский	Боннер-Спрингс, Канзас	15,5—16,0	2,28—2,29	2,44—2,45	12
Формация Ментор, команчская, черный	Фелюн, Канзас	22,9—23,3	2,05—2,07	2,28—2,30	12
Глинистый сланец Грэнерос, верхнемеловой	Округ Гамильтон, Канзас	24,6—25,2	1,98—1,99	2,23—2,24	12
Глинистый сланец Ченьют, пенсильванский	Индепенденс, Канзас	14,8—15,0	2,31—2,32	2,46—2,47	12
Формация Веллингтон, пермский	Сэлине, Канзас	15,3—15,5	2,39—2,40	2,54—2,55	12
Черный глинистый сланец, девонский, с глубины 670 м	Округ Флойд, Кентукки	0,0	2,41	2,41	35
Глинистый сланец Четтенуга, девонский или каменноугольный	Айрвин, Кентукки	7,5	2,38	2,46	21
Зеленоватый глинистый сланец	Шривпорт, Луизиана	22,6	2,10	2,33	21

Продолжение табл. 6—II

Характер и возраст отложений	Местонахождение	Пористость, %	Объемный вес в сухом состоянии	Объемный вес в состоянии насыщения H_2O	Ссылка
Красноватый глинистый сланец	Шривпорт, Луизиана	20,0	2,22	2,42	21
Глинистый сланец		16,9	2,29	2,46	21
Черный Арвонский глинистый сланец, гуронский	Мичиган		2,78		17
Глинистый сланец Нонсач, докембрийский	Мичиган		2,80		17
Глинистый сланец Чероки, пенсильванский	Фултон, Миссури	17,0—17,2	2,29	2,46	12
Гамильтонский сланец, девонский	Ганнибал, Миссури	11,3—11,6	2,32	2,43—2,44	12
Глинистый сланец	Округ Феллон, Монтана	28,8	1,79	2,03	35
Колорадский глинистый сланец, верхнемеловой	Округ Фергус, Монтана	22,6	2,07	2,30	31
Глинистый сланец Берпау, верхнемеловой		41,1	1,57	1,98	31
Формация Клеггетт; верхнемеловой, гипсоносный		36,3	1,81	2,17	31
Формация Форт-Юнион, третичный		36,6	1,71	2,08	31
Формация Форт-Юнион, третичный		23,5—36,9	1,67—2,06	2,04—2,29	31
Свита сланца Лебо, формация Форт-Юнион, третичный, светлый	Округ Розбад, Монтана	26,2	1,91	2,17	31
Свита сланца Лебо, формация Форт-Юнион, третичный черный		21,2	2,07	2,28	31
Формация р. Джудайс, верхний мел, песчаный		44,8	1,54	1,99	31
Формация Ленс, меловой		27,4—29,8	1,92—2,01	2,22—2,28	31
Туллокская свита, формация Ленс, меловой или третичный		40,1	1,65	2,05	31
Голубовато-серый глинистый сланец, лежащий на Кинерском песке	Иерусалим, Огайо	9,7	2,46	2,56	21
Голубовато-серый глинистый сланец, лежащий на Кинерском песке	Милтонбург, Огайо	11,0	2,41	2,52	21
Глинистый сланец	Северная Оклахома	$< 20,0$	2,15	$< 2,35$	1
Глинистый сланец, с глубины 1200 м	Северная Оклахома	$<4,0$	$>2,55$	2,59	1

Продолжение табл. 6—II

Характер и возраст отложений	Местонахождение	Пористость, %	Объемный вес в сухом состоянии	Объемный вес в состоянии насыщения H_2O	Ссылка
Станлейский глинистый сланец, пенсильванский	Горы Уачита, Оклахома	2,5—6,8	2,45—2,60	2,52—2,62	3
Глинистый сланец Файеттвилл, миссисипский	Озарское плато, Оклахома	8,6—14,1	2,27—2,44	2,41—2,53	3
Глинистый сланец Грэнерос, верхнемеловой	Округ Крук, Вайоминг	32,5—33,3	1,78—1,87	2,11—2,20	27
Карлейльский сланец, верхнемеловой	Округ Вестон, Вайоминг	23,8	2,00	2,24	27
Формация Ниобрара, верхний мел	Округ Вестон	25,3—25,4	1,97—2,00	2,22—2,25	27
Пьеррский глинистый сланец, верхнемеловой	Округа Вестон и Крук, Вайоминг	25,4—35,8	1,56—2,04	1,92—2,29	27
Сланец плотный	Англия	0,6—6,0	2,59—2,83	2,64—2,65	22
Шифер, архейский	Англия	2,3	2,68	2,70	22
Шифер	Тасмания	6,0	2,64	2,70	22
Измененный глинистый сланец		12,1	2,38	2,50	22
Известняк					
Известняк	Бакстон, Англия	14,1	2,31	2,45	14
Оолитовый известняк	Монкс-Парк, Англия	20,3	2,16	2,36	14
Известняк, каменноугольный	Англия	2,2—9,4	2,34—2,59	2,43—2,61	22
Известняк, силурийский	Англия	1,4—6,3	2,53—2,64	2,59—2,65	22
Портландский известняк		18,1	2,21	2,39	14
Известняк	Данди, Мичиган	0,9	2,63	2,64	35
Черная известь		4,5	2,54	2,58	21
Известняк Каддо, пенсильванский	Ренджер, Техас	4,4	2,57	2,61	21
Песок Макклески, пенсильванский		6,6	2,49	2,56	21
Известняк «мелистый», формация Офир, кембрийский	Шахта Офир-Хилл, Юта	0,0—1,0	2,76	2,76—2,77	10
Известняк Гринхорн, верхнемеловой	Округ Крук, Вайоминг	37,6	1,74	2,12	27
Известняк			2,18—2,72		26
Пористый известняк			1,91	2,20 (мокрый)	26
Плотный известняк			1,94		9
Мергелистый известняк			2,52		9
Ракушечный известняк			2,46		9
Известняк микрокристаллический			2,56—2,64		9
Известняк сахаристый, свободный от кварца		25,6	2,14	2,40	35
Мел	Англия	17,6—42,8	1,53—2,22	1,96—2,40	22

Продолжение табл. 6—II

Характер и возраст отложений	Местонахождение	Пористость, %	Объемный вес в сухом состоянии	Объемный вес в состоянии насыщения H_2O	Ссылка
Оолит	Англия	5,5—24,0	2,04—2,54	2,28—2,60	22
Доломит	Митчелдин, Англия	8,6	2,54	2,63	14
Доломит			2,23—2,68		22
Мрамор	Англия	1,1	2,65	2,66	22
Мрамор			2,70		9
Мрамор 34 образца	Из 12 штатов	0,4—2,1	2,66—2,86	2,68—2,86	16
Разное					
Ангидрит (испытан на крутильных весах)			2,9		26
Кремнистый сланец	Англия	11,1	2,29	2,40	22
Диатомит	Онтарио, Орегон	73,5	0,45	1,18	35
Диатомит	Петюксент, Мэриленд	59,2	0,64	1,23	35
Гипс (испытан на крутильных весах)			2,2		26
Гипс и ангидрит, соляной купол (испытаны на крутильных весах)			2,6		26
Лигнитовый бурый уголь			1,12—1,30		26
Магнезит, миоцен (?)	Овертон, Невада		2,10—2,25		13
Фосфат, верхнемиссисипский и пермский	Вайоминг, Юта и Айдахо		2,86—2,93		19
Поташ (испытан на крутильных весах)			1,6		26
Каменная соль (испытана на крутильных весах)			2,1		26
Туф			1,80		26
Песчаник					
Эффайэмский конгломерат, нижнемеловой	Квадрат Эфтон, Вайоминг*	13,2	2,31	2,44	
Песчаник, формация Вайен, меловой		7,7	2,45	2,53	
Песчаник, формация Бир-Ривер, верхнемеловой		13,8	2,32	2,46	
Песчаник, формация Фронтиер, верхнемеловой		17,1	2,30	2,47	
Красный песчаник, из свиты глинистого сланца Сри-Форкс, девонский		6,4	2,62	2,68	
Кварцит, песчаник Наггет, юрский		8,2	2,46	2,54	

Продолжение табл. 6—II

Характер и возраст отложений	Местонахождение	Пористость, %	Объемный вес в сухом состоянии	Объемный вес в состоянии насыщения H_2O	Ссылка
Кварцит Свэн-Пик, ордовичский	Квадрат Эфтон, Вайоминг *	2,0	2,56	2,58	
Кварцит, формация Веллс, каменноугольный		15,1	2,27	2,42	
Кварцит, формация Бир-Ривер, верхний мел		7,16	2,48	2,55	
Прейский песчаник, юра		3,4	2,59	2,62	
Песчаник вулканический, юра		5,0	2,58	2,63	
Глина					
Песчаная глина, формация Найт, эоценовая	Квадрат Эфтон, Вайоминг *	23,1	1,99	2,22	
Глина, формация Фронтиер, верхнемеловая		22,1	1,89	2,11	
Темная глина, формация Вайэн, меловая		25,3	1,80	2,05	
Мергель, четвертичный		60,6	0,98	1,59	
Глинистый сланец					
Аргиллит, формация Гиллиард, верхнемеловой	Квадрат Эфтон, Вайоминг *	13,9—26,8	1,98—2,28	2,25—2,42	
Аргиллит, Адавильская формация, верхнемеловой		23,0	2,07	2,30	
Аргиллит, Вайенская формация, меловой		28,6	1,90	2,19	
Глинистый сланец Энкери, триасовый		9,2	2,40	2,49	
Глинистый сланец Вудсайд, триасовый		16,1	2,24	2,40	
Алевролит, формация Найт, эоценовый		11,1—15,4	2,32—2,43	2,47—2,54	
Алевролит, формация Бир-Ривер, верхнемеловой		7,4	2,47	2,54	
Глинистый сланец Адавильская формация, верхнемеловой		11,9	2,34	2,46	
Глинистый сланец, формация Гросвентр, кембрийский		11,1	2,38	2,49	

Продолжение табл. 6—II

Характер и возраст отложений	Местонахождение	Пористость, %	Объемный вес в сухом состоянии	Объемный вес в состоянии насыщения H_2O	Ссылка
Черный глинистый сланец, формация Бир-Ривер, верхнемеловой.....	Квадрат Эфтон, Вайоминг*	1,3	2,64	2,65	
Известняк					
Сейнский известняк, триасовый.....	Квадрат Эфтон, Вайоминг*	0,7	2,65	2,66	
Галлатинский известняк, кембрийский		8,6	2,61	2,70	
Известняк Твин-Крик, юрский		0,2	2,75	2,75	
Росс-Форкский известняк, триасовый .		7,0	2,52	2,59	
Известняк, формация Грос-Вентр, кембрийский		11,0	2,40	2,51	
Петерсонский известняк, нижнемеловой		9,5	2,45	2,54	
Медисонский известняк, каменноугольный.....		3,6	2,61	2,65	
Брезерский известняк, каменноугольный.....		4,0	2,64	2,68	
Известняк Гарден-Сити, ордовичский		0,4	2,76	2,76	
Сейнский известняк, песчанистый, триасовый.....		8,3—8,7	2,46—2,47	2,55	
Песчанистый известняк, формация Бир-Ривер, верхнемеловой.....		4,6	2,61	2,66	
Песчанистый известняк, формация Дайнвуди, триасовый.....		12,9	2,42	2,55	
Свита Рекс кремнистого сланца, формация Фосфория, пермская.....		17,0	2,33	2,50	
Бигхорнский доломит, ордовичский		8,6	2,59	2,68	
Джефферсонский доломит, девонский .		6,2	2,65	2,71	
Конгломерат, формация Олми, эоценовый.....		25,0	2,00	2,25	
Конгломерат, формация Бир-Ривер, верхнемеловой....		12,9	2,28	2,41	

Продолжение табл. 6—II

Характер и возраст отложений	Местонахождение	Пористость, %	Объемный вес в сухом состоянии	Объемный вес в состоянии насыщения H_2O	Ссылка
Фосфатный аргиллит, формация Фосфория, пермский	Квадрат Эфтон, Вайоминг *	17,7	2,25	2,43	
Илистый пепел, четвертичный		55,7	1,14	1,70	
Травертин, четвертичный		47,0	1,42	1,89	
Окремненный туф, Эспенский глинистый сланец, верхнемеловой		7,5	2,48	2,56	
Базальт		18,7	2,39	2,58	

* Породы собраны В. В. Рубей и определены П. Г. Наттинг (неопубликованные результаты).

Примечание. Данные для пористости и объемного веса взяты главным образом из недавно опубликованных определений. Из более ранних определений в таблице даны величины (см. ссылки 3, 4 и 6), которые казались характерными и которые, таким образом, позволяют делать ограниченные сравнения с более новыми данными.

Старые данные приблизительно дают *доступную пористость*, т. е. они измеряют объем взаимосвязанных пор, которые имеют доступ к поверхности материала.

Величины объемного веса и пористости для каждого из подразделений в группах таблицы расположены в алфавитном порядке местонахождения. За ними следуют величины, не приуроченные к определенному месту. В некоторых случаях в конце групп включено несколько метаморфических пород.

Уравнение, связывающее удельный вес минеральных зерен, общую пористость и объемный вес, следующее: $P_T\ (\%) = 100\left(1-\frac{\gamma_B}{\gamma_g}\right)$,

в котором P_T — общая пористость; γ_g — удельный вес минеральных зерен в образце; γ_B — кажущаяся плотность (объемный вес) сухого образца. Если известны какие-либо два члена, то третий легко можно получить из уравнения.

Кажущуюся плотность породы, насыщенную водой (вероятное условие большинства глубоко залегающих пород), можно определить путем добавления соответствующего количества воды к величине γ_B. Пример: γ_B = объемный вес (сухой) = 2,06; пористость = 22%; удельный вес воды = 1,0; объемный вес (влажной) = 2,06 + + 0,22 = 2,28.

Таблица содержит несколько результатов для совсем недавно отложившихся осадков. Несколько добавочных цифр могут представить особый интерес. Шоу [28] приводит в качестве примера водосодержания различных илистых отложений вдоль морского побережья, цифры от 40 до 50% и даже свыше 90%. Мейнцер [20], цитируя Шоу, устанавливает, что «большая часть недавно отложившегося материала в дельте Миссисипи имеет пористость от 80 до 90%». Люис [18] упоминает, что образцы ила со дна реки Гудзон содержали от 77,15 до 88% воды по объему. Эзи [1] нашел, что остаточные отложения, образовавшиеся от выветривания сланцев в окрестностях Понка-Сити, Оклахома, обладают в сухом состоянии пористостью от 37 до 48% и имеют объемный вес от 1,39 до 1,72 в сухом состоянии и от 1,52 до 1,85 во влажном состоянии.

Сводка некоторых работ по пористости дана Гедбергом [12]. У Фуллера [8] есть таблица, в которой максимум, минимум и средние величины даны по работам Беклея, Мерилла, Делессе, Гейки и Кинга. Вся последняя группа пользовалась методом, при котором образец для определения пористости и объемного веса насыщался водой. Дэвид Уайт [36] дает краткую таблицу плотности и удельного веса песчаных и глинистых отложений, полученных частично от лаборатории Геологического комитета, частично — из работ других лиц. Еще позже Фэнчер, Люис и Бэрнс [6] и Бэрб

и Брэнсен [2] произвели многочисленные испытания пористости нефтеносных песков. Насколько автору известно, они еще не опубликовали данных о плотности сложения или об объемном весе ни по одному из испытаний; но приближенные величины объемного веса были вычислены Мельхером [21] при использовании удельного веса минералов или плотности зерен. Мускет [23] широко цитирует результаты испытания пористости [6 и 2]. Другая большая группа определений свободной пористости, основанная на использовании воздуха под давлением и измерении его конечного объема при атмосферном давлении для определения истинного объема образца, не дает плотности сложения или объемного веса [32].

Описание и сравнение методов определения пористости даны в большом обзоре и в таблице Ниссэна [24]. Мускет [23] также сравнивает точность полученных результатов и методов, использованных для определения общей и эффективной пористости в отдельных таблицах; с одной стороны, он сравнивает метод Мельхера — Наттинга с методом Ресселя; с другой стороны, — метод Уошберна — Бантинга с методом Бэрнса.

Исследования Дейя, Сосмена и Гоштеттера [5] при высоких температурах и недавние результаты Гонесса и Гейля [15] выдвигают спорный момент, относящийся к нагреванию образца до высокой температуры с целью удаления органического вещества и поглощенной воды перед определением пористости. Эта процедура нагревания образца, до того как определены его объемный вес и пористость, была предложена Наттингом [25]. В детальном исследовании сланца для Рубея [27] Наттинг указывает на то, что объемный вес сланца, насыщенного водой, необычайно постоянен в пределах температуры от 27 до 260° С, но начиная с 260 и до 850° С, вероятно, происходит изменение составных частей, вызывающее большую потерю с соответствующим изменением структуры и объемного веса образца. Потери, имевшие место при сушке некоторых образцов при повышенных температурах, даны в табл. 7—II.

Теоретические основы пористости для идеализированных условий, разработанные Слихтером [29], были расширены Смисом, Футом и Базенгом [30], а также Грейтоном и Фрезером [10].

Тиккелл, Метчем и Мак Керди [33] изучали зависимость пористости от соотношения размеров зерен в двойных и тройных смесях несцементированных песков и графически показали связь между степенью окатанности зерен и пористостью. Эзи [1], Гедберг [12] и Рубей [27] указывают на зависимость между глубиной и объемным весом и между пористостью и глубиной; ими составлено уравнение, выражающее эти зависимости для сланца. Уплотнение и закрытие для случая погребенных структур обсуждались Гедбергом [12].

Питерс и Эзи [1] представили более разработанную математическую трактовку этой проблемы. Действие, которое может оказывать на пористость падение пластов, обсуждалось Рубеем [27], Бачер, Сом и Чемберлен [4] изучали корреляцию гравитационных аномалий, объемный вес и геологию в районе Биртус — Бигхорн, но количественные результаты анализов, числом около 200, еще не опубликованы. Траск [34] экспериментально показал зависимость между первоначальным содержанием воды и текстурой осадка.

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 6—II

1. Athy, Bull. Am. Assoc. Petr. Geol., 14, I, 1930.
2. Barb, Branson, compiled in Ref. 19.
3. Brantner, Bull. Am. Assoc. Petr. Geol., 21, 67, 1937.
4. Bucher, Thom, Chamberlin, Geol. Soc. Am. Bull. 45, 167, 1934.
5. Day, Sosman, Hostetter, Am. Journ. Sci., 37, I, 1914.
6. Fancher, Lewis, Barnes, Min. Ind. Exp. Sta. Penn State Coll. Bull. 12, 1933.
7. Fishel, личное сообщение.
8. Fuller, U. S. Geol. Survey Water Supply Paper, 160, 59, 1906.
9. Gary, Mitteilungen a. d. Kgl. Techn. Versuchsanstalten zu Berlin, 1898.
10. Graton, Fraser, Journ. Geol., 43, 785, 1935. Fraser, idem. 910—1010, 1935.
11. Gilluly, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 173, 104, 1932.
12. Hedberg, Bull. Am. Assoc. Petr. Geol., 10, 1035, 1926.
13. Hewett и др., U. S. Geol. Survey Bull. 871, 132, 1936. (Определения P. G. Nutting.)
14. Holmess, Petrographic methods and calculations I, 52, 1921. Thos. Murby and Co.
15. Honess, Heyl, Min. Ind. Exp. Sta. Penn State Coll. Bull. II, 93, 1932.
16. Kessler, Tech. Papers U. S. Bur. Stds. No. 123, 54, 1919.
17. Lane, Bull. Geol. Soc. Am., 33, 353, 1922.
18. Lewis, Bull. Geol. Soc. Am., vol. 35, 563, 1924.
19. Mansfield, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 152, 208, 1927.
20. Meinzer, U. S. Geol. Survey Water Supply Paper 489, 8, 1923.

21. Melcher, Trans. Am. Inst. Min. Met. Engrs., 65, 469, 1921. Bull. A. A. P. G., 8, 716, 1924.
22. Moore, Proc. Geol. Soc. Liverpool, 9, 129, 1902; 9, 247, 1903.
23. Muskat, Petrographic methods and calculations, Its edition, McGraw-Hill Book Co., pp. 103—109, 1937.
24. Nissan, Pt. I, Journ. Inst. Petr. Techn., 24, 351, 1938; Pt. II, idem., 370, 1938.
25. Nutting, Bull. Am. Assoc. Petr. Geol., 14, 1337, 1930.
26. Цитировано Reich; Eigenschaften der Gesteine, in Handbuch der Geophysik; Gutenberg etitor; Bd. 6, Lfg., I, 5, 1931.
27. Rubey, U. S. Geol., Survey Prof. Paper 165A, 54, 1930. (Определения P. G. Nutting.)
28. Shaw, Am. Inst. Min. Engr. Bull., 103, 1451, 1915.
29. Slichter in Nineteenth. Annual Report of the U. S. Geol. Survey. 2, 295, 1897—98.
30. Smith, Foote, Busang, Phys. Rev. 34, 1271, 1929.
31. Stearns, U. S. Geol. Survey Water Supply Paper 596, 121, 1927.
32. Taliaferro, Johnson, Dewees, Repts. of Investigations, No. 3352, U. S. Bur. Mines, 22, 1937.
33. Tickell, Mecham, McCurdy, Trans. A. I. M. E. 103, 250, 1933.
34. Trask, Am. Assoc. Petr. Geol., Bull. 15, 271, 1931.
35. Неопубликованные результаты P. G. Nutting, U. S. Geol. Survey (из личного сообщения).
36. White, Geol. Soc. Am. Bull. 35, 202, 1924.

Таблица 7—II

Потери в весе в результате высушивания при повышенных температурах*

(*Г. С. Спайсер*)

Характер отложения	Температура сушки, °С		Потери при прокаливании, %	Примечание
	низкая	высокая		
Диатомит	30	800	5,8—7,2	
Фуллерова земля	30	800	54,0	Насыщена водой в грунте
Фуллерова земля	30	800	44,0	Комнатное высушивание при 30°С
Глобигериновый ил	50	800	36,9	
Донный осадок Атлантического океана	160	800	9,8—17,5	3 образца
Формация Темблор	30	800	1,1— 3,6	Кеттлмен-Хиллс, Калифорния
Формация Доменджайн	30	800	1,1— 2,5	Кеттлмен-Хиллс, Калифорния
Песчаник Орискени	30	800	0,4	Округ Кеневэ, Зап. Виргиния
Газоносный песчаник	30	800	0,4	Джэксон, Миссисипи
Песчаник Медайне	30	800	1,0	Уайт, округ Эри, Нью-Йорк
Карлейльский глинистый сланец	27	850	18,4	(Ссылка 14, табл. 6—II)

* Из неопубликованных материалов П. Г. Наттинга.

ГЛАВА III

ПЛОТНОСТЬ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ; ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ

Содержание

Таблица 1—III. Термическое расширение отдельных кристаллов 44
» 2—III. Термическое расширение кварца 47
» 3—III. Плотность при высокой температуре, жидкое и кристаллическое состояния 48
» 4—III. Плотность и термическое расширение некоторых промышленных стекол при высокой температуре 49
» 5—III. Термическое расширение горных пород 50

ВВЕДЕНИЕ

Нижеследующие таблицы содержат данные о термическом расширении некоторых природных веществ вместе с немногими искусственно полученными веществами, такими как сталь и кварцевое стекло, приведенными для сравнения. Включены все минералы, для которых известны данные, относящиеся к высоким температурам, хотя некоторые представляют больший интерес как огнеупорные материалы, чем геологические. Включен также ряд других минералов, термические расширения которых измерялись лишь до 100° С или ниже; однако гораздо более полный список этих последних можно найти в International Critical Tables.

Ввиду обнаруженных многих неправильностей, экстраполяция от этих низких температур до температур, представляющих больший геологический интерес, ненадежна.

В таблицы внесены все данные о термическом расширении от 20° С до указанной температуры в процентах длины или объема при 20° С. Номенклатура в отношении осей, углов и т. д. принята по «Textbook of mineralogy», Dana, New York, 1922.

Для веществ, кристаллизующихся в кубической системе, дано лишь линейное расширение; объемное расширение может быть вычислено в достаточном приближении путем умножения линейного расширения на три. Для других кристаллографических классов приведены как линейные, так и объемные величины. Для тетрагональных и гексагональных минералов изменение температуры искажает первоначальную сферу в эллипсоид вращения, так что объемное расширение для них выражено суммой удвоенного расширения, перпендикулярного оси *c*, и расширения, параллельного оси *c*. Чтобы дать объемное расширение для минералов, относящихся к системам более низкой симметрии, необходимо измерение линейного расширения в трех взаимноперпендикулярных направлениях. В ромбической системе главные оси эллипсоида термического расширения лежат параллельно кристаллографическим осям. Для моноклинной системы две из осей эллипсоида термического расширения могут лежать где-нибудь в плоскости симметрии, тогда как для случая триклинной системы отношение эллипсоида расширения к кристаллографическим осям совершенно невозможно предсказать. Кроме того, эллипсоид термического расширения не обязательно имеет отношение к оптическим осям, так что направления максимального и минимального расширений могут быть обнаружены лишь при помощи измерений расширения в нескольких различных направлениях. Это сделано для многих моноклинных минералов, но, повидимому, никто еще не разработал метода для триклинных. Однако, учтя, что объем эллипсоида определяется исходя из любых трех прямоугольных радиусов, объемное расширение минералов низкой симметрии может быть вычи-

слено из суммы трех линейных расширений под прямыми углами друг к другу. Данные линейных расширений приведены здесь даже для тех случаев, когда они не являются главными расширениями, ибо они дают некоторое представление о термическом «двупреломлении». Подробное обсуждение этих вопросов можно найти в книге Wooster «Crystal physics» или в книге Voigt «Lehrbuch der Krystallphysik».

Данные о термическом расширении пород указаны здесь только до 100° С, так как испытание породы, представляющей собой агрегат многих различных анизотропных кристаллов, при высокой температуре и при одной атмосфере давления имеет мало отношения к расширению пород, залегающих даже на средних глубинах. Когда образец породы измерялся в лаборатории, то обнаружилось, что коэфициенты расширения при нагревании и при охлаждении совершенно различны и дают еще более различные результаты при каждом последующем воздействии. Это вызвано неодинаковыми расширениями смежных зерен вследствие различий как по составу, так и в ориентировке. В результате при нагревании породы, зерна с наибольшим термическим расширением приводят к видимому изменению длины всего образца, создавая внутренние трещины и «поры». Таким образом, то, что фактически измеряется, является скорее увеличением пористости, чем подлинным термическим расширением. В земной коре многие факторы стремятся к сведению этого эффекта до минимума. Направления максимальной сжимаемости обычно лежат близко к направлениям максимального термического расширения, так что когда температура и давление одновременно стремятся изменяться в одном и том же направлении, то действия их частично исключают одно другое. Большинство изменений условий внутри Земли проходит медленно, так что при перекристаллизации имеется достаточно времени для того, чтобы разгрузить точки наибольшего напряжения и таким образом закрыть поры. Однако тот факт, что все породы обладают некоторой пористостью, которую в значительной степени можно устранить при давлении около 1000 ат, указывает на то, что такие превращения и компенсации являются неполными. При рассмотрении этих фактов предполагается, что лучшие цифры для среднего расширения любой породы при условиях, существующих глубоко в Земле, могут быть получены приведением к среднему значению объемных расширений минералов, составляющих данную породу. Для среднего линейного расширения эту цифру нужно разделить на три.

В табл. 1—III приведены данные по термическому расширению кристаллов. Линейное термическое расширение кристаллов, за исключением кристаллов кубической системы, зависит от ориентировки в отношении кристаллографических осей.

Таблица 1—III

Термическое расширение отдельных кристаллов

Линейное термическое расширение кристаллов некубической системы зависит от ориентировки по отношению к кристаллографическим осям. Там, где это требуется, ориентировки даны во втором столбце. Величины объемного расширения обозначены сокращенно «об.». В таблице приведено расширение при нагревании от 20° С до указанной температуры. Данные выражены в процентах.

	Ориентировка	Температура, °С						Ссылка
		100	200	400	600	800	1000	
Элементы								
Ag		0,15	0,35	0,78	1,26	1,80		8
		0,04						11
As		0,11	0,26	0,57	0,90	1,26		2
Au		0,15						11
Bi	∥ c	0,11						
	⊥ c	0,37						
	об.	0,02	0,05	0,11	0,19			31
C, алмаз		0,13	0,29	0,64	1,02	1,44		8
Cu		0,12	0,25	0,55	0,90	1,19		3
Fe, чистое		0,11						11
метеоритное		0,09	0,20	0,49	0,81	1,15		27
сталь, 1,2% C		0,01	0,03	0,24	0,57			
инвар, 36% Ni		1,46	3,29					30
Hg (жидкая)	об.	0,09	0,18	0,38	0,58	0,79	1,02	15
Pt		0,65						11
S		0,17						11
Sb	∥ c	0,08						
	⊥ c	0,33						
	об.	0,57	1,16					2
Zn	∥ c	0,14	0,39					
	⊥ c	0,85	1,94					
	об.							
Соединения с галоидами								
AgCl, кераргирит		0,28						9
		0,16						28
CaF_2, флюорит		0,31	0,71	1,66	2,77			8
KBr		0,27	0,63	1,50	2,54			8
KCl, сильвин		0,30	0,68	1,64				8
KI		0,28	0,65	1,54	2,60			8
LiF		0,32	0,74	1,71	2,82			8
NaCl, галит								
Сульфиды								
Ag_3SbS_3, пираргирит	∥ c	0,02						12
	⊥ c	0,16						
	об.	0,34						
$CuFeS_2$, халькопирит		0,14						
FeS_2, пирит		0,07						12
$Fe_{10}S_{11}$, пирротин	∥ c	0,03						10
	⊥ c	0,25						12
	об.	0,53						
HgS, киноварь	∥ c	0,17						
	⊥ c	0,14						
	об.	0,45						6
PbS, галенит		0,15						28
ZnS, сфалерит		0,06						6
Окислы								
Al_2O_3, корунд	∥ c	0,06	0,13	0,30	0,49	0,69	0,89	1
	⊥ c	0,04	0,11	0,28	0,46	0,63	0,82	
	об.	0,14	0,35	0,86	1,41	1,95	2,53	

Продолжение табл. 1—III

	Ориентировка	Температура, °С						Ссылка
		100	200	400	600	800	1000	
Окислы								
Fe_2O_3, гематит	∥ c	0,06						9
	⊥ c	0,06						
	об.	0,19						
Fe_3O_4, магнетит		0,07						9
$FeO \cdot Cr_2O_3$, хромит		0,05	0,12	0,29	0,46	0,65	0,80	1
MgO, периклаз		0,07	0,20	0,46	0,75	1,05	1,35	1
$MgO \cdot Al_2O_3$, шпинель		0,04	0,12	0,29	0,49	0,66	0,85	14
SiO_2, кварц	∥ c	0,08	0,18	0,43	1,02	0,98	0,89	19,33
(α—β переход при 573°С)	⊥ c	0,14	0,30	0,73	1,75	1,72	1,70	
(см. табл. 2—III)	об.	0,36	0,78	1,89	4,52	4,42	4,29	
	об.	0,21	0,74	1,80	5,22	4,80		7
Кварцевое стекло		0,004				0,043	0,056	29
SnO, касситерит	∥ c	0,03						6
	⊥ c	0,03						
	об.	0,09						
Карбонаты								
$CaCO_3$, арагонит	∥ a	0,05	0,13	0,33				17
	∥ b	0,11	0,29	0,74	Превращается			
	∥ c	0,20	0,58	1,39	в кальцит			
	об.	0,36	1,00	2,48				
$CaCO_3$, кальцит	∥ c	0,17	0,45	1,07	1,80			24
	⊥ c	−0,05	−0,13	−0,24	−0,33			
	об.	0,08	0,21	0,60	1,14			
$CaCO_3$, исключительно чистый	∥ c	0,207	0,494					5,6
	⊥ c	-0,038	-0,086					
	об.	0,131	0,322					
Сульфаты								
$CaSO_4.2H_2O$, гипс	∥ b	0,34						
	−51°12′	0,01						10
	до c							
	38°48′							
	до c	0,24						
	об.	0,58						
Нитраты								
$NaNO_3$, натриевая селитра	∥ c	0,89	2,34					5
	⊥ c	0,093	0,203					
	об.	1,076	2,74					
	об.	1,29	3,08					26
Силикаты								
Авгит	⊥ 100	0,03	0,06	0,16	0,29	0,44	0,63	23
	∥ b	0,08	0,19	0,44	0,72	1,03	1,37	
	∥ c	0,04	0,10	0,23	0,36	0,51	0,67	
	об.	0,15	0,35	0,83	1,37	1,98	2,67	
Берилл	∥ c	0,007	0,011					13
	⊥ c	0,027	0,034					
	об.	0,061	0,079					

Продолжение табл. 1—III.

	Ориентировка	Температура, °С						Ссылка
		100	200	400	600	800	1000	
Диопсид	⊥ 100	0,03	0,08	0,20	0,33	0,47	0,62	21
	⊥ 010	0,10	0,25	0,57	0,90	1,27	1,67	
	∥ c	0,02	0,08	0,18	0,30	0,43	0,57	
	об.	0,15	0,41	0,95	1,53	2,17	2,86	
Эпидот	∥ b	0,07						
	81°19′ до c	0,03						
	—8°41′ до c	0,09						
	об.	0,19						
Роговая обманка	⊥ 100	0,05	0,12	0,29	0,48	0,70	0,90	22
	∥ b	0,06	0,17	0,39	0,64	0,89	1,15	
	∥ c	0,05	0,13	0,29	0,46	0,63	0,79	
	об.	0,16	0,42	0,97	1,58	2,22	2,84	
Муллит	∥ c	0,03	0,07	0,18	0,30	0,43		1
	⊥ c	0,02	0,06	0,15	0,24	0,35		
	об.	0,07	0,19	0,48	0,78	1,13		
Оливин	∥ a	0,04	0,10	0,26	0,43	0,58	0,76	25
	∥ b	0,08	0,18	0,43	0,74	1,04	1,36	
	∥ c	0,07	0,18	0,42	0,68	0,92	1,20	
	об.	0,19	0,46	1,11	1,85	2,54	3,32	
Ортоклаз	∥ a	0,12	0,32	0,69	1,08	1,48	1,80	18
	∥ b	0,00	0,02	0,03	0,06	0,09	0,14	
		0,00	0,00	0,05	0,09	0,16	0,27	
	об.	0,12	0,34	0,76	1,23	1,73	2,20	
Плагиоклазы:								
$Ab_{99}An_1$	∥ a	0,09	0,22	0,50	0,83	1,17	1,53	20
	⊥ 010	0,03	0,06	0,16	0,29	0,43	0,61	
		0,03	0,08	0,19	0,32	0,47	0,62	
	об.	0,14	0,36	0,85	1,44	2,07	2,75	
$Ab_{77}An_{23}$		0,04	0,12	0,29	0,49	0,72	0,95	20
		0,02	0,04	0,12	0,21	0,31	0,43	
	⊥ 001	0,03	0,07	0,18	0,30	0,44	0,58	
	об.	0,09	0,23	0,59	1,00	1,47	1,96	
$Ab_{56}An_{44}$		0,04	0,11	0,28	0,48	0,69	0,90	20
	⊥ 001	0,02	0,06	0,13	0,22	0,30	0,40	
		0,04	0,07	0,16	0,25	0,33	0,45	
	об.	0,10	0,24	0,55	0,95	1,32	1,75	
Ab_5An_{95}		0,05	0,14	0,24	0,34	0,46	0,60	20
		0,02	0,04	0,07	0,12	0,19	0,29	
	⊥ 001	0,06	0,15	0,26	0,33	0,45	0,57	
	об.	0,12	0,32	0,57	0,78	1,10	1,45	
Топаз	∥ a	0,03	0,09	0,20	0,35	0,50	0,67	16
	∥ b	0,03	0,07	0,16	0,27	0,40	0,53	
	∥ c	0,04	0,11	0,27	0,46	0,65	0,85	
	об.	0,10	0,27	0,65	1,08	1,56	2,06	28
Турмалин	∥ c	0,08						
	⊥ c	0,06						
	об.	0,20						
Циркон	∥ c	0,03	0,08	0,20	0,34	0,48		1
	⊥ c	0,02	0,05	0,11	0,19	0;28		
	об.	0,07	0,17	0,42	0,73	1,05		
Мусковит (агрегат)	лин.	0,03	0,15	0,37	0,66	1,30	1,55	32

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 1—III

1. Austin, Journ. Am. Cer. Soc., 14, 795, 1931.
2. Austin, Physics 3, 240, 1932.
3. Austin, Pierce,, Trans. Am. Soc. Metals 22, 447, 1934.
4. Austin, Pierce, Journ. Am. Chem. Soc. 55, 6661, 1933.
5. Austin, Pierce, Phys. Rev. 57, 931, 1940.
6. Benoit, Bur. Int. d. Poids et Mes. 6, 1888.
7. Day, Sosman, Hostetter, Am. Journ. Sci. 37, 1, 1914.
8. Euken, Dannohl, Zeit. f. Electrochemie 40, 814, 1934.
9. Fizeau, Comptes Rendus 62, 1101, 1866.
10. Fizeau, Comptes Rendus 66, 1172, 1868.
11. Fizeau, Comptes Rendus 68, 1125, 1869.
12. Fizeau, Bur. d. Long. Annuaire pour l'an 1888.
13. Gehler, Insley, U. S. Bur. Stan. Journ. Res. 9, 35, 1932.
14. Heindl, U. S. Bur. Stan. Journ. Res. 12, 215, 1934.
15. Holborn, Day, Ann. d. Phys. 4, 104, 1902.
16. Kozu, Sci. Rep. Toh. Univ. 3, 3, 161, 1929.
17. Kozu, Kani, Sci. Rep. Toh. Univ. 3, 10, 222, 1934.
18. Kozu, Saiki, Sci. Rep. Toh. Univ. 3, 2, 205, 1925.
19. Kozu, Takane, Sci. Rep. Toh. Univ. 3, 3, 239, 1929.
20. Kozu, Ueda, Proc. Imp. Acad. Japan 9, 262, 1933.
21. Kozu, Ueda, Proc. Imp. Acad. Japan 9, 317, 1933.
22. Kozu, Ueda, Proc. Imp. Acad. Japan 10, 25, 1934.
23. Kozu, Ueda, Proc. Imp. Acad. Japan 10, 87, 1934.
24. Kozu, Ueda, Masuda, Sci. Rep. Toh. Univ. 3, 3, 247, 1929.
25. Kozu, Ueda, Tsumori, Sci. Rep. Toh. Univ. 3, 10, 222, 1934.
26. Kracek, Journ. Am. Chem. Soc. 53, 2609, 1931.
27. Draisin, Ferum 11, 129, 1914.
28. Pfaff, Pogg. Ann. 107, 147, 1859.
29. Randall, Phys. Rev. 30, 216, 1910.
30. Scheel, Phys. Rev. 30, 216, 1898.
31. Joly, Nature 49, 480, 1894.
32. Rieke, Pu Yi Wen., Ber. Deu. Keram. Ges. 20, 43, 1939.
33. Rosenholtz, Smith, Am. Min. 26, 103, 1941.

Таблица 2—III

Термическое расширение кварца

Расширения по отношению к размерам при 20° С.

(*Коцу и Сайики*)

Температура, °С	Изменение длины, %		Изменение объема, %
	∥ оси с	⊥ оси с	
50	0,03	0,07	0,17
100	0,08	0,14	0,36
150	0,12	0,22	0,56
200	0,18	0,30	0,78
250	0,23	0,40	1,03
300	0,29	0,49	1,27
350	0,36	0,60	1,56
400	0,43	0,72	1,87
450	0,51	0,87	2,25
500	0,62	1,04	2,70
525	0,67	1,15	2,97
550	0,75	1,29	3,33
560	0,80	1,36	3,52
570	0,84	1,46	3,76

Продолжение табл. 2—III

Температура, °С	Изменение длины, %		Изменение объема, %
	∥ оси c	⊥ оси c	
Переход α-кварца в β-кварц 573°С			
580	1,03	1,76	4,55
590	1,03	1,76	4,55
600	1,02	1,76	4,54
650	1,02	1,76	4,54
700	1,01	1,75	4,51
750	1,00	1,74	4,48
800	0,97	1,73	4,43
850	0,94	1,72	4,38
900	0,92	1,71	4,34
950	0,89	1,70	4,29
1000	0,88	1,69	4,26

Примечание. Kozu, Saiki, Sci. Rep. Toh. Univ. 3, 239, 1929. Измерения рентгеновскими лучами показывают расширения, приблизительно на 2% меньшие, чем приведенные выше (см. Jay, Proc. Roy. Soc. A142, 237, 1933).

Таблица 3—III

Плотность при высокой температуре; жидкое и кристаллическое состояния

Материал	Температура, °С	Плотность		Разница в плотности*, %	Термическое расширение в жидком состоянии	Ссылка
		кристаллическое состояние	жидкое состояние			
Породы						
Диабаз	1200		2,614		$44 \cdot 10^{-6}$	1
Диабаз, Палисседес	1200	2,89	2,603	9,9	$160(?) \cdot 10^{-6}$	4
Диабаз, Вайнел-Хэвн	1250	2,88	2,64	8,4	$38 \cdot 10^{-6}$	3,8
Диабаз, Олонетц	1200		2,79		$279 \cdot 10^{-6}$	12
Базальт, Закавказье	1250		2,63		$82 \cdot 10^{-6}$	12
Диорит	1250		2,60		$140 \cdot 10^{-6}$	12
Минералы						
Акерманит (синтетический)	1458 (т. пл.)**		2,724		$56 \cdot 10^{-6}$	3
Диопсид (синтетический)	1391 (т. пл.)	3,14	2,671	14,8	$64 \cdot 10^{-6}$	3,9
Плагиоклаз (Ab_{30} An_{70})	1480	2,63	2,519	4,2	$56 \cdot 10^{-6}$	3,8

* Разница в плотности равна разнице плотностей кристаллического и жидкого состояний при указанной температуре, в процентах.

** Т. пл. — точка плавления.

Продолжение табл. 3—III

Материал	Температура, °С	Плотность		Разница в плотности, %	Термическое расширение в жидком состоянии	Ссылка
		кристаллическое состояние	жидкое состояние			
Другие материалы						
Медь	1083 (т. пл.)	8,29	7,96	3,9	$143 \cdot 10^{-6}$	13
Железо, чистое	1535 (т. пл.)	7,30	7,25	1,?	$144 \cdot 10^{-6}$	2,11
LiF	870 (т. пл.)	2,027	1,789	11,8	$147 \cdot 10^{-6}$	5,7
NaCl	804 (т. пл.)	1,904	1,549	18,6	$367 \cdot 10^{-6}$	5,6
$NaNO_3$	308 (т. пл.)	2,122	1,909	10,1	$363 \cdot 10^{-6}$	10,7
KCl	776 (т. пл.)	1,766	1,524	13,6	$402 \cdot 10^{-6}$	5,7
KBr	730 (т. пл.)	2,473	2,122	14,2	$391 \cdot 10^{-6}$	5,7
K_2SiO_3	1050		2,24		$205 \cdot 10^{-6}$	12

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 3—III

1. Barus, U. S. G. S. Bull. 103, 1891.
2. Benedicks, Ericsson, Ericsson, Arch. f. d. Eisenhuttnewesen 3, 473, 1929.
3. Dane, Am. Journ. Sci.
4. Day, Sosman, Hostetter, Am. Journ. Sci. 37, 1, 1914.
5. Eucken, Dannohl, Zeit. Electrochem. 40, 814, 1934.
6. Hanlein, Glastech. Ber. 10, 126, 1932.
7. Jaeger, Zeit. anorg. Chem. 101, 1, 1917.
8. Kozu, Ueda, Proc. Imp. Acad., Japan, 9, 262, 1933.
9. Kozu, Ueda, Proc. Imp. Acad., Japan 9, 317, 1933.
10. Kracek, Journ. Am. Chem. Soc. 53, 2609, 1931.
11. Schmidt, Ergeb. d. Röntgenkunde, Leipzig, 1933.
12. Воларович и Леонтьева (Wolarowitsch, Leontjewa), Zeit. f. anorg. Chem., 225, 327, 1935.
13. Borneman, Sauerwald, Zeit. f. Metallkunde 14, 145, 1922.

Таблица 4—III

Плотность и термическое расширение некоторых промышленных стекол при высокой температуре

Состав, %						Плотность, г/см³		Термическое расширение (объемное)		Ссылка
SiO_2	Na_2O	CaO	Al_2O_3	B_2O_3	PbO	20°C	1200°C	20°C	1200°C	
82,6	17,4					2,37	2,19	23	$114 \cdot 10^{-6}$	3
56,6	43,4					2,583	2,234		$94 \cdot 10^{-6}$	2
63,0	13,6	23,4				2,66	2,61		$48 \cdot 10^{-6}$	3
73,5	16,5	10,0				2,50	2,31	27	$82 \cdot 10^{-6}$	3
70,0	5,1		2,1	16,3	6,1	2,34	2,22	10?	$72 \cdot 10^{-6}$	1

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 4—III

1. Hanlein, Glastech. Ber. 10, 126, 1932.
2. Heidtkamp, Endel, Clastech. Ber. 14, 89, 1936.
3. Li, University of Illinois, Thesis (см. Morey, Свойства стекол).

Таблица 5—III

Термическое расширение горных пород

Температурный интервал 20—100°C

Порода	Количество определений	Среднее значение коэфициента линейного расширения $\frac{1}{L}\frac{\Delta L}{\Delta T}$
Граниты и риолиты	21	$(8\pm3)\cdot10^{-6}$
Андезиты и диориты	4	$(7\pm2)\cdot10^{-6}$
Базальты, габбро и диабазы	10	$(5{,}4\pm1)\cdot10^{-6}$
Песчаники	10	$(10\pm2)\cdot10^{-6}$
Кварциты	2	$11\cdot10^{-6}$
Известняки	20	$(8\pm4)\cdot10^{-6}$
Мраморы	9	$(7\pm2)\cdot10^{-6}$
Сланцы	3	$(9\pm1)\cdot10^{-6}$

Примечание. Пределы включают почти все определенные величины. При составлении этих средних были использованы данные из следующих источников: Wheeler, Trans. Roy. Soc. Canada 3, 19, 1910. Souder, Hidnert, U. S. Bur. Stan. Sci. Paper 352, 1919. Griffith, Iowa Eng. Exp. Sta. Bull. 131, 1937.

ГЛАВА IV

ПЛОТНОСТЬ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ; СЖИМАЕМОСТЬ

Содержание

Таблица 1—IV. Сжимаемость некоторых химических элементов 54
» 2—IV. Сжимаемость химических элементов, кристаллизующихся в кубической системе 55
» 3—IV. Сжимаемость химических элементов, кристаллизующихся в гексагональной и тетрагональной системах 57
» 4—IV. Сжатие и термическое расширение щелочных металлов 58
» 5—IV. Влияние давления на термическое расширение . 58
» 6—IV. Сжатие химических элементов при давлении до 50 000 кг/см² 59
» 7—IV. Сжатие химических соединений при давлении до 50 000 кг/см² 60
» 8—IV. Сжимаемость химических соединений, кристаллизующихся в кубической системе 62
» 9—IV. Сжимаемость химических соединений, кристаллизующихся в гексагональной, тригональной и тетрагональной системах 64
» 10—IV. Сжимаемость химических соединений, кристаллизующихся в ромбической системе 65
» 11—IV. Сжимаемость химических соединений, кристаллизующихся в моноклинной и триклинной системах 67
» 12—IV. Изменение сжимаемости при плавлении 69
» 13—IV. Сжимаемость некоторых искусственных и природных стекол 69
» 14—IV. Сжимаемость горных пород при низких давлениях 70
» 15—IV. Сжимаемость горных пород при высоких давлениях 71

ВВЕДЕНИЕ

Плотность и удельный объем зависят не только от температуры, но также и от напряжения. Система напряжений, создаваемая равномерным давлением во всех направлениях, известна как «гидростатическое» давление; изменение удельного объема или плотности для не слишком больших изменений гидростатического давления может быть выражено единственным коэфициентом — сжимаемостью β, определяемой по формуле:

$$\beta = -\frac{1}{V_0}\left(\frac{dV}{dP}\right)_T = \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{d\rho}{dP}\right)_T,$$

где V_0 — удельный объем, ρ_0 — плотность при 1 ат, а P — давление. Так как величина $\frac{dV}{dP}$ определенно отрицательная, то β — положительное число с размерностью, обратной размерности давления или напряжения. Обычно β зависит от давления и температуры. Величина, обратная β, известна как объемная упругость (или сопротивление сжатию) и обозначается буквой K.

Сжимаемость твердых веществ связана с другими упругими константами и может быть косвенно определена из этих констант, приведенных в V главе. Настоящая глава дает только величины сжимаемости, определенные из наблюдений изменения размеров при применении гидростатического давления.

Две группы методов были использованы для таких определений. В первой — наблюдалось изменение объема системы, состоящей из образца и известного количества жидкости определенной сжимаемости, причем жидкость передает давление на образец. Изменение объема образца представляет собой разность между величиной изменения объема всей системы и величиной изменения объема жидкости. Методами этого типа обычно пользовались Адамс и его сотрудники — Бриджмен, Маделунг, Фукс и Ричардс. Вторая группа включает наблюдения изменений линейных размеров образцов, подвергшихся гидростатическому давлению. Если образец представляет собой изотропное вещество, то для определения изменения его объема достаточно определить изменение линейного размера в одном направлении. Для анизотропных тел необходимо определить линейную сжимаемость не менее чем в трех взаимноперпендикулярных направлениях для того, чтобы дать сжимаемость объема, и не менее чем в четырех направлениях для того, чтобы определить изменение линейных размеров в любом направлении. Измерения линейной сжимаемости были произведены главным образом Бриджменом, который развил и использовал «пьезометр со скользящим контактом»; его методом пользовались Берч и

сотрудники, Слетер и Цисман. Эберт определил изменение длины непосредственно наблюдением в микроскоп через окно в камере давления.

Эти методы, за исключением метода Эберта, дают в опытах «относительные» измерения; то, что определяется, представляет собой лишь разницу между сжимаемостью образца и сжимаемостью стандартного вещества. Все работы при высоком давлении, за исключением оговоренной, зависят, по Бриджмену, от абсолютной величины сжимаемости железа армко, найденной специальными методами. Более ранняя работа осуществлялась при давлениях до 12 000 кг/см²; недавно были сделаны измерения при давлениях до 30 000 кг/см². Разницы небольшие, за исключением цифры, показывающей изменение сжимаемости от давления. Величины, занесенные в таблицы этой главы, были исправлены на новые величины для железа всюду, где требование точности, казалось, оправдывало это небольшое изменение. Независимая величина Эберта для железа, определенная на одном кристалле, довольно близка к величине Бриджмена; его меньший предел давления дает бо́льшую неточность в выражении второй степени.

Для небольших давлений, какими пользовались Маделунг, Фукс (125 кг/см²) и Ричардс (500 кг/см²), обычно достаточно одной константы, чтобы выразить изменение объема; такой константой является первоначальная сжимаемость β_0. Для давлений порядка 10 000 кг/см² (Адамс, Бриджмен, Берч, Слетер) среднее квадратичное выражение давления обычно соответствует данным с достаточной точностью, что дает $-\Delta V/V = aP - bP^2$, где ΔV — изменение объема при изменении давления от 1 ат до давления P, a и b являются «константами» (функциями температуры). Тогда сжимаемость является линейной функцией давления $\beta = a - 2bP$, при $\beta_0 = a$. В нижеследующих таблицах a и b занесены всюду, где они только определялись, при давлении P в барах (1 бар $= 10^6$ дин/см² $= 1{,}01972$ «нормально» кг/см²). Линейная сжимаемость $-\Delta L/L_0$ может быть точно определена выражением того же вида, но с другими значениями констант a и b. При более высоких давлениях среднее квадратичное значение для $-\Delta V/V_0$ обычно не удовлетворяет данным, приводимым в виде таблиц, содержащих относительные объемные изменения при различных давлениях. Приблизительные величины сжимаемости могут быть найдены из этих таблиц, если взять первые разницы относительного изменения объема и разделить их на интервал давления; частное будет сжимаемостью, отвечающей среднему значению интервала давления.

Данные, приведенные для сжимаемости горных пород, требуют некоторого специального разъяснения. В отличие от других материалов (за исключением тех, образцы которых создавались при сжатии порошка в «шлаки»), горные породы являются более или менее слабо сцементированными агрегатами с одной или многими разновидностями кристаллов. Таким образом «поверхность» образца породы является понятием, не совсем определенным, так как оно может означать либо поверхность индивидуальных кристаллов, либо поверхность крупного образца (подобно этому мы имеем разницу между «объемным весом» и плотностью кристалла). Можно наблюдать два вида режима в зависимости от поверхности, на которую будет действовать давление. Наружная поверхность может быть все же точно определена путем заключения образца в гибкий непроницаемый футляр или оболочку. В этом случае под давлением кристаллы будут раздавлены вместе, и наблюденное изменение

объема обычно будет включать количество первоначально «пустого» пространства. Невозможно заставить давление независимо действовать на поверхность кристаллов, не размалывая породы на мелкие обломки; величины, найденные для незаключенных в оболочку пород, должны явиться промежуточными между величинами для образцов, испытываемых в оболочке, и величинами, которые могут быть найдены для индивидуальных кристаллов. В действительности же величины для образцов, испытываемых без оболочки, почти всегда меньше величин для заключенных в оболочку образцов или равны им. Когда измеряются изменения объема при высоких давлениях, разницы, как это показали Адамс и его сотрудники, становятся небольшими. С другой стороны, измерения линейных изменений незаключенных в оболочку образцов пород, проделанные Цисманом, Берчем и Доу, вероятно, более показательны не для пород, а скорее для наименее сжимаемых элементов, которые образуют скелет меньшей сжимаемости, чем сжимаемость вещества в целом. Линейные измерения на «заключенных» породах как будто дают результаты, характерные для всего агрегата, хотя давление на любое индивидуальное зерно может быть далеко не гидростатическим и обычно имеет место некоторая необратимая деформация.

Таблица 1—IV

Сжимаемость некоторых химических элементов

Элемент	Температура, °С	Давление, кг/см²			Ссылка
		4000	8000	12000	
P красный $-\Delta V/V_0$	30	0,0190	0,0342	0,0469	20
($\beta_0=55{,}6\cdot10^{-7}$)	75	0,0189	0,0344	0,0476	
черный $-\Delta V/V_0$	30	0,0095	0,0158	0,0205	
($\beta_0=29{,}6\cdot10^{-7}$)	75	0,0095	0,0158	0,0209	
белый ($\beta_0=205\cdot10^{-7}$)	20				38
S (ромбическая)	(См. табл. 5—IV)				
$-\Delta V/V_0$	30	0,0419	0,0707	0,0949	
	75	0,0466	0,0784	0,1027	20
$-\Delta L/L_0$ (a ось)	30	0,0180	0,0304	0,0412	
	75	0,0190	0,0323	0,0427	
(b ось)	30	0,0165	0,0277	0,0370	
	75	0,0201	0,0334	0,0433	
(c ось)	30	0,0079	0,0143	0,0198	
	75	0,0082	0,0148	0,0203	
Hg (жидкая) $-\Delta V/V_0$	20	0,01485	0,02754	0,03795	15
Ga твердый	20	$\beta_0=20\cdot10^{-7}$			
жидкий	30	$\beta_0=40\cdot10^{-7}$			39

Таблица 2—IV

Сжимаемость химических элементов, кристаллизующихся в кубической системе

$-\Delta V/V_0 = aP - bP^2$, где P в барах (10^6 дин/см^2), а V_0 — объем при 1 ат и 30° С (или комнатной температуре). Пределы давления от 1 до 12 000 бар, за исключением особо оговоренных случаев. $a = \beta_0$ = начальная сжимаемость

Элемент	Температура, °С	$10^7 a$	$10^{12} b$	Ссылка
Al	30	13,65	4,9	16,29
	75	13,98	4,9	
	23	13,78	7,2	9
	163	14,38	5,4	
	435	16,01	4,0	
	20	13,70	3,1	36
Ag	30	10,02	3,7	16,29
	75	10,20	3,1	
	20	10,25	1,9	36
Au	30	5,84	2,0	16,29
	75	5,77	0,8	
	20	5,99	6,3	36
B	30	5,58	0,8	23
Ba	30	103,9	(См.табл. 5—IV)	20
	75	108,4		
C (алмаз)	25	1,8		1,6
Ca	30	58,05	65	16,29
	75	59,6	78	
	(См.табл. 5—IV)			
Cb	30	5,77	0,9	27
	75	5,85	0,9	
Ce	30	46,49	—169	16,20
	75	45,88	—159	
	(около 4000 бар)			
Co	30	5,46	0,8	16,29
	75	5,54	0,8	
Cr	30	5,25	0,9	20,27
	75	5,37	0,9	
Cs	50	710	(См. табл. 4—IV и 5—IV)	19
Cu	30	7,29	1,6	16,29
	75	7,44	1,6	
	20	7,31	2,6	36
Fe	24	5,941	0,83	16,29
		(до 30 000 бар)		32
	30	5,949	0,83	
	75	6,007	0,83	
	20	6,03	1,37	36
Ge	30	14,35	4,8	16,29
	75	14,63	5,7	
I	20	127		38
		(до 500 бар)		
In	(См, табл. 5—IV)			
Ir	30	2,69	0	17
	75	2,82	0,9	
K	45	363,5 (См. табл. 4—IV и 5—IV)		16
La	30	35,78	13,9	16,20
	75	35,66	16,4	

Продолжение табл. 2—IV

Элемент	Температура, °C	10^7a	$12^{12}b$	Ссылка
Li	30	88,59	100	19
	75	91,45	110	
	(См. табл. 4—IV и 5—IV)			
Mn	30	8,03	4,2	23
	75	8,20	3,6	
Mo	30	3,63	—0,3	16,29
	75	3,64	—0,4	
Na	30	159,3 (См. табл. 4—IV и 5—IV)		16
Ni	30	5,35	0,9	16,29
	75	5,41	0,8	
Pb	30	24,15	19,6	16,29
	75	24,77	20,3	
	20	23,54	14,3	9
	143	25,04	13,0	
	221	26,24	16,0	
	20	24,48	14,5	36
	(См. табл. 5—IV)			
Pd	30	5,34	0,9	16,29
	75	5,37	0,8	
Pr	30	34,5	12,2	20
	75	35,3	12,2	
Pt	30	3,63	0,3	16,29
	75	3,67	0,3	
Rb	50	530 (См. табл. 4—IV и 5—IV)		19
Rh	30	3,64	1,5	17,27
	75	3,73	1,5	
Si	20	3,1 (до 500 бар)		38
Sr	30	82,78	103	16,29
	75	83,69	104	
	(См. табл. 5—IV)			
Ta	30	4,84	—1,1	16,29
	75	4,98	—1,0	
Th	30	18,50	12,0	20
	75	18,78	12,5	
Tl	30	35,5		16
	75	37,4		
U	30	9,81	1,9	16,29
	75	9,70	1,3	
V	30	6,17	1,35	20
	75	6,20	1,35	
W	30	3,20	0,1	16,18
	75	3,20	0,2	
(Сталь)	20	6,42	3,2	36
(Манганин)	20	8,41	6,5	36

Таблица 3—IV

Сжимаемость химических элементов, кристаллизующихся в гексагональной и тетрагональной системах

Измерения при давлениях до 12 000 кг/см²; a—начальная сжимаемость, P—в барах

Элемент	Температура, °C	Объемное сжатие $-\Delta V/V_0=aP-bP^2$		Линейное сжатие $-\Delta l/l_0=aP-bP^2$ параллельно оси		перпендикулярно оси		Ссылка
		10^7a	$10^{12}b$	10^7a	$10^{12}b$	10^7a	$10^{12}b$	
As	30	31,6		27		2,3		23,27
Be	30	7,95	2,2	2,23	0,2	2,87	1,2	20,27
	75	8,06	2,3	2,34	0,2	2,87	1,2	
Bi	30	29,70	22	16,22	11	6,74	4,1	16,18
	75	30,44	31	16,10	11,5	7,17	8,2	
	(См. табл. 5—IV)							
C (графит)	20	30						38
Cd	20	22,5		18,3		2,1		16,18
Hf	30	9,15	1,1					21
	75	8,94	1,1					
Hg (твердая)		35						15
Mg	30	30,08	27,5	10,03	6,3	10,03	9,1	16,24,25
	75	30,02	24,0	10,34	7,6	9,84	6,7	
	20	29,67	27,2	9,84	6,7	9,99	8,8	36
Ru	30	3,48	1,7					27
	75	3,51	1,7					
Sb	30	27,48	31,3	16,79	20,8	5,35	4,3	16,18
	75	27,03	24,8	16,68	18,2	5,18	2,6	
	(См. табл. 5—IV)							
Sn (тетрагон.)	30	19,09	12,8	6,84	3,7	6,13	3,8	16,18
	75	19,58	12,9	7,08	3,5	6,25	3,9	
	(См. табл. 5—IV)							
Te	30	51,78	103,6	—4,23	—10,5	28.01	54,3	16,18
	75	51,36	87,5	—5,24	—14,2	28,31	55,2	
	(См. табл. 5—IV)							
Ti	30	8,09	—1,5					23
	75	8,81	3,3					
Zn	30	16,93	8,6	13,76	7,5	1,59	0,26	16,18,31
Zr	30	11,15	6,3					21
	75	11,24	6,8					

Таблица 4—IV

Сжатие и термическое расширение щелочных металлов [19, 28]

Давление, кг/см²	Li		Na		K		Rb	Cs
	$-\Delta V/V_0$ при 0°C	Среднее линейное термическое расширение (0—95°C)	$-\Delta V/V_0$ при 0°C	Среднее линейное термическое расширение (0—95°C)	$-\Delta V/V_0$ при 0°C	Среднее линейное термическое расширение (0—95°C)	$-\frac{\Delta V}{V_0}$ при 50°C	
0		$56 \cdot 10^{-6}$		$71 \cdot 10^{-6}$		$83 \cdot 10^{-6}$		
2 000	0,0164	$51{,}5 \cdot 10^{-6}$	0,0295	$62{,}2 \cdot 10^{-6}$	0,0571	$67{,}0 \cdot 10^{-6}$	0,086	0,102
4 000	0,0320	$47{,}3 \cdot 10^{-6}$	0,0552	$55{,}3 \cdot 10^{-6}$	0,1002	$53{,}8 \cdot 10^{-6}$	0,141	0,161
6 000	0,0466	$43{,}4 \cdot 10^{-6}$	0,0779	$49{,}5 \cdot 10^{-6}$	0,1347	$42{,}7 \cdot 10^{-6}$	0,181	0,204
8 000	0,0606	$40{,}0 \cdot 10^{-6}$	0,0981	$45{,}0 \cdot 10^{-6}$	0,1640	$33{,}6 \cdot 10^{-6}$	0,211	0,240
10 000	0,0739	$37{,}0 \cdot 10^{-6}$	0,1165	$40{,}8 \cdot 10^{-6}$	0,1890	$26{,}0 \cdot 10^{-6}$	0,234	0,269
12 000	0,0866	$34{,}5 \cdot 10^{-6}$	0,1332	$37{,}0 \cdot 10^{-6}$	0,2108	$22{,}0 \cdot 10^{-6}$	0,254	0,294
14 000	0,0984	$32{,}5 \cdot 10^{-6}$	0,1488	$33{,}7 \cdot 10^{-6}$	0,2300	$18{,}3 \cdot 10^{-6}$	0,271	0,317
16 000	0,1094	$30{,}6 \cdot 10^{-6}$	0,1632	$30{,}0 \cdot 10^{-6}$	0,2472	$15{,}5 \cdot 10^{-6}$		
18 000	0,1198	$28{,}8 \cdot 10^{-6}$	0,1767	$26{,}5 \cdot 10^{-6}$	0,2626	$13{,}8 \cdot 10^{-6}$		
20 000	0,1296	$27{,}3 \cdot 10^{-6}$	0,1894	$23{,}3 \cdot 10^{-6}$	0,2767	$12{,}5 \cdot 10^{-6}$		

Таблица 5—IV

Влияние давления на термическое расширение [33]

Соединение	Уменьшение объема в см³ при охлаждении от 20° до —80°C		Отношения данных столбца 3 к данным столбца 2
	при 1 ат	при 50 000 кг/см²	
NaCl	0,0107	0,0048	0,45
NaBr	0,0117	0,0092	0,79
NaI	0,0120	0,0130	1,08 ?
KCl *	0,0101	0,0	0 ?
KBr *	0,0110	0,0012	0,11
KI *	0,0123	0,0038	0,31
RbCl *	0,0186	0,0132	0,71
RbBr *	0,0110	0,0036	0,33
RbI *	0,0165	0,0077	0,47
CsCl	0,0200	0,0118	0,59
CsBr	0,0140	0,0081	0,58
CsI	0,0146	0,0039	0,27

* Включает объемное изменение, связанное с полиморфным превращением.

Таблица 6—IV

Сжатие химических элементов при давлении до 50 000 кг/см²

Комнатная температура [14, 30, 33]

Числа, занесенные в таблицы, соответствуют значениям величин $-\Delta V/V_0$ при указанных давлениях

Давление, кг/см²	Li	Na	K	Rb	Cs	Ca	Sr	Ba
5 000	0,043	0,071	0,116	0,164	0,182	0,031	0,047	0,045
10 000	0,074	0,117	0,183	0,233	0,271	0,058	0,075	0,086
15 000	0,101	0,148	0,230	0,279	0,326	0,082	0,099	0,121
20 000	0,125	0,182	0,268	0,316	0,372	0,103	0,122	0,159
					.....а			
25 000	0,145	0,209	0,301	0,345	0,420	0,122	0,136	0,186
30 000	0,165	0,233	0,329	0,371	0,438	0,139	0,155	0,209
35 000	0,184	0,254	0,353	0,393	0,464	0,155	0,172	0,230
40 000	0,202	0,273	0,375	0,413	0,487	0,171	0,188	0,250
45 000	0,218	0,290	0,396	0,431	0,507	0,188	0,204	0,269

Давление, кг/см²	Sn	Pb	S	Se	Te	Sb	Bi	In
5 000	0,010	0,012	0,0476	0,0490	0,0256	0,0130	0,0144	0,0116
10 000	0,020	0,023	0,0833	0,0893	0,0458	0,0249	0,0278	0,0224
15 000	0,029	0,032	0,1104	0,1226	0,0629	0,0362	0,0407	0,0328
20 000	0,038	0,041	0,1316	0,1490	0,0774	0,0465	0,0524	0,0425
25 000	0,048	0,050	0,1485	0,1702	0,0903	0,0565	0,0639	
							.....в	0,0518
30 000	0,057	0,058	0,1620	0,1865	0,1018	0,0659	0,1565	0,0600
35 000	0,066	0,065	0,1728	0,1987	0,1129	0,0747	0,1619	0,0678
40 000	0,075	0,072	0,1817	0,2081	0,1225	0,0829	0,1661	0,0749
					.....б		.....г	
45 000	0,084	0,079	0,1894	0,2175	0,1817	0,0910	0,1729	0,081
50 000	—	—	0,1961	0,2265	0,1907	0,0986	0,1759	0,0870

[а] Переход при 23 600 кг/см². Сжатия при переходе 0,398; 0,404.

[б] Переход при 40 130 кг/см². Сжатия при переходе 0,1227; 0,1724.

[в] Переход при 27 570 кг/см². Сжатия при переходе 0,0692; 0,1538. Это округленные цифры для непосредственного перехода от I до III. Имеется промежуточная форма II, устойчивая в узких пределах.

[г] Переход при 40 749 кг/см². Сжатия при переходе 0,1676; 0,1700.

Таблица 7—IV

Сжатие химических соединений при давлении до 50 000 кг/см² (23°C; [14, 38]). Цифры, занесенные в таблицу, обозначают — $\Delta V/V_0$

Давление, кг/см²	NaCl	NaBr	NaJ	KCl	KBr	KJ	RbCl
							.....г
10 000	0,0365	0,0430	0,0553	0,0478	0,0547	0,0648	0,1882
					.....б	.....в	
20 000	0,0664	0,0771	0,0974	0,0841	0,1989	0,1970	0,2184
				.....а			
30 000	0,0919	0,1047	0,1294	0,2225	0,2267	0,2296	0,2422
40 000	0,1130	0,1274	0,1538	0,2419	0,2479	0,2532	0,2612
50 000	0,1309	0,1464	0,1728	0,2579	0,2650	0,2715	0,2768

а Переход при 20 060 кг/см². Сжатия при переходе 0,0847; 0,1980.
б. Переход при 18 430 кг/см². Сжатия при переходе 0,0886; 0,1938.
в. Переход при 18 200 кг/см². Сжатия при переходе 0,1049; 0,1899.
г. Переход при 5 000 кг/см². Сжатия при переходе 0,0295; 0,1701.

Давление, кг/см²	RbBr	RbJ	CsCl	CsBr	CsJ	NH_4Cl	NH_4Br	NH_4J*)
	.....д	.....е						
10 000	0,1879	0,1918	0,0479	0,0537	0,0647	0,0489	0,0487	0,0590
20 000	0,2207	0,2315	0,0850	0,0949	0,1120	0,0818	0,0880	0,1019
30 000	0,2462	0,2609	0,1146	0,1274	0,1485	0,1070	0,1203	0,1332
40 000	0,2670	0,2831	0,1387	0,1532	0,1781	0,1278	0,1465	0,1570
50 000	0,2848	0,3009	0,1596	0,1748	0,2025	0,1462	0,1676	0,1775

* Цифры для NH_4J были экстраполированы до 1 ат при использовании переход при 500 кг/см².
д. Переход при 4 600 кг/см². Сжатия при переходе 0,0330; 0,1655.
е. Переход при 4 050 кг/см². Сжатия при переходе 0,0349; 0,1614.

Давление, кг/см²	AgCl	AgBr	AgJ	TlCl	TlBr	TlJ	CaS	CaSe
			.....ж					
10 000	0,0216	0,0215	0,1896	0,0383	0,0426	0,0510	0,0240	0,0190
20 000	0,0401	0,0404	0,2095	0,0688	0,0763	0,0891	0,0421	0,0345
30 000	0,0562	0,0584	0,2257	0,0936	0,1026	0,1173	0,0555	0,0482
40 000	0,0704	0,0743	0,2396	0,1139	0,1224	0,1387	0,0658	0,0605
50 000	0,0838	0,0890	0,2525	0,1313	0,1377	0,1554	0,0740	0,0718

ж Переход при 3 020 кг/см². Уменьшение объема при переходе 0,1630.

Давление, кг/см²	CaTe	SrS	SrSe	SrTe	BaS	BaSe	BaTe
10 000	0,0210	0,0309	0,0213	0,0269	0,0251	0,0251	0,0293
20 000	0,0377	0,0516	0,0380	0,0490	0,0450	0,0449	0,0531
30 000	0,0519	0,0658	0,0525	0,0675	0,0612	0,0610	0,0730
40 000	0,0650	0,0754	0,0653	0,0833	0,0747	0,0745	0,0898
50 000	0,0773	0,0830	0,0775	0,0971	0,0861	0,0882	0,1049
							.....з

з Переход при 50 000 кг/см². Уменьшение объема при переходе 0,0100 +.

Продолжение табл. 7—IV

Давление, кг/см²	PbS	PbSe	PbTe	ZnS	ZnSe	ZnTe	HgS	HgSe
10 000	0,0200	0,0289	0,0255	0,0123	0,0224	0,0226	0,0427	.....о
20 000	0,0383	0,0523	0,0469	0,0231	0,0392	0,0413	0,0682	0,1152
	.....и							0,1378
30 000	0,0752	0,0711	0,0650	0,0328	0,0506	0,0581	0,0854	0,1555
					.....м			
40 000	0,0885	0,0855	0,0802	0,0414	0,0617	0,0740	0,0980	0,1692
		.....к	.....л			.....н		
50 000	0,0988	0,1183	0,0998	0,0495	0,0693	0,0931	0,1085	0,1804

и Переход при 24 680 кг/см². Сжатия при переходе 0,0464; 0,0663.
к Переход при 43 320 кг/см². Сжатия при переходе 0,0903; 0,1067.
л Переход при 41 200 кг/см². Сжатия при переходе 0,0818; 0,0912.
м Переход при 38 470 кг/см². Сжатия при переходе 0,0568; 0,0607.
н Переход при 41 270 кг/см². Сжатия при переходе 0,0763; 0,0812.
о Переход при 7 650 кг/см². Сжатия при переходе 0,0130; 0,1090.

Давление, кг/см²	CO_2	$CaCO_3$	Кварцевое стекло	Диабазовое стекло
5 000	0,091	$0,006_6$	$0,013_7$	$0,011_1$
10 000	0,142	$0,013_0$	$0,027_7$	$0,021_0$
15 000	0,177	$0,019_2$	$0,042_1$	$0,030_0$
		.....п		
20 000	0,206	0,077	$0,057_0$	$0,038_5$
25 000	0,226	0,082	$0,072_4$	$0,046_3$
30 000	0,246	0,087	$0,088_2$	$0,054_3$
35 000	0,262	0,092	$0,104_0$	$0,062_2$
40 000		0,096	$0,116_3$	$0,070_1$
45 000		0,099	$0,128_1$	$0,077_9$
50 000		0,102	$0,139_4$	$0,085_8$

Два перехода между 15 000 и 20 000 кг/см² (см. ссылку 14).

Таблица 8—IV

Сжимаемость химических соединений, кристаллизующихся в кубической системе. $-\Delta V/V_0 = aP - bP^2$, где P дано в барах; a — начальная сжимаемость

Соединение	30°C		75°C		Ссылка
	$10^7 a$	$10^{12} b$	$10^7 a$	$10^{12} b$	
LiF	15,3	7,6			44
	15,20	5,5	15,91	5,7	29
LiCl	34,0	32,3	35,0	32,2	44
LiBr	43,0	50,9	44,6	50,9	44
LiI	60,0	110			26
NaF	21,1	17	21,2	17,5	24
NaCl	42,60	51	44,26	52,6	22,44
NaBr	50,7	63,3	52,5	63,3	44
NaI	70,69				26
$NaClO_3$	50,33	95	53,80	95	23
$NaBrO_3$	44,01	76			23
KF	33,0	31,9	33,2	31,9	44
KCl	56,2	75,1	57,5	75,1	44
KBr	67,0	105,3	68,8	105,2	44
KI	85,3	155,4	87,7	155,4	44
RbCl	66,4		68,8		26
RbBr	79,3	137,2	79,9	137,2	44
RbI	95,6	204	98,6	204	44
CsF	42,33		44,29		26
CsCl	59,40	99,5	61,76	103,8	26
CsBr	70,50	149	73,4	146	26
CsI	85,65	209	88,28	202	26
$AlK(SO_4)_2\,12H_2O$	64,23	119	56,80	95,6	23
$Al(NH_4)(SO_4)_2\,12H_2O$	64,75	105	63,16	103	23
AgCl (20°C)	24				40
AgBr (20°C)	27,4				40
Ag_2S	32,65	49,5	30,87	38,9	29
Аргентит			25,1	33,5	
0°C	30				37
BaF_2	19,64	14	19,95	13,8	24
BaS	29,46	52,8	28,37	62,8	26
$CaCl_2$, 20°C	43,6				43
$CaBr_2$, 20°C	48,4				43
CaO (шлак)	46,6	59,1	47,3	59,5	26
CaS	23,21	39	20,58	25,5	26
CaF_2, флюорит	12,26	6,49	12,59	6,61	12
0°C	12,2				37
0°C	12,6				
$3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 3SiO_2$, андрадит	6,73	0,86	6,70	0,86	13
$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$, гроссуляр	6,0				4

Продолжение табл. 8—IV

Соединение	30°C		75°C		Ссылка
	10^7a	$10^{12}b$	10^7a	$10^{12}b$	
CoAsS, кобальтин	7,67	1,88	7,79	1,88	12
CdF_2	11,20	7,5	11,14	7,4	24
CuCl	25,08	13,3	27,65	23,8	26
CuBr	29,2		32,2		26
CuI	28,02	24,8	30,11	33,5	26
Cu_2O	19,43	19,3	20,38	22,3	26
Fe_3O_4, магнетит	5,47	0,82	5,45	0,82	12
0°C	5,4—5,7				37
FeS_2, пирит	6,80	0,87	6,82	0,87	12
	6,86	0,87	6,81	0,87	12
0°C	7,1				37
25°C	7,1				6
$3FeO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$, альмандин	5,7				4
MgO (искусственный)	5,98	1	6,06	1	26
0°C	7,2				37
$3MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$, пироп (гранат)	5,45	0,91	5,51	0,91	13
NH_4Cl	56,0				34
PbS, галенит	18,69	7,43	18,97	8,41	12
0°C	19,5—19,7				37
SrF_2	16,07	9,4	16,38	9,9	24
$SrCl_2$, 20°C	33,2				43
$SrBr_2$, 20°C	41,1				43
SrS	24,26	38,8	23,60	43,9	26
TiN	3,34	0,87	3,54	0,87	24
TiC	4,77	0,8	4,83	0,8	24
TlCl, 20°C	49				40
TlBr, 20°C	53				40
TlI, 20°C	69				40
ZnS, сфалерит	13,03	1,28	12,79	1,26	12
	(Переход около 9000 бар)				
0°C	12,9—12,2				40

Таблица 9—IV

Сжимаемость химических соединений, кристаллизующихся в гексогональной, тригональной и тетрагональной системах

В этих системах линейная сжимаемость может быть найдена в любом направлении, если известны линейные сжимаемости параллельно и перпендикулярно к главным осям; этих двух сжимаемостей достаточно и для определения объемной сжимаемости, которая может быть также определена непосредственно соответствующими методами. Три вида сжимаемости $-\Delta V/V_0$, $-\Delta L/L_0$ ($\parallel$) и $-\Delta L/L_0$ ($\perp$) выражены все формулой $aP-bP^2$ с соответствующими a и b, приведенными в таблице. P дано в барах.

Соединение	Температура, °С	$-\Delta V/V_0$		$-\Delta L/L_0(\parallel)$		$-\Delta L/L_0(\perp)$		Ссылка
		10^7a	$10^{12}b$	10^7a	$10^{12}b$	10^7a	$10^{12}b$	
AgJ	20	41,1						40
Al_2O_3, синтетический сапфир	30	3,36	(Среднее до 12 000 бар)			1,13		27
	75		Неправильный			1,42		
	0	3,8						37
$3BeO\cdot Al_2O_3\cdot 6SiO_2$, берилл	30	5,403	0,94	2,075	0,24	1,664	0,24	13
	75	5,407	0,94	2,068	0,24	1,669	0,24	
	0	5,7						37
$CaCO_3$, кальцит	30	13,67	3,9	8,22	2,9	2,73	0,24	12
(См. табл. 7—IV)	75	13,93	4,2	8,31	3,2	2,81	0,24	
	0	13,5						37
	25	13,9	(Среднее до 12 000 бар)					
	0	12,2						37
$CaCO_3\cdot MgCO_3$, доломит	30	10,91	4,1	2,45	—0,12	4,231	1,91	13
$3Ca_3P_2O_8\cdot CaF_2$, апатит	75	11,09	3,8	2,54	—0,43	4,277	1,91	
$CdCl_2$	20	59,5						43
$CuFeS_2$, халькопирит	0	12,9						37
H_2O, лед I	—7	120						41
(Для воды см. гл. XIV)								
Fe_2O_3, гематит	0	6						37
$FeCO_3$, сидерит	0	10						37
$FeTiO_3$, ильменит	0	5,6						37
K_2SO_4	25	33,2	38,3					5
$KCl\cdot 2NaCO_3\cdot 9Na_2SO_4$, ганксит	30	24,57	24,5	11,87	12,4	6,35	5,04	13
	75	25,54	26,7	12,58	13,7	6,49	5,39	
	0	13						37
$MnCO_3$, родохрозит	30	39,2	39,2	24,8	23,9	7,22	5,6	23
$NaNO_3$	75	39,3	35,8	23,8	21,7	7,78	4,1	
SiO_2, α-кварц	30	27,06	24,0	7,18	6,2	9,945	7,62	13
	75	27,54	24,7	7,34	6,8	10,107	7,64	6
	20	26,97	20,4					
	0	4,9						37
SnO_2, касситерит	30	4,83	0,92	1,047	0,24	1,90	0,24	13
TiO_2, рутил	75	4,67	0,92	1,100	0,24	1,98	0,24	
	0	5,9						37
Турмалин, черный	30	8,16	1,95	4,86	1,17	1,65	0,24	12,13
	75	8,62	2,15	4,94	1,34	1,85	0,24	
ZnO, цинкит	0	7,8						37
ZnS, вюртцит	0	13,6						37
$ZrO_2\cdot SiO_2$, циркон	0	8,6						37

Таблица 10 — IV

Сжимаемость химических соединений, кристаллизующихся в ромбической системе

Три вида линейной сжимаемости вдоль взаимноперпендикулярных осей были определены лишь в четырех случаях; в ряде других случаев объемная сжимаемость определялась непосредственно. В таблицу включены величины a и b в выражении $-\Delta V/V_0 = aP - bP^2$, за исключением особо отмеченных случаев. P дано в барах.

Соединение	Температура, °С	$10^7 a$	$10^{12} b$	Ссылка
$AgNO_3$	0	36,7		37
$BaCO_3$, витерит	0	20,3		37
$BaSO_4$, барит, объемн.	30	17,60	11,9	13
	75	17,92	12,6	
	0	17,7—18,1		37
$-\Delta L/L_0$ (ось a)	30	5,026	3,22	13
	75	5,133	3,16	
$-\Delta L/L_0$ (ось b)	30	6,816	4,03	
	75	6,880	4,42	
$-\Delta L/L_0$ (ось c)	30	5,760	3,48	
	75	5,904	3,88	
Bi_2S_3, бисмутинит	0	33,2		37
$CaCO_3$, арагонит	0	15,5		37
$CaSO_4$, ангидрит	0	18,4		37
FeAsS, арсенопирит	0	9,9		37
FeS_2, марказит	0	8,2		37
Fe_2SiO_4, фаялит	25	9,1 (среднее до 12 000 бар)		2
Mg_2SiO_4, оливин (форстерит)	25	7,9 (среднее до 12 000 бар)		2,3
$NH_4(NO_3)$	25	66,89	138,6	5
Na_2SO_4, тенардит	25	23,7	23,7	5
$PbCl_2$	20	34		43
$PbCO_3$, церусит	0	19,1		37
$PbSO_4$, англезит	0	19,4		37
Sb_2S_3, стибнит	0	15,0		37
$SrCO_3$, стронцианит	0	17,5		37
$SrSO_4$, целестин, объемн.	0	15,7—16,3		37
	30	15,55	7,61	
	75	15,71	9,16	12

Продолжение табл. 10 — IV

Соединение	Температура, °С	$10^7 a$	$10^{12} b$	Ссылка
$-\Delta L/L_0$ (ось *a*).....	30	6,380	3,33	
	75	6,278	3,69	
$-\Delta L/L_0$ (ось *b*).....	30	4,553	2,20	
	75	4,614	2,03	
$-\Delta L/L_0$ (ось *c*)	30	4,615	1,28	
	75	4,824	2,63	
Топаз, объемн.....	30	6,109	1,06	13
	75	6,075	1,06	
$-\Delta L/L_0$ (ось *a*)	30	2,176	0,24	
	75	2,220	0,24	
$-\Delta L/L_0$ (ось *b*)	30	1,504	0,24	
	75	1,591	0,24	
$-\Delta L/L_0$ (ось *c*).....	30	2,429	0,24	
	75	2,265	0,56	
Энстатит (En_{88}* Fs**$_{12}$)	25	10,1 (среднее до 12 000 бар)		6
Гиперстен ($En_{70}Fs_{29}$).....	25	9,9 (среднее до 12 000 бар)		6

*$En = MgSiO_3$
**$Fs = FeSiO_3$

Продолжение табл. 10 — IV

Сжатие сегнетовой соли при 30°С

Давление *P*, кг/см²	$-\Delta L/L_0$			$-\Delta V/V_0$
	ось *a*	ось *b*	ось *c*	
2,000	0,00245	0,00506	0,00333	0,01080
4,000	0,00460	0,00969	0,00600	0,02016
6,000	0,00651	0,1414	0,00847	0,02885
8,000	0,00843	0,01833	0,01085	0,03716
10,000	0,01029	0,02217	0,01320	0,04501
12,000	0,01209	0,02586	0,01531	0,05237

Таблица 11—IV

Сжимаемость химических соединений, кристаллизующихся в моноклинной и триклинной системах

В моноклинной системе оси b и c взаимно перпендикулярны, но ось a не перпендикулярна к плоскости b—c; для того чтобы получить объемную сжимаемость из линейных измерений, надо измерить линейную сжимаемость в направлении, нормальном к плоскости b—c. Это направление здесь названо направлением Y. Объемная сжимаемость является суммой линейных сжимаемостей в направлениях b, c, и Y. P дано в барах.

Соединение	Температура, °C	$-\Delta V/V_0$		$-\Delta L/L_0$								Ссылка
				ось a		ось b		ось c		ось Y		
		10^7a	$10^{12}b$	10^7a	$10^{12}b$	10^7a	$10^{12}b$	10^7a	$10^{12}b$	10^7a	$10^{12}b$	
Соединения, кристаллизующиеся в моноклинной системе												
$BaCl_2$..... ...	20	27,7										43
$BaBr_2$.....	20	36,6										43
$CaSiO_3 \cdot MgSiO_3$ диопсид	25	10,7		(Среднее до 12 000 бар)								6
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$, гипс	0	25,0										37
$KAlSi_3O_8$, ортоклаз	30	21,23	14,5	10,13	4,8	5,587	4,9	4,678	1,26	10,97	6,94	13
	75	21,16	13,9	10,37	6,2	5,489	3,9	4,684	1,68	10,99	6,94	
$LiAlSi_2O_6$, споду-мен.....	30	7,033	1,49	1,825	0,24	2,496	0,24	2,025	0,24	2,512	0,84	12,13
	75	7,073	2,28	1,851	0,24	2,627	1,03	1,965	0,24	2,481	0,84	
$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$, жадеит	25	7,5		(Среднее до 12 000 бар)								
$PbCrO_4$, крокоит.	30							5,065	3,44			12
	75							5,191	3,90			

Соединение	Температура, °C	$-\Delta V/V_0$		$-\Delta L/L_0$								Ссылка
				ось *a*		ось *b*		ось *c*		ось *Y*		
		10^7a	$10^{12}b$	10^7a	$10^{12}b$	10^7a	$10^{12}b$	10^7a	$10^{12}b$	10^7a	$10^{12}b$	
Актинолит	25	13,0		(Среднее до 12 000 бар)								6
Авгит	25	10,2		(Среднее до 12 000 бар)								6
Виннокислый аммоний	30	49,9	81	8,62	17	13,95	9,1	27,3	47,5			23
	75	51,8	89	9,01	19,6	14,77	11,8	28,0	49,6			
Джефферсонит	30	9,088	3,94	3,143	1,61	3,990	1,32	3,127	2,12	1,972	0,24	13
	75	9,551	5,56	3,498	4,07	4,057	2,00	3,440	3,06	2,055	0,24	
Флогопитовая слюда	25	23,4	18,2									6
Соединения, кристаллизующиеся в триклинной системе												
Микроклин, $Or_{91}Ab_9$	25	19,2	13									6
Олигоклаз, $Ab_{78}An_{22}$	25	17,4	9,1									6
Лабрадор, $Ab_{48}An_{52}$	25	15,0	9,8									4,6

Таблица 12—IV

Изменение сжимаемости при плавлении [34, 35]

В точке плавления сжимаемость жидкой фазы обычно больше, чем сжимаемость твердой фазы, с которой она находится в равновесии. Разница в сжимаемости уменьшается по мере того, как кривая плавления следует к более высоким давлениям. В этой таблице имеются величины разницы сжимаемости твердой и жидкой фазы, как функции давления; температура плавления также является функцией давления (см. главу XII). Сжимаемость жидкой фазы, обозначаемая β_L, и сжимаемость твердой фазы, обозначаемая β_S приводятся в обратных барах; величины, занесенные в таблицу ($\Delta\beta = \beta_L - \beta_S$), также даны в обратных барах. P дано в кг/см².

Элементы и соединения	$10^7 \Delta\beta$				
	$P=1$	$P=3000$	$P=6000$	$P=9000$	$P=12000$
K	48	35	28	21	16
Na	34	18	11	8	8
Bi	0,58				
P (желтый)	44	29	14		
CO_2		102	92	61	36
CCl_4	122	34	34	14	
$SiCl_4$		89	38	17	12 (11 000)

Таблица 13—IV

Сжимаемость некоторых искусственных и природных стекол
$-\Delta V/V_0 = aP - bP^2$ (P дано в барах)

Стекло	Температура, °C	$10^7 a$	$10^{12} b$	Ссылка
Кварцевое (см. табл. 7—IV)	25	31,56		6
	25	26,89	—20,8	5
	30	26,96	—19,7	11
	75	28,25	— 8,8	
	14	26,08	—32,4	9
	283	24,68	—17,4	
	11	25,40	—38	8
	100	25,64	—29	
	247	24,22	—19,4	
	390	24,53	— 7,1	
Пирекс	25	30,45	— 7,1	5
	30	30,37	— 8,6	11,10
	75	30,64	— 6,5	
	5	30,97	— 2,2	8
	100	30,09	— 2,4	
	217	27,86	— 8,3	
	313	27,78	— 8,1	
Обсидиан, Липари	25	30,1 (до 600 бар)		45
	15	27,61		9
	139	27,86 (среднее до 10 000 бар)		
	294	27,46		
Обсидиан, остров Вознесения	30	25,63 (среднее до 10 000 бар)		11
	75	25,57		

Продолжение табл. 13—IV

Стекло	Температура, °C	$10^7 a$	$10^{12} b$	Ссылка
Обсидиан, Иеллоустон	25	28,48	4,8	5,6
Смоляной камень, Мейссен	30	25,40	4,3	11
	75	25,38	4,6	
Тахилит, Торвейг.....	30	19,06	10	11
	75	19,45	10	
Тахилит, Килауэа	30	13,48	8,1	11
	75	13,97		
Тахилит.....	25	14,4		3
Диабазовое стекло, искусственное	0	15,89	6,5	29
	100	16,11	0,4	9
(см. табл. 7—IV)	12	16,03		
	140	16,52 (среднее до 10 000 бар)		
	300	16,22		

Таблица 14—IV

Сжимаемость горных пород при низких давлениях

(Комнатная температура; [45])

β — сжимаемость (в обратных барах) при давлениях, указанных во втором столбце

Порода	Давление, кг/см²	$10^7 \cdot \beta$	
		заключенная в оболочку	не заключенная в оболочку
Гранит, Куинси (с глубины 30 м)	0	75,6	19,2
	120	40,2	18,5
	600	25,3	16,7
Гранит, Куинси (с глубины 84 м)	0	89,9	21,1
	120	50,8	
	600	25,0	
Гранит, Рокпорт.....	0	91,7	19,5
	120	50,4	18,7
	600	26,6	
Норит, Садбери	0	31,5	16,5
	120	22,4	16,3
	600	16,5	15,7
Норит (габбро), Френч-Крик, Пенсильвания	0	59,0	14,0
	120	41,1	13,4
	600	16,6	12,6
Диабаз, Вайнл-Хевн	0	17,1	14,6
	120	15,9	
	720	12,6	
Дунит, Бальзам-Гэп	0		11,2
	120		10,9
	600		9,5
Доломит	0	37,1	11,9
	120	25,4	11,9
	600	14,8	11,9

Продолжение табл. 14 — IV

Порода	Давление, кг/см²	$10^7\ \beta$	
		заключенная в оболочку	не заключенная в оболочку
Кварцитовый песчаник	0	58,7	26,7
	120	42,8	26,5
	600	30,9	26,0
Мрамор, Вэрмонт.....	0	180	13,9
	120	33,1	13,8
	600	15,0	12,6
Известняк, Пенсильвания (каменноугольный)	0	29,2	24,7
	120	27,5	24,5
	600	23,5	24,1
Тальк [10], Ювитт, Сев. Каролина	0		18,6

Таблица 15—IV

Сжимаемость горных пород при высоких давлениях

Данные относятся к комнатной температуре, за исключением случаев, когда температура приведена (см. также табл. 8—V)

β — сжимаемость (в обратных барах) при давлении P

Порода	Давление P, в барах	$10^7\beta$	Ссылка
Гранит, Вестерли(незаключенный)*.	2000	21,2	6
	10000	18,2	
» Вашингтон (незаключенный)	2000	22,3	6
	10000	18,2	
» Стон-Маунтен (незаключенный)	2000	20,6	6
	10000	18,0	
Диабаз, Садбери (незаключенный)...	2000	13,7	6
	10000	12,5	
» Палисэд (незаключенный)...	2000	15,4	6,4
	10000	13,0	
Мэриленд (незаключенный).....	2000	12,3	4
	10000	10,7	
» Уин-Силл (незаключенный).	2000	17,0	4
	10000	12,6	
Базальт, Нью-Джерси (заключенный)	2000	24,2	6
	10000	16,8	
» диабазовый (незаключенный, линейный метод).....	2000	15,4	10
	10000	13,3	
Габбро, Нью-Глазго (заключенный)..	2000	13,4	
	10000	11,3	
Дунит, Бальзам-Геп (незаключенный)	7000	7,9 среднее от 2000 до 12 000 бар	2,3
Мрамор, Колорадо (заключенный)...	7000	13,8	6
Серпентин (незаключенный)	2000	17,9	6
	10000	13,6	

* Имеются в виду условия испытания образца горной породы на сжимаемость: «незаключенный» означает, что в процессе испытания образец породы сжимался непосредственно, без заключения его в эластичную оболочку; «заключенный» — испытание образца в эластичной оболочке. *(Прим. ред.)*

Продолжение табл. 15–IV

Порода	Давление P, в барах	$10^7\beta$	Ссылка
Известняк, Золенгофен (незаключенный, линейный метод).....	6000	13,6 (30°C)	10
	6000	14,2 (75°C)	
Известняк, Золенгофен (незаключенный, линейный метод)	5000	12,9 (6 °C)	
	5000	14,2 (100 °C)	
	5000	16,3 (270 °C)	
	5000	17,1 (476 °C)	

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ IV

1. Adams, Journ. Wash. Acad. Sci. 11, 45, 1921.
2. Adams, Beitr. z. Geophys. 31, 315, 1931.
3. Adams, Gibson, Proc. Nat. Acad. Sci. 12, 275, 1926.
4. Adams, Gibson, Proc. Nat. Acad. Sci. 15, 713, 1929.
5. Adams, Gibson, Journ. Wash. Acad. Sci. 21, 381, 1931.
6. Adams, Williamson, Journ. Franklin Inst. 195, 493, 1923.
7. Adams, Williamson, Johnston, Journ. Am. Chem. Soc. 41, 12, 1919.
8. Birch, Dow, Bull. Geol. Soc. Am. 47, 1235, 1938.
9. Birch, Law, Bull. Geol. Soc. Am. 46, 1219, 1935.
10. Bridgman, Am. Journ. Sci. 7, 81, 1924.
11. Bridgman, Am. Journ. Sci. 10, 359, 1925.
12. Bridgman, Am. Journ. Sci. 10, 483, 1925.
13. Bridgman, Am. Journ. Sci. 15, 287, 1928.
14. Bridgman, Am. Journ. Sci. 37, 7, 1939.
15. Bridgman, Proc. Am. Acad. 47, 347, 1912.
16. Bridgman, Proc. Am. Acad. 58, 166, 1923.
17. Bridman, Proc. Am. Acad, 59, 109, 1923.
18. Bridgman, Proc. Am. Acad. 60, 305, 1925.
19. Bridgman, Proc. Am. Acad. 60, 385, 1925.
20. Bridgman, Proc. Am. Acad. 62, 297, 1927.
21. Bridgman, Proc. Am. Acad. 63, 347, 1928.
22. Bridgman, Proc. Am. Acad. 64, 33, 1929.
23. Bridgman, Proc. Am. Acad. 64, 51, 1929.
24. Bridgman, Proc. Am. Acad. 66, 255, 1931.
25. Bridgman, Proc. Am. Acad. 67, 29, 1932.
26. Bridgman, Proc. Am. Acad. 67, 345, 1932.
27. Bridgman, Proc. Am. Acad. 68, 27, 1933.
28. Bridgman, Proc. Am. Acad. 70, 71, 1935.
29. Bridgman, Proc. Am. Acad. 70, 285, 1935.
30. Bridgman, Proc. Am. Acad. 72, 207, 1938.
31. Bridgman, Phys. Rev. 47, 393, 1935.
32. Bridgman, Phys. Rev. 57, 235, 1940; Proc. Am. Acad. 74, 11, 1940.
33. Bridgman, Phys. Rev. 57, 237, 1940; Proc. Am. Acad. 74, 21, 1940.
34. Bridgman, Phys. Rev. 38, 182, 1931.
35. Bridgman, Phys. Rev. 6, 100, 1915.
36. Ebert, Phys. Zeits. 36, 388, 1935.
37. Madelung, Fuchs, Ann. Phys. 65, 289, 1921.
38. Richards, Journ. Am. Chem. Soc. 37, 1646, 1915.
39. Richards, Boyer, Journ. Am. Chem. Soc. 43, 274, 1921.
40. Rochards, Jones, Journ. Am. Chem. Soc. 31, 158, 1909.
41. Richards, Speyer, Journ. Am. Chem. Soc. 36, 491, 1914.
42. Richards, White, Journ. Am. Chem. Soc. 50, 3290, 1928.
43. Saerens, Bull. Soc. chim. de Belgique 33, 17, 1924.
44. Slater, Phys. Rev. 23, 488, 1924; Proc. Am. Acad. 61, 135, 1926.
45. Zisman, Proc. Nat. Acad. Sci. 19, 666, 1933.

ГЛАВА V

УПРУГОСТЬ (ИСКЛЮЧАЯ СЖИМАЕМОСТЬ)

Содержание

Таблица 1—V. Упругость отдельных кристаллов 77
» 2—V. Крайние величины модуля Юнга и модуля сдвига для отдельных кристаллов некоторых металлов 79
» 3—V. Влияние температуры на упругость кварца . . 80
» 4—V. Упругость поликристаллических металлов при обычном давлении и температуре; влияние давления на жесткость 81
» 5—V. Влияние температуры на упругость поликристаллических металлов 82
» 6—V. Константы упругости горных пород при обычном давлении и температуре 82
» 7—V. Влияние напряжения на модуль Юнга горных пород 89
» 8—V. Влияние напряжения на модуль Юнга и на σ (коэфициент Пуассона) гранита 89
» 9—V. Влияние влажности на скорость продольных волн в амхерстовском песчанике 90
» 10—V. Упругие параметры некоторых горных пород при давлении 4000 кг/см² и температуре 30° С . 90
» 11—V. Жесткость и скорость распространения волн сдвига в горных породах как функция давления 91
» 12—V. Влияние температуры на скорость распространения волн сдвига (V_S) в горных породах при высоком давлении 93
» 13—V. Упругость стекла и стекловатых пород; влияние давления на жесткость 94
» 14—V. Влияние температуры на упругость стекол . . 95
» 15—V. Упругость горных пород по сейсмическим определениям 96

ВВЕДЕНИЕ

Для достаточно малых напряжений требуется не больше двух «констант» упругости для того, чтобы определить упругое поведение однородного, изотропного упругого твердого вещества. Общепринято пользоваться различными парами констант; обычно в лаборатории измеряются модуль Юнга E, модуль сдвига G, коэфициент Пуассона σ и сжимаемость β (или обратная ей величина K — объемная упругость). Между этими константами существуют определенные зависимости, так что если известны две любые константы, все другие могут быть получены. Эти зависимости следующие:

$$\sigma = E/2G - 1,$$

$$E = \frac{3(1-2\sigma)}{\beta},$$

$$\beta = 9/E - 3/G,$$

$$G = \frac{3(1-2\sigma)}{2\beta(1+\sigma)}.$$

Величины β, определенные из изменений размеров под гидростатическим давлением, сведены в таблицы в гл. IV.

Отношения скоростей распространения упругих волн к этим константам упругости приведены в уравнениях:

$$V_P^2 = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} = \frac{K + 4/3\, G}{\rho},$$

$$V_S^2 = G/\rho\ ,$$

где V_P — скорость продольных волн, V_S — скорость поперечных волн, или волн сдвига, в бесконечно простирающейся однородной изотропной среде плотности ρ.

В лаборатории константы упругости могут измеряться статическими или динамическими методами. Статические методы включают определение изменений размеров испытуемых образцов подходящей формы под действием простых известных систем напряжения. В одном из наиболее обычных устройств прямую призму стандартного сечения подвергают одинаковому сжимающему и растягивающему усилию T. Относительное изменение длины вдоль оси испытуемого образца $\Delta L/L_0$, разделенное на усилие T, равно $1/E : \Delta L/L_0 = T/E$. Коэфициент Пуассона может быть получена из того же опыта. Если $\Delta l/l_0$ является относительным поперечным изменением размера, тогда $\sigma = -(\Delta l/l_1)/(\Delta L/L_0)$. E и σ часто получаются из прогиба брусков; G можно получить из скручивания призм или удлинения спиральных пружинок.

Динамические методы обычно требуют определения собственных или резонансных частот вибрации образцов простой геометрической формы, для которых может быть надлежащим образом приложена теория упругости. Наименьшая частота продольной вибрации тонких призм одинакового сечения и длины L, поверхности которых свободны от растяжения, выражаются формулой:

$$f = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Соответственно наименьшая частота крутильной вибрации цилиндров, свободных от растяжения, равна

$$\frac{1}{2L}\sqrt{\frac{G}{\rho}}.$$

Коэфициент Пуассона может быть найден из отношения между обертонами при продольной вибрации. Вибрациями изгиба также можно пользоваться для нахождения E.

Между статическими и динамическими константами существует разница. Первые обычно являются «изотермическими» константами, E_T и т. д., последние приближаются «к адиабатическим» константам, таким, как E_S. Между двумя типами существуют следующие соотношения:

$$\beta_T = \beta_S + \frac{T\alpha^2}{C_P \rho},$$

$$G_T = G_S,$$

$$1/E_T = 1/E_S + \frac{T\alpha^2}{9 C_P \rho},$$

где C_P — теплоемкость на единицу массы, T — абсолютная температура, ρ — плотность, а α — коэфициент объемного термического расширения. За исключением таких веществ, как галоиды щелочей и щелочные металлы, эти разницы при обычных температурах не превышают нескольких процентов.

Предыдущие высказывания имеют силу лишь для однородных изотропных веществ. Их применение к неоднородным поликристаллическим агрегатам, как, например, породам или даже к поликристаллическим металлам, зависит от экспериментального подтверждения этой применимости в большом масштабе. Более или менее удовлетворительно это было осуществлено для структурных металлов, в меньшей мере — для некоторых пород (см. ниже). Упругость отдельных кристаллов может быть определена при помощи главных модулей упругости (обозначенных c_{ij}) или главных упругих коэфициентов (обозначенных s_{ij}). Если известна одна группа, то другая может быть вычислена. Число нужных коэфициентов зависит от симметрии кристалла. По вопросам упругости кристаллов следует обратиться к книге *Voigt*, «Lehrbuch der Krystallphysik», или к книге *Wooster*, «Crystal Physics», В настоящих таблицах принята номенклатура Фогта, которая слегка отличается от номенклатуры Вустера.

Так как упругость обычных металлов широко трактуется в таких стандартных сводках, как International Critical Tables, здесь этому материалу отведено относительно небольшое место, за исключением измерений при высоких температурах или высоких давлениях. Почти все из приведенных здесь определений для металлов были сделаны в связи с исследованиями пород или стекол, и до известной степени они служат для проверки точности остальных измерений. Значительное количество доступных сведений о промышленных стеклах отсутствует; для получения дополнительных сведений рекомендуется работа *Morey*, «The properties of glass».

Упругость пород заслуживает нескольких особых замечаний. Константы упругости структурных металлов почти не зависят от напряжения в рамках технических пределов давления, но ряд исследований показал, что упругость пород в очень большой мере зависит от предела приложенного напряжения. Особенно при небольших напряжениях зависимость между относительным удлинением и напряжением часто бывает не линейной; например, эффективный модуль Юнга, определенный для небольших смещений вблизи смещения равновесия, соответствующего данному напряжению, обычно увеличивается с этим напряжением, иногда очень заметно. Подобные же изменения встречаются и для других констант. Это поведение приписывали первоначальной пористости или пустотам между кристаллами, характерным для большинства пород, залегающих на доступных глубинах или вблизи поверхности. Так как эти пустоты закрываются под давлением (породы по известным причинам почти никогда не испытываются на растяжение), эффективное поперечное сечение испытуемого образца увеличивается. В этом мы можем найти объяснение некоторых расхождений в результатах экспериментаторов, работавших с различными пределами давления. Другие расхождения могут быть вызваны подлинными различиями в веществах, произвольно сгруппированных под одним наименованием; особенно для осадочных пород могут существовать большие различия в зависимости от их геологической истории. Результаты, полученные на непроверенном материале, в обычных условиях могут привести к неправильным выводам при их использовании для геологических или геофизических заключений. В общем не следует использовать ни одной величины, не проверив условий, при которых она была определена.

Библиография была подобрана, имея в виду общее геологическое применение; отсутствует ряд исследований строительных камней, но предполагается, что материал, на котором остановили выбор, достаточно показателен, а тем, кто пользуется строительным камнем, во всяком случае потребовалась бы дополнительная проверка на подлинном материале. Отдано предпочтение работе над достаточно хорошо описанными материалами и исследованиями, показывающими зависимость «констант» от таких переменных величин, какими являются напряжение, давление и температура.

Величины, заключенные в скобках, получены из приведенных непосредственно измеренных констант при использовании отношений, действительных для изотропного, однородного материала.

Таблица 1—V

Упругость отдельных кристаллов

Основные упругие коэфициенты. Единицы в $см^2/дин \cdot 10^{-13}$. Все измерения сделаны при комнатной температуре, исключения отмечены особо.

I. КУБИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Кристалл	s_{11}	s_{12}	s_{44}	Ссылка
Элементы				
Ag	23,2	—9,93	22,9	22
Al*	15,9	—5,80	35,16	9
Au*	23,3	—10,65	23,8	12,22
Cu*	14,91	—6,25	13,28	12
	12,91	—5,23	16,36	16
Fe	7,57	—2,82	8,62	11
	7,65	—2,89	8,95	17
Na* (80°K)	482,6	—208,7	168,5	21
(210°K)	535,4	—232,1	203,7	
Pb*	93	—42,6	69,4	12
W	2,573	—0,729	6,604	26,1
Соединения				
CaF_2, Плавиковый шпат	6,92	—1,49	29,6	25
FeS_2 (Пирит)	2,89	+0,44	9,48	25
*	2,69	—0,17	9,00	36
KBr	31,7	—4,7	161	2
KCl	29,4	—5,3	127	2
	27,4	—1,38	156	25
* (80°K)	21,36	—2,3	150,7	5
* (270°K)	25,23	—3,3	157,3	
KI	39,2	—5,4	238	2
LiF	10,6	—2,9	15,9	23
MgO* (80°K)	3,839	—0,855	6,380	5
(170°K)	3,888	—0,878	6,399	
(270°K)	3,991	—0,922	6,447	
(370°K)	4,109	—0,972	6,502	
(470°K)	4,243	—1,027	6,564	
(560°K)	4,383	—1,085	6,626	
NaBr	40,0	—11,5	75,4	2
NaCl	23	—5	78	2
	24,3	—5,27	78,8	25
(270°K)*	22,08	—4,49	78,26	5
(370°K)*	24,40	—5,43	80,36	
(470°K)*	27,33	—6,62	82,85	
$NaClO_3$	24,60	+12,5	83,7	25
Cu_3Au* 20°C	13,44	—5,65	15,08	28
100°C	13,80	—5,83	15,45	
200°C	14,36	—6,10	15,93	
300°C	15,12	—6,46	16,57	
Переход 387,5°C	17,14	—7,38	17,50	
387,5°C	19,48	—8,52	17,87	
450°C	20,73	—9,12	18,50	

* Динамическое измерение.

Продолжение табл. 1—V

Кристалл	s_{11}	s_{12}	s_{44}	Ссылка
β-латунь ($Cu_{53}Zn_{47}$)* 24°C	38,81			29
121 °C	38,29			
220°C	38,15			
317 C	39,09			
424°C	43,86			
Переход 468 C	49,70			
506°C	50,64			

II. ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Кристалл	s_{11}	s_{33}	s_{13}	s_{12}	s_{44}	Ссылка
Cd	12,9	36,9	—9,3	—1,5	64,0	1,13
Mg*	22,15	19,75	—4,93	—7,7	60,3	10
	20,4	20,4	—5,2	—5,2	87,8	3
Zn	8,23	26,38	—6,64	+0,34	25,0	1,13,15
						24,4
Берилл	4,42	4,71	—0,86	—1,37	15,3	25
SiO_2 (β-кварц) 585°C	9,7	10,53				20
600°C*	8,98	10,27	—2,3		27,95	20,33,34

III. ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Кристалл	s_{11}	s_{33}	s_{13}	s_{12}	s_{44}	s_{66}	Ссылка
Sn	18,5	11,8	—2,5	—9,9	57,0	135	1

IV. ТРИГОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Кристалл	s_{11}	s_{33}	s_{44}	s_{12}	s_{13}	s_{14}	Ссылка
Bi	26,9	28,7	104,8	—14,0	— 6,2	16,0	1
Hg (83°K)	15,4	4,5	15,1	—11,9	— 2,1	—10,0	14
Sb	17,7	33,8	41,0	— 3,8	— 8,5	— 8,0	1
Te	48,7	23,4	58,1	— 6,9	—13,8		1
$CaCO_3$, Кальцит	11,36	17,47	40,31	— 3,74	— 4,32	9,16	25
Fe_2O_3	4,42	4,44	11,93	— 1,02	— 0,23	+0,80	25
SiO_2 α-кварц	12,98	9,90	20,05	— 1,66	— 1,52	—4,31	25
(см. также табл. 3—V)	12,56	9,78			— 1,30		6
	12,72	9,68					7
	12,70	9,71					20
	12,57*	9,71	20,04	— 1,50	— 1,38	—4,24	35
Турмалин	3,99	6,24	15,14	— 1,03	— 0,16	+0,58	25

* Динамическое измерение.

Продолжение табл. 1—V

V. РОМБИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Кристалл	s_{11}	s_{22}	s_{33}	s_{44}	s_{55}	s_{66}	s_{23}	s_{31}	s_{12}	Ссылка
Арагонит	6,97	13,2	12,2	24,3	39,0	23,5	—2,37	+0,43	—3,04	25
Барит	16,45	18,94	10,63	83,9	34,9	36,0	—2,51	—1,92	—8,97	25
Сегнетова соль $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$	51,8	34,95	33,4	79,8	328,0	100,8	—10,3	—21,1	—15,3	27
	46,9	32,0	28,2	60,9	306,4	80,3	+16,8	—21,8	— 8,0	18
Соль Рошелля $NaNH_4C_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$	55,7	38,5	37,3	87,4	359,9	118,4	— 5,0	—34,3	— 8,7	19
Топаз	4,43	3,53	3,84	9,24	7,54	7,64	—0,66	—0,86	—1,37	25

Таблица 2—V

Крайние величины модуля Юнга и модуля сдвига для отдельных кристаллов некоторых металлов

(Комнатная температура; [32])

Выражение изменения модуля Юнга и модуля сдвига в зависимости от направления в кристаллах читатель найдет в ссылке 25 или в книге Wooster «Crystal physics». В настоящей таблице даны только максимальные и минимальные величины для некоторых металлов. В кристаллах кубической системы, включенных в таблицу, модуль Юнга наибольший в направлении тройной оси (через углы куба) и наименьший в направлении, параллельном ребру куба. Жесткость наибольшая для скручивания около направлений, параллельных ребру куба, и наименьшая — для скручивания около тройной оси. Для кристаллов гексагональных углы, приведенные в таблице, дают направления по отношению к оси шестерной симметрии.

Металл	Модуль Юнга, E, единицы в 10^{11} дин·см$^{-2}$				Модуль сдвига (жесткость), G, единицы в 10^{11} дин·см$^{-2}$			
	максимум	направление	минимум	направление	максимум	направление	минимум	направление
КУБИЧЕСКАЯ СИСТЕМА								
Al	7,55	[111]	6,28	[100]	2,84	[100]	2,45	[111]
Ag	11,47		4,31		4,36		1,93	
Au	11,18		4,12		4,02		1,77	
Cu	19,02		6,67		7,55		3,04	
Fe	28,44		13,24		11,57		5,98	
W	39,2		39,2		15,2		15,2	
ГЕКСАГОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА								
Cd	8,14	90°	2,82	0°	2,46	90°	1,80	30°
Mg	5,04	0°	4,29	53,3°	1,80	44,5°	1,68	90°
Zn	12,39	70,2°	3,49	0°	4,87	90°	2,73	41,8°

Таблица 3—V

Влияние температуры на упругость кварца

(ссылка 20; см. также ссылку 35)

$E\parallel = 1/s_{33}$ — модуль Юнга, параллельно оптической оси;

$E\perp = 1/s_{11}$ — модуль Юнга, перпендикулярно оптической оси

Температура, °С	$E\parallel$, дин·см$^{-2}$	$E\perp$, дин·см$^{-2}$	
0	$10{,}297\cdot10^{11}$	$7{,}865\cdot10^{11}$	
100	$10{,}120\cdot10^{11}$	$7{,}836\cdot10^{11}$	α-кварц
200	$9{,}915\cdot10^{11}$	$7{,}796\cdot10^{11}$	
300	$9{,}669\cdot10^{11}$	$7{,}708\cdot10^{11}$	
400	$9{,}336\cdot10^{11}$	$7{,}541\cdot10^{11}$	
500	$8{,}777\cdot10^{11}$	$7{,}061\cdot10^{11}$	Переход от α- к β-кварцу
575	$5{,}9\cdot10^{11}$	$3{,}0\cdot10^{11}$	
600	$9{,}532\cdot10^{11}$	$10{,}709\cdot10^{11}$	
700	$9{,}650\cdot10^{11}$	$11{,}336\cdot10^{11}$	β-кварц
800	$9{,}699\cdot10^{11}$	$11{,}582\cdot10^{11}$	
900	$9{,}718\cdot10^{11}$	$11{,}729\cdot10^{11}$	
1000	$9{,}728\cdot10^{11}$	$11{,}837\cdot10^{11}$	
1100		$1{,}925\cdot10^{11}$	
1200		$11{,}994\cdot10^{11}$	

Было определено изменение с температурой всех упругих коэфициентов s_{ij} кварца в интервале, близком к комнатной температуре. Относительное изменение в миллионных долях на градус Цельсия, обозначенное δs_{ij}, следующее:

δs_{11}	δs_{12}	δs_{13}	δs_{14}	δs_{33}	δs_{44}	Ссылка
12	—1265	—238	123	213	189	30
11,5	—1125	—148	113	180	175	31

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦАМ 1—V—3—V

1. Bridgman, Proc. Am. Acad. 60, 305, 1925.
2. Bridgman, Proc. Am. Acad. 64, 19, 1929.
3. Bridgman, Proc. Am. Acad. 67, 29, 1932.
4. Bridgman, Phys. Rev. 47, 393, 1935.
5. Durand, Phys, Rev. 50, 449, 1936; Rose, Phys. Rev. 49, 50, 1936.
6. Giebe, Blechschmidt, Ann Phys. 18, 417 and 457, 1933.
7. Giebe, Scheibe, Ann. Phys. 9, 39, 1931.
8. Goens, Ann. Phys. 16, 793, 1933.
9. Goens, Ann. Phys. 17, 233, 1933.
10. Goens, Schmid, Phys. Zeit. 37, 385, 1936.
11. Goens, Schmid, Naturwises. 19, 521, 1931.
12. Goens, Weerts, Phys. Zeit. 37, 321, 1936.
13. Gruneisen, Goens, Zeit. f. Phys. 26, 235, 1924.
14. Gruneisen, Sckell, Ann. Phys. 19, 387, 1934.
15. Hanson, Phys. Rev. 45, 324, 1934.

16. Kimura, Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ. 22, 533, 1933.
17. Kimura, Ohno, Sci. Rep. 23, 359, 1934.
18. Mandell, Proc. Roy. Soc. 116, 623, 1927.
19. Mandell, Proc. Roy. Soc. 121, 122, 1928.
20. Perrier, de Mandrot, Comptes Rendus 175, 622 и 1006, 1922; Фредерикс В. К. и Михайлов Г. (Freederiksz, Michailov), Zeit. Phys. 76, 328, 1932; de Mandrot, Helv. Phys. Acta 5, 362, 1932.
21. Quimby, Siegel, Phys. Rev. 52, 665, 1937; 54, 293, 1938.
22. Röhl, Ann. Phys. 16, 887, 1933.
23. Schaefer, Bergmann, Sitz.-Ber. Berliner Akad. 222, 1935.
24. Tyndall, Phys. Rev. 47, 398, 1935.
25. Voigt, Lehrbuch der Kristallphysik, Teubner, Berlin, 1928.
26. Wright, Proc. Roy. Soc. 126, 613, 1929.
27. Mason, Phys. Rev. 55, 775, 1939.
28. Siegel, Phys. Rev. 57, 537, 1940.
29. Rinehart, Phys. Rev. 58, 365, 1940.
30. Mason, Bell System Tech. Journ. 19, 74, 1940.
31. Beckmann, H. F., Tech. u. El. Ak. 44, 145, 1934.
32. Schmid, Boas, Kristallplastizität, Springer, Berlin, 1935, p. 202.
33. Atanasoff, Kammer, Phys. Rev. 59, 97, 1941.
34. Lawson, Phys. Rev. 59, 608, 1941.
35. Atanasoff, Hart, Phys. Rev. 59, 85, 1941.
36. Birch, Bancroft, не опубликована.

Таблица 4—V

Упругость поликристаллических металлов при обычном давлении и температуре; влияние давления на жесткость

Металл	E	G	σ	$\frac{1}{G}\frac{\Delta G}{\Delta P}\cdot 10^6$ (P в кг·см$^{-2}$)	Ссылка
	единицы в 10^{11} дин·см$^{-2}$				
Алюминий*	7,10	2,62	(0,355)	7,61	2
Латунь (70—30)	11,1	4,2	(0,33)		29
Медь*	12,77	4,68	(0,364)	2,71	2
*	12,5	4,59	(0,370)		15
	10,9	4,05	(0,355)		29
Железо*	19,79				23
ковкое	19,37	(7,59)	0,280		1
армко	20,75				30
армко (0°C)*	21,25	8,24	(0,29)		35
Никель*	21,43	8,02	(0,336)	1,82	2
*	21,46				23
				1,8	9
Сталь (буровая штанга)*	20,9	8,11	(0,288)	2,36	2
(струнная проволока)				2,2	9
*	21,3	8,38	(0,270)		15
(0,8% углерода)*	21,49				23
мягкая	21,7	(8,25)	0,317		25
(1,25% углерода)*	20,61	8,08	(0,275)		28

* Динамическое измерение.

Таблица 5—V

Влияние температуры на упругость поликристаллических металлов

E/E_0 — отношение модуля Юнга при температуре t к его величине при 0°C
G/G_0 — отношение модуля сдвига при температуре t к его величине при 0°C

Температура, t, °C	Железо						Алюминий			Медь
	E/E_0*	E/E_0	E/E_0*	E/E_0*	G/G_0*	G/G_0	E/E_0	G/G	G/G_0*	E/E_0*
100	0,977	0,972	0,965	0,971	0,973	0,977	0,94	0,942	0,945	0,970
200	0,946	0,933	0,927	0,937	0,936	0,946	0,89	0,821	0,883	0,941
300	0,909	0,894	0 885	0,902	0,900	0,917	0,73	0,699	0,816	0,912
400	0,870	0,857	0,837		0,860	0,881	0,59	0,578	0,740	0,885
500	0,829	0,807	0,779		0,815	0,758	0,46	0,395	0,657	
600	0,777	0,716	0,713		0,763	0,571		(580°) 0,259	0,562	
700	0,71				0,702	0,466			(610°) 0,553	
800					0,602	0,343			(620°) 0,542	
900					0,570	0,408			(630°) 0.524	
									(640°) 0,498	
									(650°) 0.412	
									(т. пл. 663*)	
Ссылка ...	16**	19	36***	35***	35***	18	19	18	34	16

* Динамическое измерение.
** Мягкая сталь.
*** Железо армко.

Таблица 6—V

Константы упругости горных пород при обычных давлении и температуре

E — модуль Юнга, в дин · см$^{-2}$.
G — модуль сдвига, в дин · см$^{-2}$.
σ — коэфициент Пуассона, без размерности.

Плотность, когда она известна, дана в скобках в первом столбце. Динамические измерения отмечены звездочкой.

Величины G и σ, заключенные в скобки, были получены из измерений при использовании соответствующих уравнений для изотропных веществ. (См. Введение к этому разделу и табл. 10—V и 11—V.)

Порода	E	G	σ	Напряжение или предел напряжения, кг · см$^{-2}$	Ссылка
	единицы в 10^{11} дин · см$^{-2}$				
Гранит					
биотитовый, Питерхед, Шотландия.....	5,71	(2,34)	0,211	70—600	1
биотитовый, Лили-Лейк, Сев. Британия...	5,63	(2,33)	0,198	70—600	1
кварцевый монцонит, Вестерли	5,09	(2,08)	0,220	70—600	1
грубый серый, Куинси, Массачусетс	4,64	(1,92)	0,215	70—600	1
биотитовый, Бавено, Италия	4,71	(1,88)	0,253	70—600	1
биотито-мусковитовый, Стенстед	3,92	(1,56)	0,259	70—600	1
грубый серый, Куинси, Массачусетс	5,68	(2,37)	0,198	70—600	1
Янновитц, Германия	4,15			100—900	8
Дрезден, Германия	4,35			100—900	8

Продолжение табл. 6—V

Порода	E	G	σ	Напряжение или предел напряжения, кг·см$^{-2}$	Ссылка
	единицы в 10^{11} дин·см$^{-2}$				
Куинси, Массачусетс, поверхность (2,66) 1	2,71			3,1	25
	5,08			78,4	
	4,16*	1,97	(0,055)		15
(2,67) 2	2,39			28	25
	4,73			78,4	
	3,76*	1,80	(0,045)		15
(2,63) 7	2,13			11,2	25
	3,98			56	
	3,25*	1,55	(0,048)		15
(2,63) 8	2,38			11,2	25
	4,65			56	
	3,70*				15
Куинси, Массачусетс, с глубины 30 м (2,67) 1	5,18			11,2	25
	5,82			56	
	5,98*	2,78	(0,073)		15
(2,67) 2	4,95			11,2	25
	5,66			56	
	5,93*	2,77	(0,069)		15
(2,66) 3	4,85			11,2	25
	5,77			56	
	6,05*	2,70	(0,118)		15
Куинси, Массачусетс, с глубины 72 м (2,66) 4	3,48			11,2	25
	4,70			56	
	4,67*	2,07	(0,130)		15
(2,66) 5	3,45		0,097	11,2	25
	4,63		0,137	56	
	4,34*	1,87	(0,160)		15
Куинси, Массачусетс, с глубины 23 м (2,65)	4,70*	2,09	(0,124)		6
Рокпорт, Массачусетс, с глубины 30 м (2,65)	3,54		0,096	11,2	25
	4,26		0,116	56	
	4,34*	1,71	(0,180)		15
(2,64) E	3,95		0,086	11,2	25
	4,39		0,109	56	
	5,10*	2,00	(0,144)		15
Вестерли, остров Рой (2,64)	3,99*	1,89	(0,065)		15
Арбакльские горы (2,65)	4,37—4,72*				26
Гранодиорит					
Вестон, Массачусетс (2,63)	6,00*	2,53	(0,187)		4

Продолжение табл. 6—V

Порода	E	G	σ	Напряжение или предел напряжения, кг·см$^{-2}$	Ссылка
	единицы в 10^{11} дин·см$^{-2}$				
Сиенит					
нефелиновый, Монтреал	6,29	(2,51)	0,256	70—600	1
Дрезден	6,71			100—900	8
Фрейталь	6,78			100—900	8
Риза-Гроба	8,63			100—900	8
Онтарио (2,79) 1	*	1,71			3
2	*	1,58			
-порфир, Норанда (2,65)	7,55*	3,29	(0,180)		5
Альбитит					
(2,61)	6,9*	2,8			4
Андезит					
Валькенбург	2,74?			100—900	8
Япония	0,6—4,5				20,21
Анортозит					
Квебек	8,25	(3,28)	0,262	70—600	1
битовнитовый, Стиллуотер (2,74)	*	3,53			4
Мелафир					
Ингенхоль	5,34			100—900	8
Базальт					
Острид	11,15			100—900	8
Базальтовая лава					
Ганнеб. Лей	3,56			100—900	8
Диабаз					
оливиновый, Садбери	9,49	(3,70)	0,284	70—600	1
Нейверк	7,93			100—900	8
Нидеркуннерсдорф	8,72			100—900	8
Вестфилд, Массачусетс (2,95) 1	8,00*				15
2	8,85*				
3	8,68*				
Фредерик, Мериленд, 1	*	3,91			3
3	*	4,20			
оливиновый, Вайнэл-Хевн, Мэн (2,96) 1	10,20		0,271	11,2	25
	10,15		0,271	56	
	10,70*	4,21			15
2	10,25		0,258	11,2	25
	10,04		0,258	56	
	10,54*	4,19			15
3	10,17		0,275	11,2	25
	10,04		0,275	56	
	10,51*	4,17			15
7	*	4,17			3

Продолжение табл. 6—V

Порода	E	G	σ	Напряжение или предел напряжения, кг·см$^{-2}$	Ссылка
	единицы в 10^{11} дин·см$^{-2}$				
Норанда (3,01) 4	9,13*	4,00	(0,184)		5
(2,99) 5	8,21*	3,62	(0,103)		
(2,99) 6	9,82*	4,07	(0,228)		
Метадиабаз					
Норанда (3,04)	11,61*	4,81	(0,217)		5
(2,99)	10,62*	4,42	(0,222)		
Габбро					
Нью-Глазго, Квебек	10,80	(4,38)	0,219	70—600	1
Нейрод	9,14			100—900	8
Гарцбург	9,60			100—900	8
гиперстеновое, Френч-Крик, Пенсильвания					
(3,05) 1	7,27		0,162	11,2	25
	7,67		0,169	56	
	7,81*				15
2	5,84		0,114	11,2	25
	6,15		0,136	56	
	7,11*	3,07			15
3	6,72		0,149	11,2	25
	7,03		0,154	56	
	8,71*	3,54			
Меллен, Висконсин (2,90) 1	*	3,32			15
2	*	3,25			3
Норит					
Садбери, Онтарио (2,87) 1	8,07		0,224	36,5	25
	9,06*				15
(2,86) 2	7,96		0,236	36,5	25
	8,80*				15
(2,92) 3	8,05			36,5	25
	8,86*	3,60			15
(2,84) 4	9,36			36,5	25
	9,40*	3,89			15
Эссексит					
Гора Джонсон, Квебек	6,71	(2,67)	0,258	70—600	1
Бронзитит					
комплекс Стиллуотер (3,27) 1	15,13*	6,54	(0,156)		5
2	15,26*	6,48	(0,177)		
Трансвааль (3,28)	15,57*	6,28	(0,239)		
Дунит					
Новая Зеландия 1	15,2*	6,0	(0,27)		35
2	16,2*	5,8	(0,40)		

Продолжение табл. 6—V

Порода	E	G	σ	Напряжение или предел напряжения, кг·см$^{-2}$	Ссылка
	единицы в 10^{11} дин·см$^{-2}$				
Дунит					
Бальзам-Геп, Нов. Каролина (3,28) 1	9,46*	5,60			3,15
2	14,84*	4,76			
3	*	6,24			
4	*	5,70			
1 L	8,90*				
2 L	11,61*				
Эклогит					
(3,44)	*	5,6			35
(3,28)	*	4,5			35
Мрамор					
Проктор, Вермонт (2,71) 1	3,43		0,141	11,2	25
	4,60		0,190	56	
	4,95*	2,17			15
2	2,32		0,104	11,2	25
	3,99		0,189	56	
	2,80*	1,14			15
3	3,83		0,150	11,2	25
	4,95		0,220	56	
	5,09*	2,23			15
Вермонт, 6 образцов	2,36—6,70*				15
Динан, Бельгия	7,24	(2,98)	0,278	70—600	1
сахаровидный кальцит, Каррара	5,54	(2,17)	0,274	70—600	1
Ратленд	5,54	(2,07)	0,263	70—600	1
серый (2,74)	5,87	2,29	(0,28)		31
белый (2,76)	3,78	1,7	(0,11)		31
Известняк					
Ноксвилл, Теннесси	6,21	(2,48)	0,251	70—600	1
Монтреал	6,35	(2,50)	0,252	70—600	1
Золенгофен (2,60)	5,77	2,31	(0,25)		11
	6,27*				15
углистый, Пенсильвания (2,71)	3,37		0,156	11,2	25
1	4,57		0,193	56	
	5,92*				15
2	7,60		0,270	11,2	25
	7,50		0,302	56	
	8,01*				15
3	6,06		0,177	11,2	25
	7,22		0,193	56	
	7,01*	2,67	(См.	табл. 11—V)	4,15
Иран (2,64—2,70)	5,3—6,4		0,23—0,26		24

Продолжение табл. 6—V

Порода	E	G	σ	Напряжение или предел напряжения, кг·см $^{-2}$	Ссылка
	единицы в 10^{11} дин·см$^{-2}$				
Доломит					
Бейтен, Силезия	8,1—7,6			100	13
Доломит					
Пенсильвания (2,83) 1	7,10*	3,23			15
2	9,30*	3,62			
3	9,16*	3,98			
Ангидрит					
Иран (3,02)	7,2—7,4	(2,81)	0,295		24
Барит					
Кляусталь, Гарц	5,78	2,28	(0,27)		11
Плавиковый шпат					
Штольберг, Гарц	10,25	4,20	(0,22)		11
Песчаник					
кварцитовый, Пенсильвания (2,66) 1	6,36		0,115	11,2	25
	6,65		0,110	56	
	7,15*	3,24			15
2	6,35*	3,10			15
3	5,70*	2,62			15
полевошпатовый, Кливленд, Огайо	1,58	(0,61)	0,290	70—600	1
Хамм, Германия	3,53			100—900	8
(2,50, среднее)	1—2			200	13
Япония	0,05—4				20,21
Бруклин, Массачусетс (2,61)	*	2,41			4
Действие влаги (см. табл. 9—V)					
Кремень					
Рюген	7,45	3,45	(0,08)		11
Сланец					
Пенсильвания (2,78), параллельно плоскости трещиноватости	11,29*	4,65			15
Япония	1—11	0,5—6			20,21
Эверетт, Массачусетс (2,67)	4,87*	2,18	(0,115)		4
аргиллитовый, Бруклин, Массачусетс (2,76)	7,69*	3,48	(0,105)		4
Глинистый сланец					
(2,63)	4,4 сухой			200	13
	1,9 мокрый				
Япония	1,7—4,5				20,21
песчанистый (2,60)	2,3—4,1			100	13
	сухой				
	1,9 мокрый				

Продолжение табл. 6—V

Порода, минерал	E	G	σ	Напряжение или предел напряжения, кг·см$^{-2}$	Ссылка
	единицы в 10^{11} дин·см$^{-2}$				
Кристаллический сланец					
слюдистый, Япония	1,6				20,21
хлоритовый, Япония	4—15				20,21
хлорит-эпидотовый, Массачусетс (2,95)	7,05*	3,15	(0,117)		4
кварц-мусковитовый, Массачусетс (2,70)	5,44*	2,30	(0,181)		4
(2,82)	5,27	2,6	(0,015)		31
Туф					
Япония	0,3—3,6				20,21
Окремнелый вулканический пепел (2,74)	8,15*	3,77			5
Гнейс, гранит					
Пельхем, Массачусетс (2,64)					
1 перпендикулярно гнейсоватости	0,328		0,03	0	25
	0,43		0,03		
	2,84*	1,45			15
2 параллельно гнейсоватости	1,42				
	2,20			11,2	25
	2,20*			56	15
3 параллельно гнейсоватости	1,68		0,086	11,2	25
	2,55		0,146	56	
	2,88*	0,90			3,15
Гнейс					
Хелл-Гет, Нью-Йорк (2,65)					
параллельно гнейсоватости	*	1,64			4
перпендикулярно гнейсоватости	*	1,82			
Пирит					
массивн., Норанда (4,85)	16,49*	7,02	(0,175)		5
Пирротин					
массивн, Норанда (4,59)	8,92*	3,41	(0,309)		5
Магнетит					
массивн., Норанда (4,74)	10,38*	4,47	(0,160)		5
Лед					
(0,917)—5°C	0,917*	0,336	(0,365)		12
—9°C	0,929*				7
—35°C	1,09*				
	0,95—1,10	0,27—0,3			17
Хлористый аммоний					
0°C (1,520)	2,732*	1,095	(0,247)		33

Таблица 7—V

Влияние напряжения на модуль Юнга горных пород

По методу колебаний прогиба нагруженных брусков [29]

E_0 — модуль Юнга при нулевом напряжении (до приложения силы).

E_s — модуль Юнга при напряжении, еще недостаточно большом, чтобы вызвать разрыв (между 500 и 1000 кг/см²).

$\perp$ и $\parallel$ относятся к ориентировке оси бруска по отношению к плоскости напластования.

Порода	Плотность, г/см³	E_0, дин/см²	E_s, дин/см²
Известняк, Бедфорд, Индиана $\perp$	2,23	$2{,}86 \cdot 10^{11}$	$2{,}97 \cdot 10^{11}$
$\parallel$	2,35	$3{,}48 \cdot 10^{11}$	$4{,}07 \cdot 10^{11}$
Мрамор, Денби, Вермонт $\parallel$	2,70	$6{,}01 \cdot 10^{11}$	$6{,}99 \cdot 10^{11}$
$\parallel$	2,70	$6{,}48 \cdot 10^{11}$	$7{,}24 \cdot 10^{11}$
$\perp$	2,70	$4{,}36 \cdot 10^{11}$	$6{,}94 \cdot 10^{11}$
$\perp$	2,70	$3{,}66 \cdot 10^{11}$	$5{,}81 \cdot 10^{11}$
Мрамор, Кокейсвилл, Мэриленд	2,86	$7{,}50 \cdot 10^{11}$	$8{,}84 \cdot 10^{11}$
Песчаник, Брайер-Хилл, Огайо $\perp$ ...	2,03	$0{,}77 \cdot 10^{11}$	$1{,}65 \cdot 10^{11}$
$\parallel$		$0{,}82 \cdot 10^{11}$	$1{,}61 \cdot 10^{11}$
Песчаник, Киббе, Массачусетс $\perp$	2,24	$1{,}17 \cdot 10^{11}$	$2{,}07 \cdot 10^{11}$
$\parallel$	2,21	$1{,}46 \cdot 10^{11}$	$2{,}33 \cdot 10^{11}$
Гранит, Куинси, Массачусетс	2,65	$4{,}32 \cdot 10^{11}$	$6{,}41 \cdot 10^{11}$
Гранит, Рокпорт, Массачусетс	2,62	$4{,}13 \cdot 10^{11}$	$5{,}76 \cdot 10^{11}$

Таблица 8—V

Влияние напряжения на модуль Юнга и на σ (коэфициент Пуассона) гранита

Измерения под статическим осевым сжатием [25].

Порода	Среднее напряжение, кг/см²	E, дин/см²	σ
Гранит, Рокпорт, Массачусетс	0	$3{,}48 \cdot 10^{11}$	0,084
Сжатие, параллельное направлению «наиболее легкого расщепления»	11,2	$3{,}95 \cdot 10^{11}$	
	22,4	$4{,}10 \cdot 10^{11}$	0,093
	44,8	$4{,}35 \cdot 10^{11}$	0,102
	67,2	$4{,}60 \cdot 10^{11}$	0,111
	89,6	$4{,}85 \cdot 10^{11}$	0,120
	112	$5{,}10 \cdot 10^{11}$	0,129
	132	$5{,}35 \cdot 10^{11}$	0,138
	157	$5{,}60 \cdot 10^{11}$	0,149
	179	$5{,}85 \cdot 10^{11}$	0,159
	202	$6{,}10 \cdot 10^{11}$	0,172
Гранит, Куинси, Массачусетс (поверхность)	5,6	$2{,}39 \cdot 10^{11}$	
	11,2	$2{,}58 \cdot 10^{11}$	
	22,4	$3{,}07 \cdot 10^{11}$	
	33,6	$3{,}64 \cdot 10^{11}$	
	56,0	$4{,}05 \cdot 10^{11}$	
	78,4	$4{,}73 \cdot 10^{11}$	

Таблица 9—V

Влияние влажности на скорость продольных волн в Амхерстовском песчанике

(ссылка 4; см. также табл. 6—V)

Скорость V_r является скоростью продольных колебаний в тонком стержне и равна $(E/\rho)^{1/2}$, где E — модуль Юнга, ρ — плотность.

Плотность сухого песчаника = 1,92; пористость = 23%.

% воды по весу	V_r, км/сек
Сухой	2,33
0,21	1,90
0,77	1,65
1,31	1,50
2,08	1,40
3,71	1,37
6,07	1,35

Таблица 10—V

Упругие параметры некоторых горных пород при давлении 4000 кг/см² и температуре 30 °С

Величины для приведенных в таблице G и β вычислены по уравнениям для изотропных веществ. Породы были заключены в оболочки (см. введение к гл. IV; [3]).

E — модуль Юнга, в дин · см$^{-2}$.
G — модуль сдвига, в дин · см$^{-2}$.
β — сжимаемость, в см^2 · дин$^{-1}$.
σ — коэфициент Пуассона.
V_p — скорость распространения волн сжатия (продольных) в бесконечной среде.
V_s — скорость распространения волн сдвига (поперечных) в бесконечной среде.

Порода	E, дин/см²	G, дин/см²	β см²/дин	σ	V_p, км/сек.	V_s, км/сек.
Песчаник, кварцитовый	$9{,}6 \cdot 10^{11}$	$4{,}28 \cdot 10^{11}$	$24{,}0 \cdot 10^{-13}$	0,118	6,08	4,00
Известняк, Золенгофен	$6{,}3 \cdot 10^{11}$	$2{,}47 \cdot 10^{11}$	$21{,}4 \cdot 10^{-13}$	0,276	5,54	3,08
Мрамор, Вермонт	$8{,}7 \cdot 10^{11}$	$3{,}33 \cdot 10^{11}$	$13{,}9 \cdot 10^{-13}$	0,299	6,51	3,49
Гранит:						
Куинси, Массачусетс	$8{,}49 \cdot 10^{11}$	$3{,}45 \cdot 10^{11}$	$19{,}2 \cdot 10^{-13}$	0,229	6,08	3,61
Рокпорт, Массачусетс	$8{,}36 \cdot 10^{11}$	$3{,}36 \cdot 10^{11}$	$18{,}5 \cdot 10^{-13}$	0,243	6,24	3,59
Сиенит, Онтарио	$8{,}04 \cdot 10^{11}$	$3{,}15 \cdot 10^{11}$	$16{,}9 \cdot 10^{-13}$	0,274	6,05	3,36
Норит, Садбери	$9{,}67 \cdot 10^{11}$	$3{,}81 \cdot 10^{11}$	$14{,}4 \cdot 10^{-13}$	0,268	6,49	3,65
Диабаз:						
Вайнал-Хевн	$11{,}40 \cdot 10^{11}$	$4{,}46 \cdot 10^{11}$	$11{,}7 \cdot 10^{-13}$	0,277	6,97	3,88
Мэриленд	$11{,}34 \cdot 10^{11}$	$4{,}42 \cdot 10^{11}$	$11{,}6 \cdot 10^{-13}$	0,281	6,96	3,83
Габбро:						
Меллен, Висконсин	$10{,}43 \cdot 10^{11}$	$4{,}00 \cdot 10^{11}$	$11{,}4 \cdot 10^{-13}$	0,302	6,96	3,71
Френч-Крик, Пенсильван.	$12{,}20 \cdot 10^{11}$	$4{,}80 \cdot 10^{11}$	$11{,}3 \cdot 10^{-13}$	0,270	7,15	3,98
Бронзитит:						
Комплекс Стиллуотер.	$16{,}90 \cdot 10^{11}$	$6{,}86 \cdot 10^{11}$	$9{,}6 \cdot 10^{-13}$	0,230	7,83	4,58
Комплекс Бушвелд	$11{,}00 \cdot 10^{11}$	$6{,}80 \cdot 10^{11}$	$8{,}9 \cdot 10^{-13}$	0,249	7,86	4,55
Дунит, Бальзам-Геп, Новая Каролина	$17{,}30 \cdot 10^{11}$	$6{,}84 \cdot 10^{11}$	$8{,}3 \cdot 10^{-13}$	0,262	8,05	4,57

Таблица 11—V

Жесткость и скорость распространения волн сдвига в горных породах как функция давления [3, 4, 35]

Эти результаты были получены динамическим методом с заключенными в оболочке образцами (см. введение к гл. IV). Все измерения произведены при 30° С.

G — модуль сдвига, в дин · см$^{-2}$ · 10^{11}.

V_S — скорость волн сдвига, или поперечных волн, в км · сек.$^{-1}$.

P — гидростатическое давление, в кг · см$^{-2}$.

Порода	G			V_S		
	P=1	P=500	P=4000	P=1	P=500	P=4000
Гранит:						
Рокпорт, Массачусетс (Н)	1,68	3,09	3,42	2,54	3,44	3,62
(Е).....	1,72	3,02	3,30	2,57	3,40	3,56
Куинси, Массачусетс 30 м1...	2,02	3,15	3,45	2,77	3,47	3,62
72 м4.....	1,68	3,14	3,46	2,52	3,45	3,62
72 м5.....	1,70	3,13	3,41	2,54	3,44	3,59
Вестерли, остров Рой.....	1,37	2,83		2,28	3,27	
Гранодиорит, Вестон, Массачусетс	2,59	3,13	3,37	3,14	3,45	3,58
Тоналит, Вал-Верде, Калифорния	2,69	3,28	3,66	3,12	3,45	3,64
Сиенит, Онтарио 1	1,71	3,00	3,19	2,48	3,28	3,38
2	1,58	2,91	3,10	2,39	3,24	3,34
Альбитит, Пенсильвания 1.....	2,77	2,91	3,07	3,26	3,34	3,43
2.....	2,84	2,91	3,04	3,30	3,34	3,41
3.....	3,02	3,09	3,23	3,40	3,44	3,52
Анортозит, комплекс Стиллуотер	3,55		3,71	3,59		3,68
Норит, Садбери 1	2,87	3,84	4,04	3,16	3,68	3,75
2	2,85	3,59	3,81	3,15	3,54	3,65
Диабаз:						
Вайнл-Хевн, Мэн 5	3,19	4,37	4,53	3,28	3,84	3,91
7.....	4,17	4,30	4,39	3,76	3,81	3,85
Мэриленд 1.....	3,91	4,24	4,42	3,60	3,75	3,83
3.....	4,20	4,32	4,42	3,73	3,78	3,83
Норанда 5	3,70	3,99		3,52	3,65	
(метадиабаз) 3	4,78	4,81	4,93	3,97	3,98	4,03
(метадиабаз) 7	4,44		4,51	3,85		3,89
Габбро:						
Меллен, Висконсин 1.....	3,32	3,86	3,95	3,38	3,65	3,69
2.....	3,25	3,93	4,05	3,35	3,68	3,73
Френч-Крик, Пенсильвания 1	3,48	4,46	4,80	3,39	3,84	3,98
2	3,01	4,43	4,80	3,15	3,82	3,98

Продолжение табл. 11—V

Порода	G			V_s		
	P=1	P=500	P=4000	P=1	P=500	P=4000
Бронзитит:						
Комплекс Стиллуотер 1	6,68	6,81	6,92	4,52	4,56	4,60
2	6,53	6,66	6,80	4,47	4,51	4,56
Комплекс Бушвелд	6,28	6,65	6,80	4,38	4,50	4,55
Эклогит	5,6		6,3	4,04		4,28
Дунит:						
Бальзам-Геп, Новая Каролина 1	5,60	6,40	6,71	4,13	4,42	4,53
2	4,76	6,54	6,94	3,81	4,47	4,61
3	6,24	6,81	7,06	4,37	4,57	4,65
4	5,70	6,12	6,58	4,17	4,32	4,48
Обсидиан, Модок, Калифорния	3,03		2,97	3,52		3,47
Гнейс:						
Пельхем, Массачусетс (парал.)	0,90	2,77		1,84	3,24	
(перпенд.)	0,79	2,62	3,34	1,73	3,15	3,55
Хелл-Гет, Нью-Йорк (парал.)	1,64	2,87		2,49	3,29	
(перпенд.)	1,82	3,08	3,38	2,62	3,41	3,57
биотитовый, Массачусетс	3,40	3,59		3,42	3,51	
Кристаллический сланец:						
хлорито-эпидото-кварцевый	3,35	3,66	4,13	3,37	3,52	3,74
кварцево-мусковитовый 1	2,63	3,36	3,88	3,12	3,53	3,79
2	2,07	3,19	3,70	2,76	3,42	3,68
Песчаник:						
кварцитовый, Пенсильвания 2	3,06	3,98	4,42	3,39	3,87	4,07
3	3,14	3,82		3,43	3,79	
Бруклин, Массачусетс	2,41	2,74		3,04	3,24	
Сланец:						
Эверетт, Массачусетс	2,23		2,72	2,89		3,19
аргиллитовый, Бруклин, Массачусетс	3,48	3,52	3,68	3,55	3,57	3,65
Мрамор, Проктор, Вермонт	1,57	3,18	3,33	2,4	3,42	3,49
Известняк:						
Золенгофен	1,96	2,20	2,47	2,75	2,91	3,08
Пенсильвания	2,67	2,88	3,00	3,15	3,27	3,34
Доломит, Пенсильвания	3,49	4,20		3,5	3,87	

Таблица 12—V

Влияние температуры на скорость распространения волн сдвига (V_S) в горных породах при высоком давлении

При температуре от 30 до 100 или 150° С; [3, 4]

(О влиянии температуры при 1 ат давления см. ссылку 16)

Порода	Давление, кг/см²	$-\frac{1}{V_S}\frac{\Delta V_S}{\Delta T}\cdot 10^6$
Гранит:		
Куинси, Массачусетс 4	4300	45
5	1000	43
Рокпорт, Массачусетс H	4000	37
Гранодиорит	4300	30
Тоналит	4300 и 8600	52
Альбитит 2	4300	77
3	4300	85
Анортозит	4300	45
	8600	35
Норит, Садбери	4000	160
Диабаз:		
Вайнл-Хевн 7	4000	68
Мэриленд 3	4000	49
Норанда 7	4000	68
Габбро:		
Висконсин	4000	116
Френч-Крик, Пенсильвания 2	4000	87
Пироксенит:		
Бронзитит, Монтана 1	4300	84
	8600	62
2	4000	76
Бронзитит, Трансвааль	4000	102
Дунит, Бальзам-Геп 1	4000	208
3	4000	149
4	4000	127
Мрамор, Проктор, Вермонт	4000	127
Кварцитовый песчаник	4000	9
Гнейс Хелл-Гэт (парал.)	2000	82
Хлоритовый сланец	4300	136
Кварц-мусковитовый сланец 1	4300	79
2	4300	65
Сланец кристаллический	4300	156
(Железо)		150

Таблица 13—V

Упругость стекла и стекловатых пород; влияние давления на жесткость

В добавление к обычным константам для нескольких стекол было определено действие гидростатического давления на жесткость; это действие выражено при помощи коэфициентов в пятом столбце, где дано относительнсе изменение жесткости на кг/см². Измерения, если нет других указаний, произведены при комнатной температуре от 20 до 30° С.

Материал	E	G	σ	$\frac{1}{G}\left(\frac{\Delta G}{\Delta P}\right)_T \cdot 10^6$	Ссылка
	Единицы в 10^{11} дин/см²				
Кварцевое стекло	6,7				10
(0°С)		3,00			14
	7,22				16
	7,21	3,05	(0,181)	—10,1	2
Пирексовое стекло (0°С)	6,30				16
	6,21	2,52	(0,232)	— 8,3	2
	5,6	2,31	(0,22)	— 8,45	9
Прессованное стекло	7,24	(2,96)	0,227		1
Кронглас	7,4	(2,97)	0,25		
Иенское стекло 16III	7,97	3,29	0,247		22
Натриевое стекло	7,27	2,99	0,221		22
Натронное стекло (0°С)	7,03				16
Калиево-натриевое стекло	5,9	2,33	(0,26)	— 2,15	9
Натриево-цинковый боросиликат	7,4	3,14	(0,18)	— 8,02	9
Натриево-свинцовый боросиликат	6,2	2,54	(0,21)	— 8,80	9
Калиево-свинцовое стекло	6,2	2,60	(0,19)	— 0,62	9
Опал	3,8	1,8	(0,06)		11
Обсидиан					
Модок, Калифорния	6,56	3,03	(0,08)	— 5,15	3
Липари	6,52	2,78	(0,17)		11
Липари	6,95				16
Арнафельс, Исландия	7,18	3,03	(0,18)		11
Диабазовое стекло	9,0—0,6	3,5—3,8	0,26—0,30		35
Борный ангидрид	1,8	0,7	0,29		35
Полевошпатовое стекло ($Ab_{30}An_{70}$)	8,99				35

Таблица 14—V

Влияние температуры на упругость стекол

E_0 и G_0 в дин/см$^2 \cdot 10^{11}$ (1 ат)

t, °C	Кварцевое стекло				Пирексовое стекло	Натронное стекло	Натриевое стекло	Обсидиан Липари	Диабазовое стекло*
	E/E_6	E/E_0	G/G_0	σ	E/E_0	E/E_0	E/E_{25}	E/E_6	E/E_0
0	1,000	1,000	1,000	0,187	1,000	1,000	1,000(25°)	1,000	1,000
100	1,019	1,017	1,010	0,198	1,027	0,991	0,97	1,003	0,991
200	1,035	1,031	1,019	0,205	1,044	0,971	0,93	1,005	0,983
300	1,044	1,044	1,029	0,205	1,059	0,934	0,87	1,007	0,973
400	1,057	1,056	1,037	0,210	1,068		0,80		0,961
500	1,073	1,066	1,044	0,220			0,69		0,945
600	1,084	1,075	1,051	0.225					0,924
700	1,089	1,082	1,057	0,222					
800	1,090		1,060	0,220					
	$E_0 = 7,22$	$E_0 = 6,7$	$G_0 = 2,996$		$E_0 = 6,30$	$E_0 = 7,03$	$E_{25} = 6,07$	$E_0 = 6,94$	$E_0 = 9-9,6$
Ссылка	16	10	14	16	16	16	27	16	35

* Среднее для пяти образцов стекла, искусственно полученных из диабаза.

Влияние температуры на жесткость G при давлении 4000 кг/см^2

(Температура от 30 до 100° С)

Стекло	$\frac{1}{G}\left(\frac{\Delta G}{\Delta T}\right)_P$
Пирексовое стекло	$114 \cdot 10^{-6}$
Обсидиан, Модок	$62 \cdot 10^{-6}$

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦАМ 4—V—14—V

1. Adams, Coker, Carnegie Inst. of Washington, Pub., 46, 1906.
2. Birch, Journ. App. Phys. 8, 129, 1937.
3. Birch, Bancroft, Journ. Geol. 46, 59, 113, 1938.
4. Birch, Bancroft, Journ. Geol. 48, 752, 1940.
5. Birch, Bancroft, Am. Journ. Sci. 237, 2, 1939.
6. Birch, Bancroft, Bull. Seism. Soc. Am. 28, 243, 1938.
7. Boyle, Sproule, Can. Journ. Res. 5, 601, 1931.
8. Breyer, Z. f. Geophys. 6, 98, 1930.
9. Bridgman, Proc. Am. Acad. 63, 401, 1929; 64, 39, 1929.
10. Drane, Proc. Roy. Soc. A122, 274, 1929.
11. Drude, Voigt, Wied. Ann. 42, 537, 1891.
12. Ewing, Crary, Thorne, Physics 5, 165, 1934.
13. Hermann, Stocke, Udluft, Beitr. z. angew. Geophys. 6, 206, 1937.
14. Horton, Phil. Trans. Roy. Soc. London, A204, 407, 1905; Iida, Bull., Earthguake Res. Inst., 13, 665, 1935.
15. Ide, Proc. Nat. Acad. Sci. 22, 81, and 482, 1936.
16. Ide, Journ. Geol. 45, 689, 1937.

17. Koch, Ann. d. Phys. 45, 237, 1914.
18. Koch, Dannecker, Ann. d. Phys. 47, 197, 1915.
19. Koch, Dieterle, Ann. d. Phys. 68, 441, 1922.
20. Kusakabe, Eartquake Inv. Comm. Tokyo 14, 1, 1903; 17, 1, 1904; 22, 38, 1906.
21. Nagaoka, Phil. Mag. 50, 53, 1900.
22. Perman, Urry, Proc. Phys. Soc. London 40, 186, 1928.
23. Pierce, Proc. Inst. Radio Eng. 17, 42, 1929.
24. Richards, Proc. Phys. Soc. London 45, 70, 1933.
25. Zisman, Proc. Nat. Acad. Sci. 19, 653, 1933.
26. Weatherby, Born, Harding, Bull. Am. Assoc. Petr. Geol. 19, 9, 1935.
27. Andrews, Proc. Phys. Soc. London 37, 169, 1925.
28. Bancroft, Jacobs, Rev. Sci., Instr. 9, 279, 1938.
29. Vose, не опубликована.
30. Abram, Journ. Iron and Steel Inst. 129, 325, 1934.
31. Regula, Zeit. f. Geophys. 16. 40, 1940.
32. Obert, U. S. Bur. Mines, R. I. 3444, 1939.
33. Lawson, Phys. Rev. 57, 417, 1940.
34. Birch, Bancroft, Journ. Chem. Phys. 8, 641, 1940.
35. Birch, Bancroft, не опубликована.
36. Kimura, Proc. Phys. Math. Soc. Japan 21, 736, 1939.

Таблица 15—V

Упругость горных пород по сейсмическим определениям

(см. также главу VII)

В некоторых случаях сейсмические определения двух скоростей, V_P и V_S, в массах точно известной породы были использованы для установления упругих констант этих пород в предположении, что эти скорости и константы связаны в соответствии с выражениями, имеющими силу для изотропного, однородного, линейно упругого материала. Эти выражения приведены в введении.

Порода	V_P км/сек.	V_S км/сек.	E единицы в 10^{11} дин/см^2	G единицы в 10^{11} дин/см^2	σ	Интервал глубин в метрах	$10^{13} \cdot \beta$ см^2/дин	Ссылка
Гранит:								
Куинси, Массачусетс ($\rho = 2{,}65$)	4,96	2,48	4,3	1,63	0,33	0—1100	22,8	1
Рокпорт ($\rho = 2{,}63$)	5,14	2,70	5,0	1,92	0,31	0—1800	22,8	2
Тишоминго, Оклахома ($\rho = 2{,}65$)	4,53	2,13	3,29	1,21	0,36	0—30	26,0	3
	5,21	2,42	3,91	1,56	0,36	90—120	19,3	3
Норит:								
Садбери, Онтарио ($\rho = 2{,}85$)	6,22	3,49	8,8	3,47	0,27	350—3000	15,6	2

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 15—V

1. Leet, Ewing, Physics, 2, 160, 1932.
2. Leet, Physics, 4, 375, 1933.
3. Weatherby, Born, Harding, Bull. Am. Assoc. Petr. Geol. 18, 106, 1934.

ГЛАВА VI

ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В ВИБРИРУЮЩИХ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВАХ

Содержание

Таблица 1—VI. Внутреннее трение в отдельных кристаллах . . 99
» 2—VI. Внутреннее трение в поликристаллических металлах 100
» 3—VI. Внутреннее трение в стеклах 100
» 4—VI. Внутреннее трение в горных породах 101

ВВЕДЕНИЕ

Вибрация твердых тел сопровождается рассеянием энергии, относимой к их «внутреннему трению»; эта потеря энергии является дополнительной ко всем внешним потерям, которые могут происходить. Имеются различные способы определения внутреннего трения, и в некоторых из опубликованных исследований принята общая для них терминология. В этой главе результаты приведены к бесконечно малому количеству $1/Q$, которое можно назвать «функцией рассеяния» или «внутренним трением». Логарифмический декремент затухания Δ свободных колебаний связан с этой функцией выражением $\Delta = \pi/Q$. Если dE является потерей энергии на цикл, а E — общей энергией, то $1/Q = dE/(2\pi E)$. Таким образом, если $1/Q$ мало, то мало и внутреннее трение.

Только за последние несколько лет техника измерения внутреннего трения достигла такого уровня, когда могут быть изучены потери в отдельных кристаллах [4, 16, 17]. Механизм внутреннего рассеяния энергии в отдельных кристаллах, вероятно, вызывает пластическую деформацию и усиление деформации даже при очень малых напряжениях. Внутреннее трение чувствительно к состоянию поверхности и отжигу [16]. Неотожженные отдельные кристаллы могут показывать потери, близкие к потерям поликристаллических веществ. В последних внутреннее трение возникает из ряда отдельных источников, включая: 1) потери внутри отдельных кристаллов, 2) потери на поверхности кристаллов, 3) тепловые токи, возникающие из-за микроскопических неоднородностей напряжения, которые в свою очередь получаются в результате примесей, пустот или анизотропности кристаллов. Этот третий источник подвергся наиболее полному изучению, и было установлено, что он является главной причиной рассеяния в ряде металлических образцов при обычных температурах, когда напряжения очень малы ($<10^{-5}$) [1, 14, 15, 19]. Рассеяние, вызываемое этим источником, зависит от частоты и размера зерна, достигая максимума, когда отношение $\dfrac{\text{частота} \times (\text{размер зерна})^2}{\text{теплопроводность}}$ порядка единицы. Этот вид рассеяния сравнительно нечувствителен к изменению температуры. Однако, когда температура повышается, общее внутреннее рассеяние быстро возрастает. В недавних исследованиях [1] цинка между 20 и 100° С при неизменной частоте установили, что 1/Q пропорционально $e^{-b/T}$, где b — константа, а T — абсолютная температура.

В пористых веществах, таких, как горные породы, потери, очевидно, связаны с пустотами между кристаллами; когда эти пустоты уменьшаются, например при сжатии, рассеяние также уменьшается. Но отчетливой зависимости рассеяния от частоты для этих веществ не наблюдалось. Ряд исследований имел целью изучение затухания звуковых волн в почвах и песках как в поле, так и в лаборатории.

Значение этой работы до сих пор еще точно не установлено, включено лишь несколько ссылок [8], а бо́льшая часть результатов, сильно нуждающихся в широкой критической проверке, здесь не помещена.

Эффект внутреннего трения может быть введен в динамические вычисления путем замены модуля упругости N сложным модулем $N(1+i/Q)$; во многих случаях с достаточно хорошим приближением можно считать Q независимым от частоты. Таким образом затухание упругих волн, сферически распространяющихся от фокуса, может быть получено из уравнения движения в виде

$$\rho \frac{\partial^2 (ru)}{\partial t^2} = N(1+i/Q) \frac{\partial^2 (ru)}{\partial r^2},$$

где u — смещение, а r — расстояние от фокуса. Решение дает

$$u = \frac{A}{r} e^{-\alpha r} e^{2\pi i f (t - r/v)},$$

где f — частота, v — скорость, а $\alpha = \frac{\pi f}{Qv} = \frac{\pi}{Q\lambda}$, причем λ — длина волны [3].

Важно помнить, что внутреннее трение чувствительно к «структуре». Оно зависит от механической и термической обработки, химических примесей, а также от температуры, частоты, амплитуды колебания и, вероятно, от других факторов. Эти многочисленные переменные недостаточно подробно описаны в этой главе, так как опущено значительное количество сведений, содержащихся в оригинальных статьях. Порядок величины $1/Q$ в некоторых случаях может быть неправильным, особенно в некоторых более ранних работах, где были исключены внешние потери. Величина напряжения в экспериментальных работах обычно не упоминается, хотя внутреннее трение быстро возрастает с амплитудой напряжения, если она не очень мала [21]. Это условие малого напряжения удовлетворяется в большинстве работ с высокими частотами; менее вероятно его соблюдение в опытах с различными типами крутильных маятников и другими низкочастотными механизмами.

Таблица 1—VI

Внутреннее трение в отдельных кристаллах

Кристалл	Частота, циклы/сек.	$1/Q \cdot 10^5$	Ссылка
Медь			
отожженная	40 000	1,1	16
неотожженная		100	
Свинец			
отожженный	40 000	9	16
Кварц	40 000	0,1	16
протравленный и полированный	70 000	0,17	17
шлифованный	70 000	0,35—0,55	17
шлифованный	650 000	2,2	4
шлифованный	830 000	1,7—4,5	22
Сегнетова соль	340 000	13,7—23,3	22
Олово отожженное	40 000	2,2	16
Турмалин	1 000 000	5,4—9,5	22
Цинк отожженный	40 000	0,7—0,3	16*

* В этой статье изменение $1/Q$ в соответствии с изменениями напряжения, временем непрерывного колебания, отжигом и частотой изучено для отдельных кристаллов цинка. Результаты слишком сложны для простого сведения их в таблицы.

В ферромагнитных веществах внутреннее трение зависит от магнитного поля так же, как и от переменных, которые уже упоминались. Литература на эту тему собрана Ценером в общий обзор теории внутреннего трения, особенно для металлов [20].

Таблица 2—VI

Внутреннее трение в поликристаллических металлах
(Комнатная температура, если нет других указаний)

Металл	Частота, циклы/сек.	$1/Q \cdot 10^5$	Ссылка *
Алюминий (99,5% чистого) (потеря приблиз. в 4 раза большая при 170° С)	10 000	1,3—17	18
Алюминий, технический	8 000	1,8—8,3	18
	0,1—10	100	12
	40 000	20	13
Алюминий (2% Mg)	17 000—34 000	<0,7	15
Латунь	6 000	2—10	18
	6 000—36 000	0,3—10	14
Медь	10 000	10—200	18
	1 000	100	7
	0,1—10	160	12
	40 000	60	13
	1—10	240	9
Свинец	10 000	500—2700	18
	1 000	150	7
Никель	10 000	10—50	18
Серебро	10 000	20	18
Сталь	10 000	2—40	18
	0,1—10	70	12
	1—10	200	9
Олово	1 000	200	7
Цинк (диаметр зерна 0,07 мм)	180		
20° С		54	1
100° С		370	
(Диаметр зерна 0,04 мм)	180		
20° С		120	1
100° С		800	

* Для зависимости этих величин от термической обработки, от старения и частоты см. соответствующие ссылки.

Таблица 3—VI

Внутреннее трение в стеклах

Стекло	Частота, циклы/сек.	$1/Q \cdot 10^5$	Ссылка
„Мягкое“	7000—10 000	80	18
	40 000	80	13
	1—10	500	9
Пирекс	10 000	55	18
	8000	46	2

Продолжение табл. 3—VI

Стекло	Частота, циклы/сек.	$1/Q \cdot 10^5$	Ссылка
Кварцевое	1—10	80	9
(нити)	0,5—1	0,25	6
(нити) * (диам.=0,06 мм)			
500°C	1/6—1/23	10	10
600		27	
700		77	
800		210	
900		570	
1000		1600	
(волокна)** (диам.=1,3 мм)			
600°C	14	10	10
700		19	
800		48	
900		110	
1000		240	
1100		570	
Диабазовое стекло 0°C	50 000—90 000	29	23
100		41	
200		57	
300		77	
400		107	
500		155	

* Величины взяты из данных Хортона; потери при более низких температурах, вероятно, включают большое количество внешних потерь.

** Взято у Айиде; потери при более низких температурах, вероятно, включают значительное количество внешних потерь.

Таблица 4—VI

Внутреннее трение в горных породах

Порода	$1/Q \cdot 10^5$		
	продольные колебания [11]	крутильные колебания [2]	
	при 1 ат	при 200 ат	при 4000 ат
Известняк, Золенгофен		370	160
Пенсильвания	670		
Доломит, Пенсильвания	260		
Мрамор, Вермонт	5000	710	100
Сланец, Пенсильвания	380		
Кварцитовый песчаник	770		
Гнейс, Пельхем, Массачусетс	1800		
4		1000	190
Гранит, Куинси	1000		
1		550	80
Рокпорт	770	550	60

Продолжение таблицы 4—VI

Порода	$1/Q \cdot 10^5$		
	продольные колебания [11]	крутильные колебания [2]	
	при 1 ат	при 200 ат	при 4000 ат
Сиенит, Онтарио			50
Норит, Садбери	340	420	300
Диабаз, Вайнел-Хевн	170	420	280
Габбро, Френч-Крик	590	250	70
Меллен, Висконсин		290	60
Дунит, Бальзам-Гэп, Сев. Каролина		250	200
Гранит, Куинси [3]	500—1000 (частота 140—1600 цикл. /сек.)		
Разные почвы [8]	10000 (частота 6—30 цикл. /сек.)		
Земная кора [8]	740 (по затуханию поверхностных волн)		
„ „ [3]	220 (по затуханию поверхностных волн)		

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ VI

1. Barnes, Zener, Phys. Rev. 58, 87, 1940.
2. Birch, Bancroft, Journ. Geol. 46, 59, 113, 1938.
3. Birch, Bancroft, Bull. Seism. Soc. Am. 28, 243, 1938.
4. Bosshard, Busch, Zeit Phys. 108, 195, 1938.
5. Cooke, Phys. Rev. 50, 1158, 1936.
6. Downsbrough, Phys. Rev. 51, 877, 1937.
7. Förster, Körster, Zeit. Metallkunde 29, 1937. Körsteri, Rosenthal, Idem. 30, 345, 1938.
8. Förtsch, Zeit. Geophys. 16, 57, 1940, см. также Iida, Bull. Earthquake Res. Inst. 16, 391, 1938; 17, 79, 1939.
9. Gemant, Jackson, Phil. Mag. 23, 960, 1937.
10. Horton, Phil. Trans. Roy. Soc. London, 294A, 407, 1905, а также Iida, Bull. Earthquake Res. Inst. 13, 665, 1935.
11. Ide, Journ. Geol. 45, 689, 1937.
12. Kimball, Lovell, Phys. Rev. 30, 948, 1927.
13. Quimby, Phys. Rev. 25, 558, 1925.
14. Randall, Rose, Zener, Phys. Rev. 56, 343, 1939.
15. Randall, Zener, Phys. Rev. 58, 472, 1940.
16. Read, Phys. Rev. 54, 389, 1938; 58, 371, 1940.
17. Van Dyke, Proc. I. R. E. 23, 386, 1935.
18. Wegel, Walther, Physics 6, 141, 1935.
19. Zener, Phys. Rev. 52, 230, 1937; 53, 90, 583, 1938; Zener, Randall, Am. Inst. Min. and. Met. Eng. Tech. Publ. 1146, 1940.
20. Zener, Proc. Phys. Soc. London, 52, 152, 1940.
21. Föppl, Journ. Iron. and Steel Inst. 134, 393, 1936.
22. Gockel, Phys. Zeit. 37, 657, 1936.
23. Birch, Bancroft, не опубликована.

ГЛАВА VII

СКОРОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Содержание

Таблица 1—VII. Полевые определения скоростей волн на небольших глубинах 105

» 2—VII. Скорость волн сжатия в почвах, воде, нефти . . 105

» 3—VII. Скорость в зависимости от глубины и возраста горных пород 106

» 4—VII. Скорость волн в осадочных породах долины Сан-Джоакин, Калифорния 107

» 5—VII. Сейсмические скорости и мощность верхних пластов в различных районах 108

» 6—VII. Сейсмические скорости в недрах Земли 110

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмическая разведка или съемка составляет один из важнейших геофизических методов; знание скоростей волн в различных веществах, очевидно, является весьма необходимым, и этому была посвящена большая доля труда в поле и в лаборатории. К сожалению, чувствительности диагноза мешает то, что данное вещество не характеризуется одной единственной серией скоростей, отличающейся от скоростей для всех других веществ. Для каждого вещества скорости зависят от ряда факторов, как, например, от степени изменения настоящей и, возможно, прежней глубины залегания, а в некоторых случаях и от влажности, от направления по отношению к сланцеватости, слоистости и т. д. Таким образом, должны существовать пределы величин даже для довольно хорошо определенного вещества, и эти пределы обычно в большой мере перекрывают пределы для других веществ. Скорость, определенная в поле для более или менее хорошо установленной формации, будет представлять собой среднюю скорость для меняющихся условий вдоль пути волны внутри данного пласта; для разных глубин проникновения волн можно ожидать разные условия и, следовательно, разные скорости. Опубликованных данных недостаточно для формулирования определенных зависимостей между скоростью и различными другими факторами, за исключением очень ограниченного числа случаев. Значительное расхождение наблюдаемых величин для формаций одинакового характера не сопоставлено с известными различиями этих формаций. Казалось, что единственно правильный метод составления таблиц скоростей заключается в том, чтобы дать крайние из наблюденных величин, хотя не было уверенности, что были определены именно крайние величины. Там, где дана одна единственная величина, имелось лишь одно определение, и пределы были неизвестны.

При попытке увязать эти результаты с лабораторными исследованиями или со скоростями, полученными из наблюдений землетрясений, следует помнить, что величины в табл. 1—VII, 2—VII, 3—VII и 4—VII относятся к сравнительно небольшим глубинам, вероятно, не превышающим нескольких километров. Так, установлено, что в граните вблизи поверхности скорость волн имеет величину, вероятно, значительно меньшую, чем на больших глубинах (10—20 км), где волны передаются на большие расстояния; это заключение подтверждается доказательствами, полученными в поле (табл. 3—VII), равно как и лабораторным исследованием (табл. 8—V, 10—V, 11—V). С другой стороны, получалось вполне хорошее соответствие между полевым и лабораторным изучением, когда условия, методы и материал подбирались подходящим образом. Данные по изменению скорости с глубиной в долине Сан-Джоакин (табл. 4—VII) были представлены Н. А. Хескелл. В табл. 5—VII внесены скорости волн и мощности пластов, установленные для некоторых районов, главным образом путем анализа регистраций землетрясений, хотя в некоторых случаях к ним присоединены сообщения и об искусственно вызванных толчках (взрывы в карьерах). Попытки определения вещественного состава глубоко залегающих пластов, очевидно, не могут базироваться на скоростях для небольших глубин, данных в табл. 1—VII и 2—VII; для этой цели было более полезно дать материал об упругих константах при высоких давлениях.

Табл. 6—VII дает современные цифры для скорости в недрах Земли; другие исследователи получают величины, совпадающие в пределах нескольких процентов для большинства глубин, хотя порядок изменения скорости на любой данной глубине может значительно отличаться.

Имеется много добавочных сведений о скоростях волн, включая скорости поверхностных волн для различных районов, и очень обширная библиография [48, гл. X].

Таблица 1—VII

Полевые определения скоростей волн на небольших глубинах
(Искусственные толчки)

P — волны сжатия, или продольные волны, *S* — волны сдвига, или поперечные волны, *R* — волны Релея (поверхностные).

Порода	Скорости, км/сек.			Ссылка
	P	*S*	*R*	
Гранит (см. табл. 3—VII)	4,0—5,7	2,1—3,3	2,1—2,2	2,3,7,33
Гранодиорит, Нов. Южный Уэльс	4,57			23
Нефелиновый сиенит, Арканзас	5,53			5
Норит, Садбери	6,22	3,49	2,79	3
Базальт, Германия	5,6			15
Базальт, глубина 710 м	5,06			17
Гнейс, кристаллические сланцы	3,1—5,4			6,33
Кварцит	6,1			44
Песчаник	1,4—4,3			2,17,22,24,27,34, 35,36,37,38
Сцементированные породы, сланец, песчаник	7,07			6
Доломит	5,0—6,16			22
Доломитовый известняк	5,97	3,26		6
Известняк „мягкий"	1,7—4,2	(См. табл. 3—VII)		7,16,21,25,28,26,27
Известняк „твердый"	2,8—6,4			1,4,6,19,22,24,25, 28,38,41,42,49
Известняк, гора Арбакл				
параллельно напластованию	5,31			
перпендикулярно напластованию	4,09			40
Сланец и глинистый сланец	2,3—4,7			7,21,23,27,33,35,36
Палеозойские породы, Англия	3,9—5,5			50
Соль, карналлит, сильвин	4,4—6,5			17,28,25,35
Осадочная порода (ангидрит, гипс, соль, известняк)	3,5—5,5			19,25,28,29
Уголь (?)	1,8			36
Лигнит	1,0			17
Лед, ледниковый	3,4—3,6	1,6—1,7	1,45	9,10,11,12
Лед, озерный	3,2—3,7	1,6—1,85		8,13,14

Таблица 2—VII

Скорость волн сжатия в почвах, воде, нефти

Материал	V_P, км/сек.	Ссылка
Аллювий	0,5—2,0	2, 28, 38
на глубине 2000 м	3,0—3,5	2
Глина	1,0—2,8	22, 23, 28, 31, 34, 37, 39
Делювый	0,7—1,8	20, 21, 28
Насыпи, засыпки и т. д.	0,4	28
Гипс и красноцветы, триас	2,7—3,0	2
на глубине 2000 м	4,5	2
Суглинок	0,8—1,8	23, 24

Продолжение табл. 2—VII

Материал	V_P, км/сек.	Ссылка
Лёсс	0,3—0,6	17, 48
Мергель	1,8—3,8	27, 31, 38
Песок	0,2—2	2, 15, 7, 17, 19, 20, 25, 28, 30
Пресная вода, 5°C	1,439	43
13	1,470	
15	1,477	
18,5	1,485	
25	1,509	
35	1,534	
Морская вода	1,485	
		43
	1,480—1,530 (в зависимости от глубины)	47
Нефть	1,326—1,395	32
23° C	1,275	46

Таблица 3—VII

Скорость в зависимости от глубины и возраста горных пород

Гранит Тишоминго, горы Арбакл, Оклахома [40]

Расстояние от места толчка, м	Среднее V_P, км/сек.	Среднее V_S, км/сек.	Проникновение
0—30	4,54	2,14	
90—120	5,22	2,42	около 8,5 м
150—750	5,46		?

Гранит, Иоземайт, Калифорния [2]

Глубина	Среднее V_P, км/сек
Вблизи поверхности	5,25
2000 м.	5,5

Известняк [4]

Возраст	Формация	Глубина, м	V_P, км/сек.
Кембрий-ордовик	Арбакл	Поверхность	5,30
Ордовик	Виоле	Поверхность	5,09
		1200	6,10
Девон	Хантон	Поверхность	4,26
		1400	5,33
Миссисипский	Мейяс	Поверхность	3,80
		1450	5,18
Пенсильванский	Белл-Сити	Поверхность	4,56
		900	4,72
		1200	4,72
Пермь	Эдвардс	Поверхность	3,35
Мел		1000	4,11

Продолжение табл. 3—VII

Глинистый сланец и песчаник [4]

Возраст	V_P, км/сек.	
	Глубина 600—900 м	Глубина 900—1200 м
Девон	4,08	4,11
Пенсильванский	3,42	3,56
Пермь	3,04	
Мел	2,84	3,26
Эоцен	2,74	3,08
Плейстоцен-олигоцен	2,20	2,48

Таблица 4—VII

Скорость волн в осадочных породах долины Сан-Джоакин, Калифорния

(Ссылка 51; см. также ссылку 52)

В этой таблице объединены сведения из большого количества источников; скорость выражена как линейная функция глубины для каждой формации в соответствии с формулой $V_P = V_0 (1 + kz)$, где V_P — скорость волн сжатия, z — глубина в метрах, измеренная от основания поверхностного пласта, характеризующегося малой скоростью распространения в нем волн; средняя мощность этого пласта составляет 23 м. Пределы глубин, для которых определялись константы, даны в пятом столбце.

Формация	V_0, км/сек.	k, 1/м 10^{-5}	V_P на глубине 2440 м, м/сек.	Предел глубины, м
Плиоцен (глинистый сланец и песчаник)	2,08	1,770	3048,1	149—2432
Верхний миоцен (порода мягкая по сравнению с твердостью сланца)	2,41	0,925	2993,4	1189—2878
Средний и нижний миоцен (главным образом песчаник)	2,17	1,832	3213,5	1782—3784
Олигоцен (Крейенхаген) (преобладает сланец)	2,65	0,807	3217,7	1630—2710
Эоцен (преобладает песчаник)	1,81	3,139	3296,7	2229—2885

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦАМ 1—VII—4—VII

1. Richards, Proc. Phys. Soc. London 45, 70, 1933.
2. Gutenberg, Beitr. z. angew. Geophysik, 6, 125, 1937.
3. Leet, Trans. Am. Geophys. Union, 14, 288, 1933; Physics, 4, 375, 1933.
4. Weatherby, Faust, Bull. Am. Assoc. Petr. Geol. 19, 1, 1935.
5. Leet, Ewing, Trans. Am. Geophys. Union, 12, 61, 1931.
6. Ewing, Crary, Trans. Am. Geophys. Union, 15, 91, 1934, 16, 100, 1935.
7. Norlund, Brockamp, Inst. Géod. de Danemark, Ser. 3, 2, 1934.
8. Ewing, Crary, Physics, 5, 165, 181, 1934.
9. Mothes, Geol. Rundschau, 17, 397, 1926.
10. Mothes, Zeit. Geophys. 3, 121, 1927.
11. Mothes, Brockamp, Zeit. Geophys. 6, 482, 1930.
12. Mothes, Zeit. Geophys. 5, 120, 1929.

13. Sorge, Zeit. Geophys. 6, 22, 1930.
14. Kohler, Zeit. Geophys. 5, 314, 1930.
15. Brockamp, Wölcken, Zeit. Geophys. 5, 163, 1929 .
16. Reich, Beitr. z. angew. Geophys. 7, 1, 1937.
17. Meisser, Martin, Zeit. Geophys. 3, 106, 1927.
18. Brockamp, Zeit. Geophys. 7, 295, 1931.
19. Schweydar, Reich, Beitr. z. Geophys. 17, 121, 1927.
20. Schmidt, Zeit. Geophys. 4, 134, 1928.
21. Barsch, Reich, Beitr. z. angew. Geophys. 1, 168, 1930.
22. Salfeld, Intern. Geol. Kong., Madrid, 1926.
23. Edge, Laby, Principles and practice of geophysical prospecting Cambridge, 1931.
24. Ambronn, Cobb, Elements of Geophysics, McGraw-Hill, 1928.
25. Barton, A. I. M. E. Geophysical Prospecting, 572, 1929.
26. Maurain, Eblé, Comptes Rendus, 181, 1077, 1925.
27. Reich, Handbuch der Experimentalphysic, Angenheister, Leipzig, 3, 1930.
28. Sinerez, Bol. d. Inst. Geol. y Min. Espana, 3-rd Ser., No 10, 1928.
29. Hanneman, Zeit. prakt. Geol. 35, 168, 1927.
30. Angenheister, Zeit. Geophys. 3, 28, 1927.
31. Rieber, Min. and. Met. 9, 394, 1928.
32. Martini, Wied. Beibl. 12, 566, 1888.
33. Gutenberg, Wood, Buwalda, Bull. Seism. Soc. Am. 22, 185, 1932.
34. Schmidt, Zeit. Geophys. 8, 378, 1932.
35. Smith, Wilson, Geophysics, 2, 56, 1937.
36. Heinrich, Zeit. Berg. Hutt. u. Sal. im Preuss, 81, 347, 1933.
37. Muller, Zeit. Geophys. 11, 111, 1935.
38. Devaux, La Nature, 62, 119, 1934.
39. McCollum, Snell, Physics, 2, 174, 1932.
40. Weatherby, Born, Harding, Bull., Am. Assoc. Petr. Geol., 18, 106, 1934.
41. Westby, Journ. Soc. Petr. Geophys. 6, 44, 1935.
42. Rutherford, Trans. A.I.M.E. Geophysical Prospecting, 110, 391, 1934.
43. Swainson, McIlwraith, Dyk, U. S. Coast and Geodetic Survey, 1934.
44. Leet, Bull. Seism. Soc. Am. 28, 163, 1938.
45. Gutenberg, Richter, Beitr. z. Geophys. 54, 134, 1939.
46. Ionescu, Journ. Phys. 5, 377, 1924.
47. Heck, Service, U. S. Coast and Geodetic Survey, Pub. No. 108, 1924.
48. Macelwane, Internal Constitution of the Earth, Chap. 10, McGraw-Hill, New York, 1939.
49. Jones, Proc. Roy. Soc. 137, 325, 1932.
50. Bullard, Gaskell, Harland, Kerr-Grant, Phil. Trans. Roy. Soc. London, 239A, 29, 1940.
51. Haskell, Частное сообщение.
52. Hafner, Bull. Seism. Soc. Am. 30, 309, 1940.

Таблица 5—VII

Сейсмические скорости и мощность верхних пластов в различных районах

Район (автор)	Глубина, км	V_P, км/сек.	V_S, км/сек.	Ссылка
Новая Англия..... (Лит)	0—16	6,13		9
	16—29	6,77		
	29—36	7,17		
	36—	8,43		
	0—15		3,45	
	15—25		3,93	
	25—35		4,27	
	35—		4,62	
Долина Миссисипи ..... (Уолтер)		6,03		12
		6,33		
		7,19		
		7,73		

Продолжение табл. 5—VII

Район (автор)	Глубина, км	V_P, км/сек.	V_S, км/сек.	Ссылка
Центральная и северная Калифорния	1—13	5,6	3,3	3
(Байэрли и Вильсон)	13—25	6,6		
	25—31	7,3	4,2	
	31—	8,0	4,6	
Центральная и южная Калифорния	0—9	5,61	3,26	4
(Байэрли)	9—31	6,72		
	31—	8,02	4,6	
Южная Калифорния	0—14	5,55	3,23	5
(Гутенберг)	14—25	6,05	3,39	
	25—31	6,83	3,66	
	31—39	7,6	4,24	
	39—	7,94	4,45	
Северная Германия	0—8	6,0		1
(Броккамп и Волькен)	8—	6,8		
Южная Германия	0—30	5,6	3,2	5
(Гутенберг)	30—45	6,25		
	45—	8,2		
Балканы	0—1	5,00	3,30	8
(Ли)	1—13	5,50	3,35	
	13—28	6,30	3,65	
	28—38	7,00	3,95	
	38—	7,80	4,35	
Центральная Азия	0—20	5,54	3,29	11
(Розова)	20—45	5,99	3,79	
	45—	7,82		
Япония	0—16	6,3		6
(Ходжсон)	16—	7,75		
Япония	0—20	5—5,5	3,25	10
(Матузава)	20—50	6—6,3	3,75	
	50—	7,5—8	4,5	
Новая Зеландия	0—9	5,0	3,0	2
(Буллен)	9—13	5,5		
	13—20	6,0		
	20—30	6,5	3,7	
	30—	8,1?	4,4	
„Средняя мировая кора"	0—15	5,570	3,363	7
(Джеффриз)	15—33	6,498	3,741	
	33—	7,747	4,353	

6,3(?)

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 5—VII

1. Brockamp, Wolcken, Zeit. Geophys. 5, 163, 1929.
2. Bullen, Proc. Sixth Pacific Science Conference, 103, 1939.
3. Byerly, Wilson, Bull. Seism. Soc. Am. 25, 223, 1935.
4. Byerly, Bull. Seism. Soc. Am. 29, 427, 1939.
5. Gutenberg, Beitr. z. Geophys. 35, 6, 1932.
6. Hodgson, Bull. Seism. Soc. Am. 22, 270, 1932.
7. Jeffreys, M.N.R.A.S. Geophys. Supp. 4, 196, 510, 1939; 4, 571, 1939.
8. Lee, M.N.R.A.S. Geophys. Supp. 3, 13, 1932.
9. Leet, Bull. Seism. Soc. Am., 28, 45, 1938 и неопубликованные материалы.

10. Matuzawa, Bull. Earth. Res. Inst. Tokyo, 6, 177, 1929, Matuzawa, Yamada, Suzuki, Bull. Earth. Res. Inst. Tokyo, 7, 257, 1929.
11. Розова, Е. А., Труды Сейсмологического института АН СССР, вып. 72, 1, 1936.
12. Walter, Trans. Am. Geophys. Union, 241, 1940. (резюме).

Таблица 6—VII

Сейсмические скорости в недрах Земли

Глубина, км	V_P, км/сек.		V_S, км/сек.	
	G*	J**	G*	J**
100	8,0	7,95	4,5	4,45
200	8,1	8,26	4,6	4,60
300	9,0	8,59	4,8	4,77
400	9,6	8,93	5,1	4,94
500	10,0	9,66	5,3	5,32
600	10,4	10,25	5,6	5,66
700	10,8	10,67	5,9	5,93
800	11,2	11,06	6,1	6,13
900	11,4	11,26	6,3	6,27
1000	11,4	11,44	6,4	6,36
1200	11,7	11,71	6,5	6,50
1400	12,1	11,99	6,6	6,63
1600	12,4	11,26	6,8	6,73
1800	12,5	12,53	6,9	6,83
2000	12,8	12,79	7,0	6,93
2200	13,2	13,04	7,0	7,02
2400	13,3	13,27	7,1	7,12
2600	13,5	13,50	7,1	7,22
2800	13,8	13,64	7,3	7,30
2900	13,7	13,64	7,25	7,30
	граница ядра			
	7,4	8,10		
3000	7,9	8,22		
3200	8,6	8,48		
3400	8,9	8,76	не наблюдались	
3600	9,2	9,03		
3800	9,3	9,28		
4000	9,4	9,50		
4200	9,5	9,70		
4400	9,8	9,88		
4600	10,0	10,06		
4800	10,0	10,26		
5000	10,2	10,33		
	(Граница внутреннего ядра, около 5100 км)			
5200	11,0	11,17		
5400	11,0	11,21		
5600	11,0	11,25		
5800	10,9	11,27		
6000	10,9	11,29		
центр	10,8	11,31		

* G.—Gutenberg, Richter, Beitr. z. Geophysik, 54,94, 1939.
** J.—Jettreys, M.N.R.A.S. Geophys. Supp., 4,548 и 594, 1939. (Скорости в этой статье даны как функции расстояния от центра; величины, приведенные выше, были получены путем графической интерполяции; последняя цифра может быть ошибочна на несколько единиц.)

ГЛАВА VIII

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ; ДАННЫЕ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К НЕДРАМ ЗЕМЛИ

Содержание

Таблица 1—VIII. Форма земной поверхности (Фигура Земли) . 112
» 2—VIII. Сила тяжести у поверхности; масса, средняя плотность, момент инерции 112
» 3—VIII. Давление, плотность, сила тяжести и эллиптичность пластов одинаковой плотности в недрах Земли 113
» 4—VIII. Ядро Земли 114

Таблица 1—VIII

Форма земной поверхности (Фигура Земли) [10]

Полуоси международного эллипсоида относимости (1924):
экваториальная, $a = 6378{,}388$ км,
полярная, $c = 6356{,}912$ км.

Радиус шара равного объёма, $a_0 = 6371$ км.

Эллиптичность поверхности, $\frac{a-c}{a} = \frac{1}{297} = 0{,}00337$ (о эллиптичности внутренних уровней см. табл. 3—VIII).

Квадрант меридиана $= 10\ 002{,}288$ км.
Квадрант экватора $= 10\ 019{,}148$ км.
Площадь поверхности $= 5{,}101 \cdot 10^{18}$ см^2.
Объём $= 1{,}083_2 \cdot 10^{27}$ см^3.

Отношение моментов инерции: $\frac{C-A}{A} = \frac{1}{305} = 0{,}00328$, где A и C соответственно являются моментами инерции вокруг осей a и c. Угловая скорость вращения, 2π, разделённая на длину („фактического“) звездного дня (86 164,09 сек.) $= 7{,}292115 \cdot 10^{-5}$ радиан/сек. $= \omega$ (1 средний день по солнцу $= 24 \cdot 3600 = 86\,400$ средних солнечных секунд).

Таблица 2—VIII

Сила тяжести у поверхности; масса, средняя плотность, момент инерции

Гравитационная константа: $k = 6{,}670 \cdot 10^{-8}$ (Гейль, 1930). Это константа закона Ньютона, $F = \frac{kM_1M_2}{r^2}$, где M_1 и M_2 измерены в граммах, F — в динах, r — в сантиметрах.

Сила тяжести у поверхности: (Международное *, 1930).
φ — угол широты,
g — сила тяжести или сила в динах на один грамм (см/сек.^{2}, дины/г или галлы) на поверхности эллипсоида относимости (см. табл. 1—VIII о размерах этого эллипсоида):
$g = 978{,}049\ (1 + 0{,}0052884\ \sin^2\varphi - 0{,}0000059\ \sin^2 2\varphi$.) Отсюда мы имеем:
у экватора $g_e = 978{,}049$,
на широте 45° $g_{45} = 980{,}629$,
у полюсов $g_p = 983{,}221$.

„Нормальная сила тяжести“ по определению $= 980{,}665$.
Вертикальный градиент силы тяжести над земной поверхностью $=$ $= -0{,}0003086$ см/сек.^{2}/м, или галл на метр.

Средняя плотность Земли $= 5{,}516_8$ г/см^3.
Масса Земли — $M = 5{,}976_5 \cdot 10^{27}$ г [11].
Средний момент инерции $= 81{,}04 \cdot 10^{43}$ г $\cdot$ см$^2 = 0{,}3341\ Ma_0^2$.
Отношение центробежного ускорения у экватора к $g_e = \omega^2 a / g_e = 1/288 = 0{,}003468$.

* Сводку основных данных для силы тяжести можно найти в работе R. A. Daly, Strength and structure of the earth, Prentiss Hall, New York, p. 31, 1940.

Таблица 3—VIII

Давление, плотность, сила тяжести и эллиптичность пластов одинаковой плотности в недрах Земли

Глубина, км	Давление, дины/см² · 10^{12} [4,6]	Плотность, г/см³ [4,6]		Сила тяжести, см/сек.² [1,5,6,11]	Эллиптичность [3]
0				982	0,00337
33	0,009	3,32	Слой B	985	0,00334
100	0,031	3,38		989	0,00331
200	0,065	3,47		992	0,00328
300	0,100	3,55		995	0,00325
400	0,136	3,63		997	
413	0,141	3,64	.....	998	
500	0,173	3,89		1000	
600	0,213	4,13		1001	0,00320
700	0,256	4,33	Слой C	1000	
800	0,300	4,49		999	0,00314
900	0,346	4,60		997	
1000	0,392	4,68	.....	995	0,00308
1200	0,49	4,80		991	0,00302
1400	0,58	4,91		988	0,00296
1600	0,68	5,03		986	0,00290
1800	0,78	5,13		985	0,00284
2000	0,88	5,24	Слой D	986	0,00278
2200	0,99	5,34		990	0,00273
2400	1,09	5,44		998	0,00267
2600	1,20	5,54		1009	0,00263
2800	1,32	5,63		1026	
2900	1,37	5,68		1037	
2900	1,36	9,69	.....	1017	258
3000	1,44	9,82		971	
3200	1,64	10,13		923	
3400	1,84	10,41		872	
3600	2,03	10,66		818	
3800	2,22	10,89		762	
4000	2,39	11,10		703	
4200	2,56	11,30		642	
4400	2,73	11,47	Ядро	581	
4600	2,87	11,62		517	
4800	3,00	11,75		452	
5000	3,12	11,86		387	
5200	3,22	11,95		324	
5400	3,31	12,02		258	
5600	3,38	12,08		194	
5800	3,44	12,13		126	
6000	3,48	12,15		0	250
6370	3,51	12,17			

Примечание. Цифры в этой таблице собраны из нескольких источников и для достижения полной согласованности нуждаются в некоторой проверке. Отсутствие внутренней согласованности, повидимому, не имеет особого значения ввиду весьма вероятных изменений в будущем в соответствии с новыми сведениями. Например, после первоначального заключения Буллена [3], основанного на равномерном изменении плотности и скорости внутри ядра, было установлено, что для этой области должна быть использована более сложная структура [7, 8, 9]. В своей первой работе Буллен предположил, что разрыв первого порядка в скорости и плотности существовал на глубине 474 км; в более поздней работе, следуя Джеффризу, разрыв

второго порядка этих переменных принимается на глубине 413 км. Распределение плотности по Буллену имеет то преимущество, что оно является единственно возможным в том смысле, что оно дает правильные величины средней плотности и среднего момента инерции всей Земли и, кроме того, тесно связано с сейсмическими скоростями. Изменение плотности с глубиной внутри слоев *B* и *D*, которые он полагает однородными, найдено путем интегрирования уравнения

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dr} = -\gamma \frac{M_h}{r^2} \frac{1}{\left(V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2\right)} \qquad \text{при } M_h = M - \int_{R-h}^{R} \rho r^2 dr;$$

h — глубина, r — радиальное расстояние $= R - h$, V_P и V_S — сейсмические скорости, которые известны как функции h или r (см. табл. 5—VII). Плотности внутри пласта *C* и ядра могут быть подобраны с учетом того, чтобы получить правильную общую массу и момент инерции. Обсуждены физические предположения, на которых базируется этот метод [2, 6, 12]. Давление сравнительно мало чувствительно к изменениям распределения плотности.

Величины, данные для ядра, взяты из более ранних работ Буллена [4, 3], за исключением величин силы тяжести, которые были получены путем графической интерполяции вычислений Бенфильда, в свою очередь базирующихся на данных ссылки 3.

Таблица 4—VIII

Ядро Земли

Средний радиус $= a_1$ { 3473 ± 4,2 км [9]; 3446 [7,8].

Средняя глубина до поверхности ядра { 2898 [9]; 2920 [7,8].

Средняя плотность ядра 10,72 г/см³ [6].

Масса ядра $1{,}876 \cdot 10^{27}$ г $= M_1$ [6].

Момент инерции ядра $0{,}380\ M_1 a_1^2$ [6].

Современные изучения сейсмических волн указывают на существование внутреннего ядра с радиусом в 1250 км [7,8,9] (см. также табл. 5—VII).

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ VIII

1. Benfield, Zeit. Geophys. 13, 157, 1937.
2. Birch, Bull. Seism. Soc. Am. 29, 463, 1939.
3. Bullen, M.N.R.A.S. Geophys. Supp. 3, 395, 1936.
4. Bullen, Trans. Roy. Soc. New Zealand, 67, 122, 1937.
5. Bullen, idem. 69, 188, 1939.
6. Bullen, Bull. Seism. Soc. Am. 30, 235, 1940.
7. Gutenberg, Richter, Beitr z. Geophys. 54, 94, 1939.
8. Gutenberg, Richter, M.N.R.A.S. Geophys. Suppl. 4, 363, 1938.
9. Jeffreys, M.N.R.A.S. Geophys. Suppl. 4, 537, 548, u 594, 1939.
10. Lambert, The internal Constitution of the Earth, Chap. 13, McGraw-Hill, New York, 1839.
11. Olczak, Acta Astron. 3, 81, 1938.
12. Williamson, Adams, Journ. Washington Acad. Sci. 13, 413, 1923.

ГЛАВА IX

ПРОЧНОСТЬ и ПЛАСТИЧНОСТЬ

Содержание

Таблица 1—IX. Стандартная прочность горных пород на раздавливание 123
» 2—IX. Критические данные по скольжению перемещения 124
» 3—IX. Критические данные по двойниковому скольжению 126
» 4—IX. Испытания рыхлого песка 128
» 5—IX. Прочность горных пород, заключенных в стальные оболочки 128
» 6—IX. Временное сопротивление сжатию материалов, не заключенных в оболочки, при всестороннем давлении керосина 129
» 7—IX. Сопротивление сдвигу под высоким всесторонним давлением 131
» 8—IX. Ползучесть некоторых материалов 134
» 9—IX. Испытание на ползучесть мокрого алебастра при различных напряжениях 134

ВВЕДЕНИЕ

При обычных лабораторных испытаниях или при применении в строительстве большинство горных пород являются скорее хрупкими, чем пластичными, и обладают определенной прочностью, не зависящей от времени или температуры в рамках обычных границ наблюдений. Это поведение пород привело к общепринятым понятиям — «предел упругости» и «прочность» пород; эти термины часто употреблялись применительно к поведению пород, лежащих глубоко в земной коре, при молчаливом допущении, что эти понятия применимы при условиях деформации земной коры, происходящей без большого изменения формы деформируемых тел.

С другой стороны, геологические наблюдения дают многочисленные доказательства того, что породы в земной коре проявили высокую степень пластичности; это заставляет нас думать, что их свойства во время деформации были совершенно отличными от свойств, наблюдаемых в лаборатории. Это непосредственно наблюдаемое различие послужит основным положением этой главы. Не будет сделано никакой попытки составить полный список обычных испытаний на прочность пород, принятых при применении их в строительстве. Вместо этого будут приведены данные о различных характерных свойствах пород, испытывавшихся в условиях, в какой-то степени приближающихся к условиям, господствующим при геологических деформациях.

Важными факторами окружающей среды в земной коре являются: давление, температура, время и присутствие растворов. Каждый из них изменяет прочность и пластичность пород, и, кроме того, все они являются взаимозависимыми. Например, коэфициент прочности на сжатие может быть экспериментально определен для характеристики изменения прочности при всестороннем давлении, но этот же коэфициент также меняется с изменением температуры. Такая взаимозависимость делает неизбежным выполнение очень большого количества опытов для определения поведения пород при геологических деформациях.

Наши экспериментальные познания эффектов, вызываемых изменениями в окружающей среде, очень ограничены. По этой причине не имеет смысла пытаться полностью изложить соответствующие представления. Казалось бы, полезнее всего обрисовать в общих чертах полученный эффект и дать чисто эмпирическое описание результатов, имеющих значение для геологии.

Рой В. Горансон [12, 13] выдвинул термодинамическую теорию течения, замечательно согласующуюся со многими экспериментальными наблюдениями. Следует ожидать, что эта теория течения сильно уменьшит количество измерений, необходимых для изображения действия изменений окружающей среды, и даст основание для экстраполяции лабораторных результатов на геологическую обстановку.

Определение терминов. Термины, употребляемые для описания поведения материалов под напряжением, в большой мере заимствованы из инженерной практики. Так как инженерная практика требует достаточной точности в определении свойств только в пределах безопасности конструкций, то естественно, что эти термины являются приближенными и в общем обладают лишь той степенью точности, которая диктуется самым обычным их применением на практике. Эта неточность терминологии сильно сказывается при экстраполяции лабораторных данных на совершенно отличные условия в земной коре. Необходимо изучить свойства, описанные под каждым термином, чтобы выяснить, каким образом они могут изменяться с изменением условий окружающей среды.

Предел упругости. «Предел упругости» вещества может быть определен как максимальное напряжение, ниже которого тело не показывает отклонений от закона Гука (деформация пропорциональна напряжению), бо́льших, чем ошибка наблюдения данного испытания. Таким образом, определенный предел упругости может быть и обычно является функцией чувствительности измерения и продолжительности испытания. Так как трудно, а может быть, даже и невозможно установить точный предел упругости при лабораторных наблюдениях, инженеры обычно предпочитают пользоваться «пределом пропорциональности», обозначая так точку, в которой деформация отклоняется от пропорциональности напряжения на некоторую установленную величину. Это является удовлетворительным рабочим определением для кратковременных испытаний, но в длительных испытаниях на ползучесть оно больше не применяется, так как течение при малых напряжениях может перейти установленную границу, если нагрузка прилагается достаточно долго.

Так как «предел упругости», таким образом, является термином неопределенным, то нам кажется, что некритическое применение этого термина не будет способствовать ясности геологических представлений. Его применение в этом разделе поэтому будет ограничено указанием условной точки, получаемой при кратковременных испытаниях.

Ползучесть *. Медленная деформация твердых тел под влиянием небольших нагрузок, действующих в течение длительных периодов времени, называется «ползучестью».

Течение. Будет целесообразным принять для этого раздела простое, широко приложимое определение термина «течение» во избежание противоречий, связанных с узким определением механизма этого процесса. Принимается, что течение существовало всегда, когда тело испытывало такое напряжение, при котором деформация исчезала не сразу после полного устранения внешних сил, действующих на тело, и когда деформация не сопровождалась значительной потерей сцепления. Термин «пластическое течение» применялся в связи с различным характером поведения материала при напряжении. Ввиду наличия множества подобных различных обозначений и ввиду того, что они не являются необходимыми для данного описания, нам кажется целесообразным избегать здесь их применения. Пластичность здесь употребляется как имя нарицательное для всех типов поведения, связанных с течением рассматриваемых веществ.

---

* Ползучесть (Creep) представляет собой медленное течение (Flow); термин самостоятельного значения не имеет. (*Прим. ред.*)

Стандартные испытания. Стандартным испытанием на прочность строительных камней является сжатие до разрушения кубического образца, иногда вделанного в гипс, но предпочтительно отшлифованного в точную форму куба. В этих испытаниях форма образца препятствует образованию скалывания под крутыми углами; квадратное поперечное сечение вызывает местную концентрацию напряжений, и действие трения между образцом и пластинками испытательной машины не учитывается. Однако их применение было таким общераспространенным, что величины прочности для разных типов пород, внесенные в таблицы, определялись именно таким способом. Относительные значения приводимых величин, вероятно, указывают на относительную прочность горных пород. Табл. 1—IX представляет собой сводку встречающихся при этих испытаниях типичных величин и пределов прочности наиболее часто используемых пород. Она составлена по литературным данным Г. С. Спайсером.

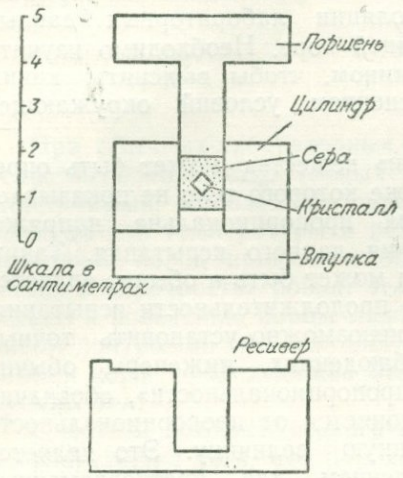


Рис. 1. Прибор Треска.

Использован Бюргером для деформации минералов под всесторонним давлением в сере [9].

Стандартные испытания на сопротивление разрыву не так надежны, и их результаты, даже в самых лучших условиях, не так воспроизводимы, как результаты испытаний на сопротивление сжатию. Главной причиной этого является крайняя хрупкость пород, что приводит к большим концентрациям напряжения вокруг неровностей поверхности и у зажимов машины; причиной этого может быть также не вполне симметричная нагрузка. Автор предпочитает сопротивление разрыву, вычисленное по испытаниям на чистый изгиб, так как при этом методе испытания в большей мере устраняется концентрация напряжений.

Все испытания, внесенные в табл. 1—IX, проводились на сухом материале при комнатной температуре, и напряжение вызывалось так быстро, что время не являлось фактором при испытании.

Влияние всестороннего давления. Уже давно предполагали, что давление, вызванное чрезмерной нагрузкой, создает главное изменение в прочности и пластичности пород. Хотя одно давление и не определяет всех видов деформации пород в земной коре, оно вызывает много изменений в их поведении, которые в дальнейшем будут описаны.

Методы экспериментирования. Так же как и в стандартных испытаниях, сжимающая нагрузка оказалась самой пригодной для большей части опытов, производившихся под высоким давлением; испытание Бриджмена на сдвиг является исключением. Было применено пять типов различных испытаний на сжатие под высоким давлением, а именно следующие:

1. Прибор Треска. Модификация этого прибора, которым пользовался Бюргер, представлена в виде схемы на рис. 1 [9]. Главными преимуществами этого метода является простота и скорость операций.

Его недостаток заключается в невозможности определить распределение напряжения и деформации во время испытания. Основное свое применение он нашел при искусственном воспроизведении трансляции и двойникования в минералах. Результаты испытаний на этом приборе помещены в табл. 2—IX и 3—IX.

2. Прибор Адамса [3]. На рис. 2 показан тип установки, употреблявшейся Адамсом для несколько более тонких измерений физических свойств пород под всесторонним давлением, вызванным окружающей стальной оболочкой. Недостатком этого метода является то обстоятельство, что трение оболочки оказывает не поддающееся учету воздействие на распределение напряжений. Табл. 5—IX дает прочность пород, определенную таким путем.

3. Прибор Кармана [16]. Карман окружил свои образцы жидкостью под умеренно высоким давлением и наблюдал их деформацию при приложении диференциального сжимающего напряжения. Бекер пользовался подобным же прибором для наблюдения действия диференциального растягивающего напряжения. Эти опыты дают точные измерения зависимости напряжение — деформация в образцах, зажатых в оболочки таким образом, чтобы жидкость не могла проникнуть в образцы. Рис. 5 и 6 показывают результаты измерений для мрамора.

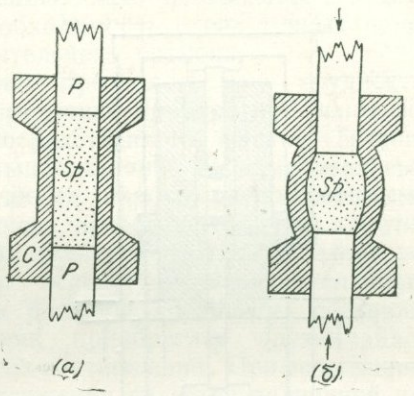


Рис. 2. Прибор Адамса для деформации пород под всесторонним давлением, производимым стальной цилиндрической оболочкой [3].

a — перед деформацией; *b* — после деформации. Обозначения: *Sp* — образец; *C* — цилиндрическая оболочка; *P* — поршни; стрелки указывают направление приложенного давления.

4. Прибор Мида и Ватсона для несцементированных веществ. Модификация техники Кармана, начало которой, повидимому, дал В. Дж. Мид, особенно хорошо приспособлена к точному исследованию характерных черт деформации несцементированных веществ. Типичные величины из работы Ватсона даны в табл. 4—IX.

5. Прибор Григгса, использующий принципы техники высокого давления Бриджмена, позволяет производить измерения, близкие по точности к измерениям Кармана под более высоким всесторонним давлением. На рис. 3 изображена схема этого прибора. Здесь образец не зажат в оболочку; жидкость проникает в него. Рис. 7 дает результаты, полученные на золенгофенском известняке.

П. В. Бриджмен изобрел очень простой прибор для наблюдения сопротивления сдвигу веществ при самых высоких напряжениях, возможных в лаборатории (рис. 4). Материал, использованный в этих опытах, первоначально представляет собой порошок, а под высокими давлениями он частично становится связным в виде мелкозернистого агрегата. Всестороннее давление вызвано сопротивлением сдвигу самого материала, а высокое напряжение сдвига развивается вращением наковальни *C* [5]. Для любой величины давления на пластины *B* имеется установившаяся величина вращательного момента, необходимого для вращения наковальни *C*. Из этого вращательного момента и давле-

ния (P) возможно вычислить нормальное давление на материал и максимальное напряжение сдвига внутри его. Эти две величины внесены в табл. 7—IX.

Прочность пород при этих непродолжительных испытаниях при высоком давлении и комнатной температуре, в отсутствии растворов, повидимому, выражается большей величиной, чем прочность, определенная из наблюдений деформации земной коры, если предположить, что при деформации пород в природе, кроме давления, могут играть важную роль и другие факторы окружающей среды.

Влияние температуры. При стандартных условиях испытания повышенная температура мало влияет на прочность и пластичность до тех пор, пока не будет достигнута точка, при которой действие температуры

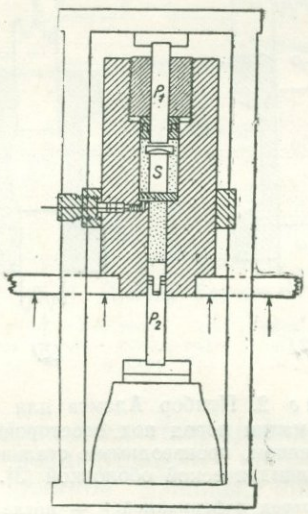


Рис. 3. Схематическая диаграмма прибора высокого давления Григгса.
S — образец; P_1 и P_2 — поршни.

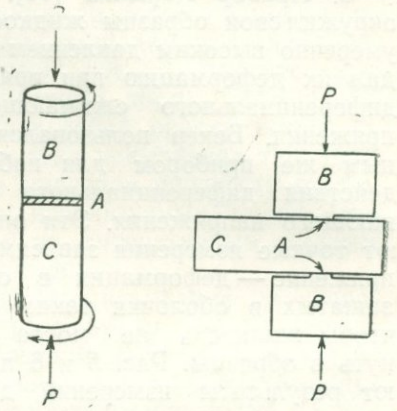


Рис. 4. Прибор Бриджмена для испытания на сдвиг.

Слева: идеализированная схема прибора для оказания одновременного воздействия давления и сдвигающего напряжения на тонкий диск в плоскости A.

Справа: схема подлинного прибора. Материал в виде тонкого диска в плоскости A разавливается на наковальне C при нажиме на стальные цилиндры B гидравлического пресса. Наковальня C вращается, в то время как цилиндры B остаются неподвижными благодаря трению пресса.

является необратимым. Здесь, вероятно, наступает разрушение структуры или имеет место химическое разложение, так что действие деформации трудно поддается истолкованию. Можно сказать, что практически температуры в несколько сот градусов имеют лишь небольшое влияние на деформацию породы.

Адамс [2] сообщил, что температуры до 400° С вызывают «более свободную» деформацию кальцитовых пород. Эти воздействия не поддаются количественному учету в форме таблиц.

Автор не обнаружил заметного действия на мрамор повышения температуры до 150°С при всестороннем давлении в 10 000 ат (в керосине).

В отличие от незначительного влияния температуры на сухие породы, при исследовании их под высоким давлением в присутствии растворителей температура имела заметное действие на некоторые материалы. Эти последние будут описаны в разделе «Влияние растворов».

Влияние времени. Тот факт, что прочность и другие физические свойства пород меняются с изменением температуры, давления и химического состава окружающей среды, не должен вызывать удивления. Эти влияния на другие материалы составляют часть нашего обычного опыта и легко могут быть показаны в лаборатории. Однако эксперимент, в котором продолжительная нагрузка оказывает влияние на прочность и другие физические свойства, не является совершенно обычным опытом и его не так легко демонстрировать. Многие ранее описанные термины, использованные во время обсуждения поведения вещества под напряжением, определены без учета фактора времени. Это не дает заметных ошибок для сравнительно непродолжительных лабораторных испытаний, но при применении к геологическим условиям фактор времени необычайно важен. Испытаний, имевших целью систематически выяснять влияние времени на деформацию, было поставлено немного. Одной из причин этого являлась необходимость очень точных измерений деформации в течение продолжительного времени.

Самый простой способ, которым можно преодолеть эту трудность, заключается в увеличении отклонения показаний прибора при использовании испытания на изгиб вместо непосредственного сжатия. Течение такого же порядка окажет гораздо большее влияние на измерительный прибор в случае изгиба бруска между двумя широко расположенными точками приложения силы, чем в случае непосредственного сжатия образца. Теоретически этот тип нагрузки является почти настолько же удовлетворительным, как и сжатие, но вследствие незначительности сопротивления пород растяжению и их большой хрупкости составляющая растяжения при этих испытаниях приобретает чрезвычайное значение, вне зависимости от всех других соотношений. При испытаниях на изгиб максимальное напряжение растяжения является величиной такого же порядка, как и максимальное сжимающее напряжение, и по этой причине любая неровность поверхности в образце вызывает концентрацию напряжения, которая может вызвать деформации, совершенно маскирующие течение, обусловленное полученным напряжением. Доказательством такого характера поведения является тот факт, что испытания на изгиб очень чувствительны к любым колебаниям в непосредственной близости к критической точке излома (колебания могут ускорить разрушение материала), в то время как испытания при чистом сжатии не столь чувствительны к колебаниям. Далее величина прогиба изгибаемых образцов является определенной функцией влажности, в то время как испытания на сжатие нечувствительны к влаге, за исключением измерений необычайной чувствительности (как, например, золенгофенское испытание при 1 ат; см. табл. 8—IX). По этим причинам испытания на ползучесть при сжатии были выбраны как наименее сомнительные.

Серии исследовательских испытаний на ползучесть были проведены с породами, подвергавшимися постоянным напряжениям ниже своего номинального предела упругости, действующим в течение долгого времени [16]. Первая группа испытаний проводилась без применения всестороннего давления и в отсутствие растворов. Там, где использовались высокие температуры, они не имели большого влияния. При этих испытаниях было установлено, что течение могло быть представлено в пределах точности измерения следующим уравнением:

$$\varepsilon = A + B \log t + Ct. \qquad (1)$$

Здесь представлено два типа течения, наложенных друг на друга: (*а*) — «упругое» течение и (*б*) — псевдовязкое течение. Первое следует уравнению

$$\varepsilon = A + B \log t \qquad (2)$$

при нагрузке и

$$\varepsilon = A - B \log t \qquad (3)$$

после снятия нагрузки; последнее имеет место при постоянной скорости для постоянных напряжений, следуя, таким образом, члену Ct в уравнении (1) [16].

В добавление к этим испытаниям производилось несколько опытов по испытанию ползучести золенгофенского известняка при всестороннем давлении в 10 000 ат и при более высоких величинах дифференциального напряжения, чем в первом случае [14]. Типичные результаты обоих типов испытаний внесены в табл. 8—IX. Здесь константы в пятом, шестом и седьмом столбцах являются константами уравнения (1).

Из этих испытаний не получено данных о зависимости прочности от продолжительности испытания или какого-либо доказательства функционального соотношения между скоростью течения и величиной дифференциального напряжения. Некоторые сведения по этим вопросам дали исследования течения перекристаллизации в алебастре.

Влияние растворов в сочетании с другими факторами. Воздействию растворов на деформацию горных пород мало уделялось систематического внимания при лабораторных исследованиях. Ф. Д. Адамс в 1910 г. сообщил: «При воздействиях, которым подвергалась порода в этих опытах (деформация мрамора под высоким всесторонним давлением при 300° С) [2]... присутствие воды не имеет заметного влияния на характер деформации». Автор установил, что в подобных условиях опыта вода оказывает сильное воздействие на течение мрамора. Мрамор впервые деформировался при комнатной температуре и при 10 000 ат всестороннего давления в керосине. Потом температура была поднята до 150 °С, не оказав заметного влияния на зависимость «напряжение — деформация».

Затем образцы были помещены в известковую воду и опыт повторен при 150° С и 10 000 ат всестороннего давления. При этом опыте прочность упала до 20% по сравнению с прежними опытами; кривая напряжение — деформация сильно отличалась по виду, и мрамор после деформации имел совершенно иную текстуру, чем в других опытах. Механическое двойникование было далеко не так ясно выражено, как в испытаниях без воды [18]. Некоторые исследователи показали отчетливое влияние, которое вода оказывает на кварц при высоких температурах. Эксперименты автора показали, что 10-процентный раствор Na_2CO_3 при 400° С уменьшает прочность кварца с 24 000 кг/см^2 до меньше чем 4000 кг/см^2 [17].

Серия опытов на ползучесть алебастра при условиях, благоприятствующих перекристаллизации, явно показала усиление течения, вызываемого раствором и перекристаллизацией. В этих опытах алебастровый цилиндр был окружен небольшой оболочкой своего насыщенного водного раствора, и постоянное напряжение было приложено к нему в течение длительного периода времени. Хотя это напряжение может быть гораздо ниже номинального «предела упругости», в результате получалось непрерывное течение, зависящее от величины напряжения так, как показано на рис. 8 [18].

Эти опыты позволяют показать графически зависимость прочности от времени. По мере того как продолжается течение, оно проходит через фазу уменьшающейся скорости, затем через фазу постоянной скорости и, наконец, стадию ускорения, ведущую к разлому. В каждом опыте напряжение можно рассматривать как равное «прочности» материала для интервала времени испытания. Другие характеристики этих испытаний даны в табл. 9—IX.

Были произведены предварительные опыты на ползучесть алебастра при сходных условиях температуры и растворов, но с гидростатическим давлением, передаваемым жидкостью, окружающей образец. Примерные результаты трех опытов при всестороннем давлении в 1000 ат показаны в табл. 9—IX.

Заключение. Вследствие небольшого количества проделанных экспериментальных работ сведения, содержащиеся в этой главе, отрывочны. Нельзя гарантировать очень большую точность результатов, так как весьма трудно проделать воспроизводимые измерения этих «структурно-чувствительных свойств». Несмотря на это, была сделана попытка собрать все наиболее важные данные, полученные по характеристике деформации пород, и, в частности, такие данные, которые относятся к их поведению в условиях окружающей среды, сходных с условиями, могущими существовать в земной коре. Очень заметное изменение в характере деформаций при изменяющихся условиях должно послужить предостережением для каждого, кто попытается применить обычные законы поведения твердого тела к условиям глубин Земли.

Таблица 1—IX

Стандартная прочность горных пород на раздавливание

(о недавних испытаниях строительного камня см. ссылку 27)

Порода	Количество месторождений	Средняя прочность, кг/см²	Предел прочности, кг/см²
Гранит	154	1480	370—3790
Сиенит	21	1960	1000—3440
Диорит	17	1960	960—2600
Габбро, диабаз и т. п.	41	1800	460—4700
Гнейс	18	1560	810—3270
Кварцит	8	2020	260—3200
Мрамор	76	1020	310—2620
Песчаник	210	740	110—2520
Известняк	216	960	60—3600
Сланец кристаллич.	14	1480	600—3130
Серпентин	11	1230	630—1230
Туф	8	310	100— 520

Таблица 2—IX

Критические данные по скольжению перемещения

(из работы М. Д. Бюргера, [9])

Группа симметрии	Кристалл	Число эквивалентных элементов		Основные элементы		Ссылка
				направление скольжения	плоскость скольжения	
		t	T	[t]	(T)	
S_2 (триклинная)	Кианит	1	1	[001]	(100)	39
	$KMnCl_3 \cdot 2H_2O$	1	1	[101]	(010)	37
	Азотнокислый аминогуанидин, $CH_6N_4 \cdot HNO_3$	1	1	[001]	(010)	45
C_2^h (моноклинная)	Низкотемпературный $KClO_3$	1	1	[100]	(001)	10
	$BaBr_2 \cdot 2H_2O$	1	1	[001]	(100)	39
	Аурипигмент	1	1	[001]	(010)	39
	Вивианит	1	1	[001]	(010)	39
	Эритрин	1	1	[001]	(010)	39
	Сульфонал, $(C_2H_5) \cdot (SO_2)_2C(CH_3)_2$	1	1	[010]	(100)	51
	Лорандит	1	1	[010]	(101)	39
	Миаргирит	1	1	[010]	(100)	39
	Гипс	1	1	[001]	(010)	39
		1	1	[301]	(010)	39
	Бутират кальция, $Ca(C_4H_7O_2)_2$	1	1	[010]	(001)	45
		1?	1?	[100]?	(001)?	45
	Бутират бария, $Ba(C_4H_7O_2)_2$	1?	1?	[010]?	(001)?	45
		1?	1?	[100]?	(001)?	45
	Пироксен	1?	1?	[001]?	(100)?	39
	Слюда	1	1	[100]	(001)	39
		2	1	[110]	(001)	39
	Лидгиллит	?	1	?	(001)	40
	Вольфрамит	?	1	?	(100)	39
		?	1	?	(010)	39
	$Li_2SO_4 \cdot H_2O$	?	1?	?	(100)?	24
		?	1?	?	(301)?	24
		?	2?	?	(121)?	24
		?	1?	[101]?	(101)?	24
		?	1?	?	(301)?	24

Продолжение таблицы 2—IX

Группа симметрии	Кристалл	Число эквивалентных элементов		Основные элементы		Ссылка
				направление скольжения	плоскость скольжения	
		t	T	[t]	(T)	
V^h (ромбическая)	Стибнит	1	1	[001]	(010)	39
	Бисмутинит	1	1	[001]	(010)	39
	Гуанахуатит	1	1	[001]	(010)	39
	Манганит	1	1	[001]	(010)	44
	Арагонит	1	1	[100]	(010)	53
	Колумбит	2	1	[101]	(010)	39
	Барит	1	1	[100]	(001)	39
		2	2	[011]	(011)	53
	Диамин-цинк-хлорид $(NH_3)_2ZnCl_2$	1	2	[001]	(110)	45
		1	2	[100]	(011)	45
	Ангидрит	1	1	[010]	(001)	39
		1?	2	[100]?	(012)	53
	Сера	2?	4	[110]?	(111)	43
	Бронзит	1?	1?	[001]	(010)	39
	Бутират стронция $Sr(C_4H_7O_2)_2$	1?	1?	[010]?	(001)?	45
		1?	1?	[100]?	(001)?	45
		?	?	[110]?	(110)?	24
		?	?	[010]?	(100)?	24
	Эпсомит	?	?	[011]?	(011)?	24
		?	?	[101]?	(101)?	24
		?	?	[102]?	(201)?	24
C_4^h (тетрагональная)	Фосгенит	1	2	[001]	(110)	52,42
	Халькопирит	?	4	?	(111)	43,8
C_3^i (гексагональная)	Доломит	3	1	[01,0]	(00,1)	22
D_3^d (гексагональная)	Магнезит	3	1	[01,0]	(00,1)	22
	Сидерит	3	1	[01,0]	(00,1)	22
	Родохрозит	3	1	[01,0]	(00,1)	53
	Смитсонит	3	1	[01,0]	(00,1)	53
	Кальцит	3?	3?	[12,1]	(01,2)	39
				[001]	(110)	
	Графит	3	1	[21,0]	(00,1)	39
	Бруцит	3	1	?	(00,1)	32,39
D_6^h	Лед	?	1	?	(00,1)	30,38
	Молибденит	3	1	[21,0]	(00,1)	39

Продолжение таблицы 2—IX

Группа симметрии	Кристалл	Число эквивалентных элементов		Основные элементы		Ссылка
				направление скольжения	плоскость скольжения	
		t	T	[t]	(T)	
O^h (кубическая)	Нашатырь	3	6	[001]	(110)	22
	Низкотемпературный NH_4Br	3	6	[001]	(110)	22
	NaF	3	6	[001]	(110)	22
	Фяюорит	6	3	[110]	(001)	53
	Галенит	6	3	[110]	(001)	39,8
		3	3	[100]	(001)	52,42
	Галит	6	6	[110]	(110)	48,39,22
	Сильвин	6	6	[110]	(110)	39,
	KBr	6	6	[110]	(110)	22,49
	KI	6	6	[110]	(110)	22,49
	RbCl	6	6	[110]	(110)	22
	Периклаз	6	6	[110]	(110)	43
	Высокотемпературный NH_4I	6	6	[110]	(110)	22
	Сфалерит	?	4 ?	?	(111)?	8,53

Таблица 3—IX

Критические данные по двойниковому скольжению

(*Дж. Ф. Белл*)

Кристалл	K_1	K_2	τ_{t1}	τ_{t2}	Ссылка
ТРИКЛИННАЯ СИСТЕМА					
Дигидрат хлористого бария, $BaCl_2+2H_2O$	(001) (100)				34
Анортит, $CaAl_2Si_2O_8$	(010)	(010)	[010]	[010]	46
МОНОКЛИННАЯ СИСТЕМА					
Бисульфат аммония, $(NH_4)_3H(SO_4)_2$	(310)	(310)	[110]	[110]	10
Бишофит, $MgCl_26H_2O$	(иррациональный)	$(1\bar{1}1)$	$[1\bar{1}2]$		41
Гексагидрат хлористого кобальта, $CoCl_26H_2O$	(иррациональный)	$(11\bar{1})$	$[0\bar{1}1]$		41
Диопсид	(001)				33
Моногидрат сернокислого лития, $Li_2SO_4H_2O$	$(\bar{1}21)$	$(1\bar{2}\bar{1})$ (100)			24

Продолжение табл. 3—IX

Кристалл	K_1	K_2	η_1	η_2	Ссылка
МОНОКЛИННАЯ СИСТЕМА					
Хлорноватокислый калий, $KClO_3$	(100)	(001)		[100]	10
	(001)	(100)			
	$(1\bar{1}0)$	$(1\bar{1}0)$	$[1\bar{1}0]$	$[1\bar{1}0]$	
Гексагидрат хлористого никеля, $NiCl_2 6H_2O$		$(1\bar{1}1)$	$[0\bar{1}1]$		41
Бисульфат калия, $K_3H(SO_4)_2$	(310)			[110]	10
Титанит, $CaTiSiO_5$		(161)	[111]		36
РОМБИЧЕСКАЯ СИСТЕМА					
Карналлит, $KClMgCl_2 6H_2O$	(110)	$(1\bar{3}0)$			23
Сернокислый аммоний, $(NH_4)_2SO_4$	(110)	$(1\bar{3}0)$			10
Англезит, $PbSO_4$	(110)	$(1\bar{1}0)$	$[1\bar{1}0]$	[110]	21
Ангидрит, $CaSO_4$	(101)	$(\bar{1}01)$			47
Арагонит, $CaCO_3$	(110)	$(1\bar{3}0)$		[310]	40
Барит, $BaSO_4$	(110)	$(1\bar{1}0)$	$[1\bar{1}0]$	[110]	21
Целестин, $SrSO_4$	(110)	$(1\bar{1}0)$	$[1\bar{1}0]$	[110]	21
Иорданит, $4PbSAs_2S_3$	(100)	(001)			11
	$(\bar{1}01)$	(301)			
Сернокислый калий, K_2SO_4	(110)	$(1\bar{3}0)$			10
	$(1\bar{3}0)$	(110)			
ТЕТРАГОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА					
Рутил, TiO_2	(101)	$(\bar{1}01)$			20
РОМБОЭДРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА					
Корунд, Al_2O_3	(0001)	$(02\bar{2}1)$			53
Гематит, Fe_2O_3	$(10\bar{1}1)$	$(\bar{1}012)$			53
	(0001)	$(02\bar{2}1)$			
Кальцит, $CaCO_3$	$(01\bar{1}2)$	$(01\bar{1}1)$			31
ПСЕВДОКУБИЧЕСКАЯ СИСТЕМА					
Лейцит, $KAlSi_2O_6$	(110)	$(1\bar{1}0)$			40
	$(1\bar{1}0)$	(110)			
КУБИЧЕСКАЯ СИСТЕМА					
Магнетит, Fe_3O_4	(111)	111			19

Примечание. Для описания двойникового скольжения использованы обозначения Мюгге. Деформация двойниковых элементов в отношении недеформированного кристалла характеризуется четырьмя параметрами эллипсоида деформации; K_1 является двойниковой плоскостью; K_2 — другим круговым сечением эллипсоида; η_1 — направлением движения в двойниковой плоскости; η_2 — направлением пересечения плоскости, содержащей большие и малые оси эллипсоида, с K_2.

Таблица 4—IX

Испытания рыхлого песка

(Промытые образцы Сан-Питерского песчаника, испытанного при сжатии в трех направлениях)

Напряжение дано в кг/см²

Сложение	Коэфициент пористости	Боковое напряжение, p_2	Для относительного сокращения 0,5% p_1	0,5% $p_1 - p_2$	1,0% p_1	1,0% $p_1 - p_2$
Плотное	0,45	1,05	3,09	2,04	3,45	2,40
Рыхлое	0,62	1,05	2,20	1,15	2,48	1,43
Плотное	0,46	6,33	15,3	9,0	17,6	11,3
Рыхлое	0,60	6,33	12,2	5,9	14,3	8,0
Плотное	0,46	14,0	34,3	20,3	43,1	29,1
Рыхлое	0,65	14,0	26,7	12,7	31,7	17,7

Примечание. В таблицу занесены неопубликованные данные испытаний, произведенных Джоном Д. Ватсоном в Soil Mechanics Laboratory of the Graduate School of Engineering, Harvard University, совместно с U. S. Army Engineers.

Таблица 5—IX

Прочность горных пород, заключенных в стальные оболочки

Толщина оболочки, см	0,25			0,33		
„Раздув", мм	0,254	1,270	2,540	0,254	1,270	2,540
Всестороннее давление, кг/см²	1380	1880	2130	1880	2630	2960
Стеатит	1720	1980	2220	2040	2650	2980
Алебастр	2320	2850	2980	2880	3440	3600
Песчаник	2800	3240	3470	3330	4070	4600
Мрамор	3020	4120	4540	3450	4630	5240
Бельгийский черный мрамор	5920	6060	5960	6130	6330	6510
Доломит	5060	5420	5430	5630	6120	6340
Сланец кристаллический	6940	6580	6160	8830	8070	7620
Диабаз	7590	7860	7370	8820	8980	8630
Гранит	9560	8630	8170	10170	9960	9510

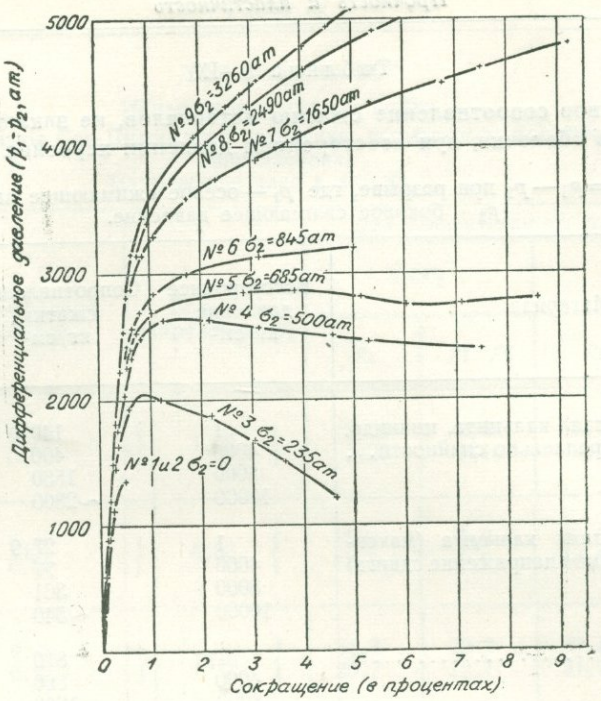
Примечание. Измерения прочности были произведены Адамсом во время деформации при всестороннем давлении в стальной оболочке ([3]; см. рис. 2). Величины вычислены из таблиц, помещенных в работе Кинга [28]. Столбцы дают «прочность», исправленную на изменение формы и увеличение площади поперечного сечения для величины диаметрального раздува, указанной вверху столбца, и соответствующей величины всестороннего давления, занесенной в третий ряд. Величины напряжения даны в кг/см².

Таблица 6—IX

Временное сопротивление сжатию материалов, не заключенных в оболочки, при всестороннем давлении керосина

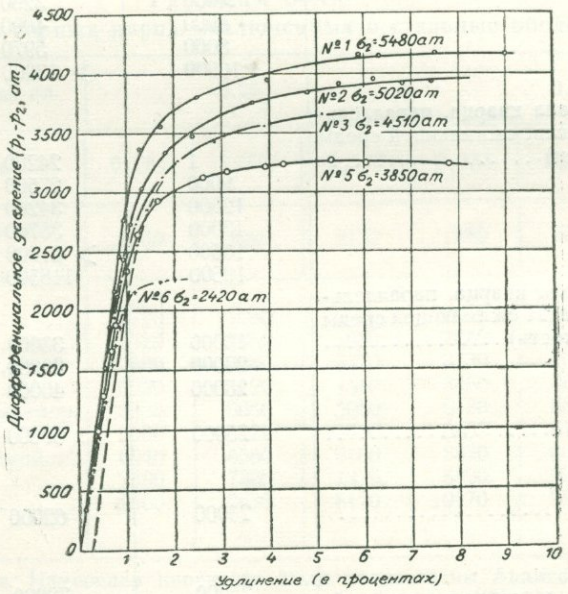
Сопротивление $= p_1 - p_2$ при разрыве, где p_1 — осевое сжимающее напряжение, p_2 — боковое сжимающее давление.

Материал	Всестороннее давление, кг/см²	Сопротивление сжатию, кг/см²	Ссылка
Отдельный кристалл кальцита, цилиндр, вырезанный параллельно спайности...	1	140	15
	4000	400	
	8000	1880	
	10000	~2800	
Отдельный кристалл кальцита (максимально допустимое напряжение сдвига)	1	27,9	15
	4000	77	
	8000	361	
	10000	~540	
Мрамор	1	810	14
	4000	860	
	8000	1650	
	10000	> 5200	
	11400	> 11400	
Известняк золенгофенский.....	1	2560	14
	2000	2600	
	4000	3260	
	6000	4000	
	8000	5970	
	10000	> 13000	
Отдельный кристалл кварца, параллельно оси *c* (в качестве сжимающей среды применен свинец).....	1	24200	17
	9000	27500	
	12000	34200	
	13000	38700	
	16500	> 51000	
	19500	118500	
Отдельный кристалл кварца, параллельно оси *c* (в качестве сжимающей среды применена жидкость)	16000	33000	7
	23000	39000	
	25000	40000	
Кварцевое стекло	25000	39600	7
Шпинель.....	25000	62000	7
Сапфир	25000	72000	7
Турмалин	25000	89000	7



Р и с. 5. Диаграммы Кармана «напряжение—деформация» для заключенного в оболочку мрамора, испытанного на сжатие под всесторонним давлением.

У каждой кривой помечена отвечающая ей величина всестороннего давления [26]



Р и с. 6. Диаграммы Бекера «напряжение—деформация» для заключенного в оболочку мрамора, испытанного на растяжение под всесторонним давлением.

У каждой кривой помечена отвечающая ей величина всестороннего давления [4]

Таблица 7—IX

Сопротивление сдвигу под высоким всесторонним давлением

(Бриджмен, [6] и неопубликованные данные.) Нормальное или всестороннее давление дано в кг/см² вверху столбцов; цифры, сведенные в таблицу, дают среднее сдвигающее напряжение при равномерном вращении наковальни, в 10^3 кг/см².

Название минерала или породы	Всестороннее давление, кг/см²					Примечание
	10 000	20 000	30 000	40 000	50 000	
Андалузит	2,4	6,7	10,9	13,3	15,4	Обрывается при > 15 000; радиальные волокна
Анортит	2,2	7,7	11	14	14	
Авгит	1,1	3,0	6,3	10	13	Вращается с обрывами, радиальные волокна
Базальтовое стекло (искусственное)	3,0	7,6	13	14	17	Вращается с обрывами
Бронзит	1,8	3,4	9	13	16	
Диопсид	2,5	5,9	9	12	14	Вращается с обрывами, радиальные волокна
Гранат					15—19	
Роговая обманка	1,1	3,1	6,4	10	13	
Муллит (синтетический)	1,8	5,2	9,0	10,5	10,8	Обрывается
Обсидиан	3,9	8	12	14	15	Вращается с обрывами
Пироксен	1,4	4,5	8	11	15	Вращается с обрывами, радиальные волокна
Пироксенит	2,8	6,4	9	12	14	Вращается с обрывами
Серицит					13	Обрывается, ориентированный, ось B ⊥ диску, плоскость оптической оси радиальна
Силлиманит	2,1	6,1	10,1	11,2	11,8	Обрывается при > 12 000
Ag	1,0	2,1	3,1	3,9	4,7	
AgCl	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	
$AgNO_3$	1,7	2,1	2,8	3,4	3,9	
Ag_2O	0,9	1,7	2,5	3,1	3,5	Вращается плавно
Ag_2S	1,5	2,0	2,4	2,6	3,0	
Ag_2SO_4	0,49	0,57	0,57	0,53	0,54	
Al	1,0	1,6	2,1	2,6	3,1	Вращается спокойно
Al_2O_3	2,7	5,5	7,8	9,5	9,4	Вращается с обрывами
Al_2S_3	2,2	5,6	8,9	9,8	10,8	Вращается спокойно, обрывается ниже 50 000
As	1,8	4,5	7,1	9,3	11,1	
As_2O_3	0,9	4,8	6,9	8,1	8,9	Вращается плавно
As_2S_2	2,1	4,0	5,2	6,0	6,7	Вибрирует ниже 8000; дальше плавно
Au	0,7	1,6	3,2	3,9	4,5	
Ba	0,52	0,71	0,90	1,07	1,20	
$BaCl_2$	1,1	2,4	3,0	3,5	3,8	Вращается плавно
$BaCO_3$	2,1	4,6	5,9	6,7	7,4	
$Ba(NO_3)_2$	1,3	2,4	2,9	3,2	3,7	Вибрирует до 27 000
BaO	0,6	2,4	3,3	3,9	4,5	Вращается плавно
BaS	1,6	4,6	6,2	6,7	7,0	Обрывается до 28 000
$BaSO_4$	2,2	5,8	7,7	8,8	9,5	Обрывается от 18 000 до 24 000
Bi	0,5	0,7	0,65	1,0	1,7	
Bi_2O_3	1,3	3,2	2,65	2,5	2,8	Диссоциируется на Bi с обрывами ниже 24 000
Bi_2S_3	1,4	2,1	2,9	2,85	7,75	Свободный Bi (?)
C (Графит)	2,9	4,7	6,9	9,0	9,9	Нарастающие сильные обрывы при > 10 000

Продолжение табл. 7—IX

Название минерала или породы	Всестороннее давление, кг/см²					Примечание
	10 000	20 000	30 000	40 000	50 000	
Ca	0,75	1,04	1,30	1,53	1,78	Вращается плавно
$CaCO_3$	2,8	5,1	6,4	7,5	8,6	
$CaCO_3$ (Золенгофенский известняк)	1,0	3,5	5,8	6,9	7,3	
CaO	2,3	6,1	9,2	11,3	13,4	Вращается плавно со случайными обрывами при > 15 000
$CaSO_4$	1,5	4,2	6,7	8,0	8,6	Вибрирует и обрывается
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	1,0	1,6	2,8	4,3	5,1	Вращается плавно
$CaSO_4 2H_2O$ (Гипс)					5,1	Вращается плавно
Cd	0,6	1,0	1,3	1,6	1,9	
CdS	1,8	3,6	4,7	5,6	6,4	
Cu	1,0	2,3	3,8	4,6	4,9	
$CuCO_3Cu(OH)_2$ (Малахит)					11,1	
$2CuCO_3Cu(OH)_2$ (Азурит)					8,5	Вращается плавно
Cu_2O	2,2	6,2	8,2	9,4	10,3	
CuS	1,3	3,1	4,0	4,5	4,9	
Cu_2S (кубическая)	1,5	2,9	3,3	3,6	4,0	
Cu_2S (Халькозин)	1,6	2,8	3,5	3,8	3,7	Вращается плавно; превращается в кубический Cu_2S
Cu_5Sn	1,5	3,4	4,5	5,0	5,2	Вращается плавно, легкая вибрация при > > 25 000
CuZn	0,9	1,7	2,3	2,6	2,8	Вращается плавно
Cu_5Zn_8	0,41	0,92	1,6	2,2	2,8	
Fe	1,1	5,2	8,0	10,0		
Fe_2O_3	2,3	6,9	10,9	14,0	16,7	Вращается с обрывами
$Fe_2O_3 \cdot H_2O$ (Лепидокрокит)	1,3	3,8	6,6	8,9	11,4	Вращается плавно
$2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ (Лимонит)					8,9	Вращается с обрывами
FeS	2,0	6,0	9,2	11,0	11,9	Обрывается при > 38 000
FeS_2 (Пирит)	2,3	6,3	9,7	11,5	12,5	Вибрирует и обрывается ниже 35 000
FeS_2 (Марказит)	1,7	5,2	8,4	10,8	12,4	Обрывается при > 10 000
HgO (красная)	1,2	3,1	4,6	5,8	6,8	Вращается плавно
HgO (желтая)	1,3	3,2	4,9	6,3	7,2	
HgO (черная; свободная Hg)	0,8	2,5	4,15	4,9	5,5	
HgS, измененный	1,8	3,85	4,8	5,2	5,8	
KCl	0,6	1,2	2,2	2,7	3,2	
K_2CO_3	1,0	2,2	2,9	3,3	3,7	
$K_2Cr_2O_7$	1,1	2,1	2,7	3,3	3,9	
K_2CrO_4	1,2	3,1	4,6	5,2	5,6	
$KMnO_4$	1,1	1,7	4,1	6,1	7,5	
K_2SO_4	1,3	3,2	5,2	6,4	7,3	Полиморфный переход при 21 000
Mg	0,57	0,71	0,75	0,80	0,87	
$MgCO_3$	2,0	4,6	6,9	8,2	9,0	Вращается спокойно
MgO	1,4	4,7	7,1	9,1	10,9	Вращается спокойно, редкие обрывы
Mo	0,6	2,4	5,2	8,2	12,1	Вращается спокойно
Na	0,2	1,0	2,2	3,6	5,2	
NaCl (Галит)	0,9	1,8	2,2	2,4	3,0	

Продолжение табл. 7—IX

Название минерала или породы	Всестороннее давление, кг/см²					Примечание
	10 000	20 000	30 000	40 000	50 000	
Na_2CO_3	1,4	3,9	4,0	4,7	5,2	Вращается спокойно
$NaNO_3$	1,3	2,4	2,9	3,3	3,5	
Na_2SO_4	1,4	3,7	5,4	6,3	7,0	Вращается плавно
Na_2WO_4	1,2	3,4	4,7	5,6	6,6	
Ni	1,0	2,8	5,2	7,5	8,7	
NiS	0,9	1,7	2,8	3,9	4,8	
Pb	0,16	0,30	0,44	0,56	0,68	
$Pb(AsO_2)_2$	1,7	3,2	4,0	4,8	5,2	Сильные обрывы
$PbCO_3$	0,8	1,8	1,9	2,05	2,1	Вращается плавно
PbO	0,65	1,3	1,7	2,0	2,4	
Pb_3O_4	2,1	5,9	7,0	7,6	8,1	Обрывается до 25 000
PbO_2	1,5	5,8	9,9			Сильные обрывы и детонация
PbS	0,50	0,97	1,29	1,44	1,61	Вращается плавно
$PbSO_4$	0,85	1,5	1,85	2,1	2,4	
S (кристаллическая)	1,8	3,3	4,7	6,0	7,1	
Sb	1,5	3,2	4,1	4,4	4,4	
Sb_2O_3	2,1	4,6	6,6	7,8	8,8	Обрывается до 15 000
Sb_2O_5	1,2	3,0	4,9	6,8	8,6	Вращается плавно
Sb_2S_3	1,6	3,6	4,5	5,2	5,8	
Sb_2S_5	1,4	2,9	4,0	4,9	5,4	
$Sb_2(SO_4)_3$	2,0	3,5	4,5	5,3	5,8	
Si	1,0	2,4	4,7	6,9	8,8	
SiO_2 (Кварц)					14,5	Вращается с обрывами, оптическая ось тангенциальная
SiO_2 (Кристобалит)					15	Вращается плавно, иногда обрывается, превращается в неизвестную форму
SiO_2 (Опал)	3,6	7,1	10	12	18	Вращается с большими обрывами, частично превращается в кварц
Sn	0,28	0,41	0,60	0,71	0,77	
SnO	2,2	5,3	8,2	10,5	12,7	Обрывается при $>$ 37 000
SnO_2	1,6	5,1	8,3	10,5	12,5	Вращается плавно, изменяется до SnO
SnS	0,8	1,7	2,2	2,5	2,8	Вращается плавно
SnS_2	2,0	4,2	5,3	6,0	6,6	Обрывается до 27 000
SnSb	2,0	3,2	3,3	3,4	3,6	
Sr	0,6	0,8	1,1	1,4	2,2	Вращается плавно
SrS	1,6	5,0	7,3	8,1	8,6	Обрывается ниже 35 000
U	0,7	2,8	5,1	7,3	8,8	Вращается плавно
UO_2Cl_2	0,9	2,1	3,0	3,6		
Zn	0,80	0,92	1,21	1,55	1,84	
$ZnCO_3$	1,8	3,9	5,5	6,8	8,8	
ZnS	1,3	3,1	5,0	7,2	8,1	Обрывается при $>$ 15 000
ZnS (Сфалерит)	1,6	3,2	5,2	6,3	8,7	Вращается с обрывами
ZnS (Вюртцит)	1,6	2,8	3,5	3,9	4,4	Вращается плавно
$ZnSO_4$	1,9	4,0	5,4	6,0	6,7	

Таблица 8—IX

Ползучесть некоторых материалов

Материалы сухие; испытания при комнатной температуре [16, 14]. Относительное укорочение $\varepsilon (= -\Delta L/L_0)$ по истечению времени t (в днях) может быть выражено зависимостью: $\varepsilon = A + B \lg t + Ct$. p_1 — осевое напряжение (сжатия).

Материал	Диференциальное давление, $p_1 - p_2$, кг/см²	Всестороннее давление, $p_2 = p_3$, кг/см²	Общая продолжительность испытания, сутки	A	B	C	Эквивалентное значение вязкости, пуазы
Золенгофенский известняк...	1400	1	> 1100	$6{,}1 \cdot 10^{-5}$	$5{,}2 \cdot 10^{-5}$	$< 2 \cdot 10^{-9}$	$> 2 \cdot 10^{22}$
	4400	10 000	0,04			0,041	$3{,}1 \cdot 10^{15}$
	5500	10 000	0,11			0,17	$9{,}3 \cdot 10^{14}$
	6760	10 000	0,80			0,88	$2{,}2 \cdot 10^{14}$
Галит.....	61	1	42	$8{,}18 \cdot 10^{-3}$	$1{,}09 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$3{,}0 \cdot 10^{17}$
Алебастр.....	420	1	40	$3{,}8 \cdot 10^{-4}$	$2{,}05 \cdot 10^{-4}$	$< 5 \cdot 10^{-7}$	$> 2{,}42 \cdot 10^{19}$

Таблица 9—IX

Испытания на ползучесть мокрого алебастра при различных напряжениях

Сжимающее напряжение, $p_1 - p_2$, кг/см²	Установившаяся скорость, сутки$\cdot 10^{-6}$	Деформация перед разломом, %	Продолжительность испытания до разлома, сутки	Эквивалентная вязкость, пуазы
		$p_2 = p_3 = 1$ ат		
300	2000	0,89	2,45	$0{,}423 \cdot 10^{16}$
250	440	1,39	13,54	$1{,}60 \cdot 10^{16}$
205*	219*	2,2*	48*	$2{,}64 \cdot 10^{16}$
181	100	3,0	133	$5{,}11 \cdot 10^{16}$
165	77	3,6	285	$6{,}04 \cdot 10^{16}$
150**	66,5	$> 1{,}05$	> 110	$6{,}36 \cdot 10^{16}$
125	24,5	3,8	308	$14{,}4 \cdot 10^{16}$
103**	$\sim 7{,}7$	$> 0{,}80$	> 640	$\sim 38 \cdot 10^{16}$
		$p_2 = p_3 = 1000$ кг/см²		
300	13 600	0,47	0,184	$0{,}0636 \cdot 10^{16}$
250	2650	$\sim 1{,}5$	2,7	$0{,}271 \cdot 10^{16}$
200	390		7	$1{,}47 \cdot 10^{16}$

* Среднее из трех повторных испытаний.

** Испытания не закончены; цифры, данные для деформации до разлома и для продолжительности испытания, являются минимальными величинами.

Примечание. В каждом опыте образец, подверженный постоянному сжимающему напряжению p_1, испытывался в присутствии насыщенного алебастром водного раствора при 24° С. Сжимающее напряжение $= p_2 = p_3$ [18].

Данные для сухого алебастра:

Прочность на сжатие, приблизительно не зависимая от времени, 520 кг/см².

Деформация перед разломом 0,35%.

Эквивалентная вязкость $5 \cdot 10^{18}$.

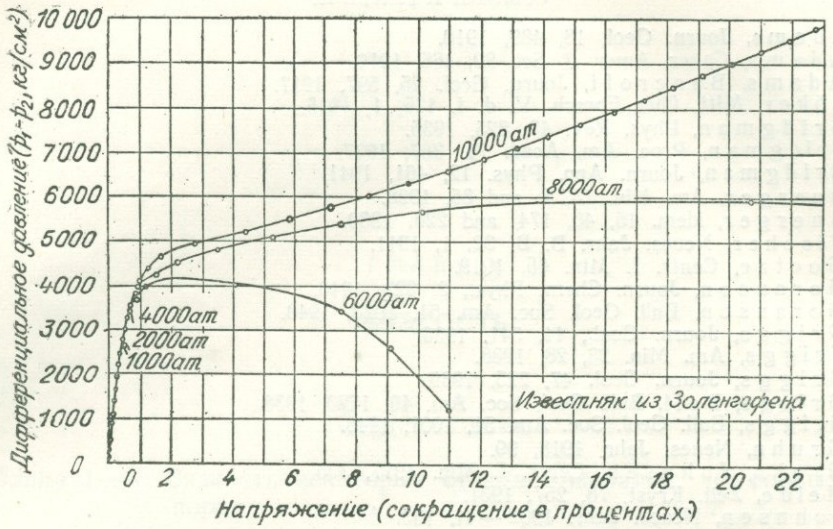
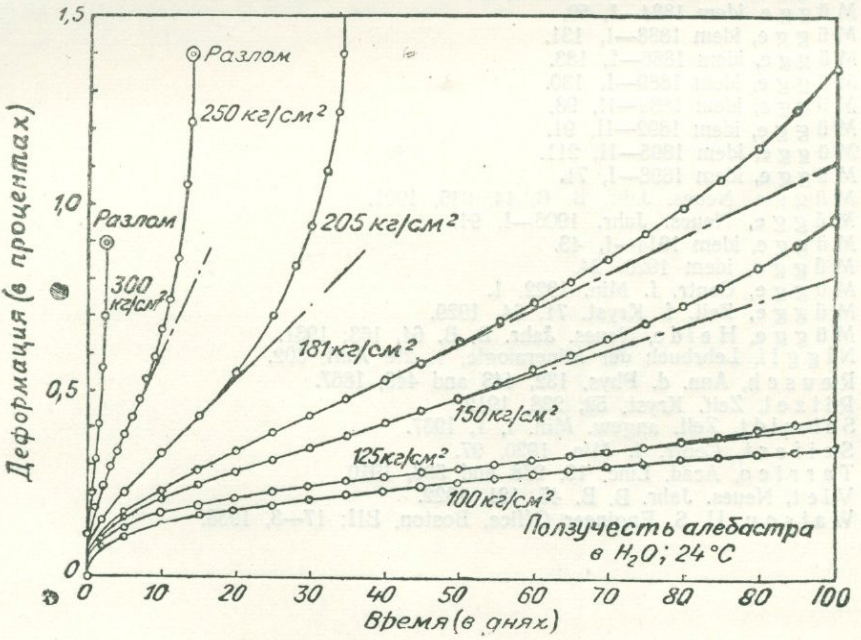


Рис. 7. Диаграммы Григгса «напряжение—деформация» для не заключенного в оболочку известняка из Золенгофена.

У каждой кривой помечена отвечающая ей величина всестороннего давления (14).



Р и с. 8. Кривые ползучести алебастра.

Давление = 1 ат. Величина (P_1—P_2) постоянна для каждого сдвига и помечена рядом с кривой. Пунктирная линия изображает установившуюся скорость для каждого опыта [18].

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ IX

1. Adams, Journ. Geol. 18, 489, 1910.
2. Adams, Coker, Amer. J. Sci. 29, 465, 1910.
3. Adams, Bancroft, Journ. Geol. 25, 597, 1917.
4. Böker, Mitt. über Forsch. V. d. I. 175, 1, 1915.
5. Bridgman, Phys. Rev. 48, 825, 1935.
6. Bridgman, Proc. Am. Acad. 71, 387, 1937.
7. Bridgman, Journ. App. Phys. 12, 461, 1941.
8. Buerger, Am. Min. 13, I and 35, 1928.
9. Buerger, idem. 15, 45, 174 and 226, 1930.
10. Fischer, Neues. Jahr. B. B. 32, 1, 1911.
11. Goetze, Centr. f. Min. 65, 1919.
12. Goranson, Journ. Chem. Phys., 8, 323, 1940.
13. Goranson, Bull. Geol. Soc. Am. 51, 1023, 1940.
14. Griggs, Journ. Geol., 44, 541, 1936.
15. Griggs, Am. Min. 23, 28, 1938.
16. Griggs, Journ. Geol. 47, 225, 1939.
17. Griggs, Bell, Bull. Geol. Soc. Am. 49, 1723, 1938.
18. Griggs, Bull. Geol. Soc. Am. 51, 1001, 1940.
19. Gruhn, Neues. Jahr. 1918, 99.
20. Gruhn, Johnsen, Centr. f. Min. 1917, 336.
21. Heide, Zeit. Kryst. 78, 257, 1931.
22. Johnsen, Neues. Jahr. 1902 — II, 133.
23. Johnsen, Neues, Jahr. B. B. 23, 237, 1907.
24. Johnsen, idem, 39, 500, 1914.
25. Johnsen, Centr. f. Min. 1915, 33.
26. Karman, Mitt. über Forsch. V. d. I., 118, 37, 1912.
27. Kessler, Insley, Sligh, Bur. Stand. Journ. Res. 25, 161, 1940.
28. King, Journ. Geol. 25, 638, 1917.
29. Larsen, Bridgman, Am. Journ. Sci. 36, 81, 1938.
30. McConnel, Proc. Roy. Soc. 48, 259, 1890; 49, 323, 1891.
31. Mügge, Neues. Jahr. 1883—I, 32.
32. Mügge, idem 1884—I, 50.
33. Mügge, idem 1888—I, 131.
34. Mügge, idem 1886—I, 183.
35. Mügge, idem 1889—I, 130.
36. Mügge, idem 1889—II, 98.
37. Mügge, idem 1892—II, 91.
38. Mügge, idem 1895—II, 211.
39. Mügge, idem 1898—I, 71.
40. Mügge, Neues. Jahr. B. B. 14, 246, 1901.
41. Mügge, Neues. Jahr. 1906—I, 91.
42. Mügge, idem 1914—I, 43.
43. Mügge, idem 1920, 24.
44. Mügge, Centr. f. Min. 1922, 1.
45. Mügge, Zeit. f. Kryst. 71, 64, 1929.
46. Mügge, Heide, Neues. Jahr. B. B. 64, 163; 1931.
47. Niggli, Lehrbuch der Mineralogie, 1, 2te Aufl. 302.
48. Reusch, Ann. d. Phys. 132, 443 and 449, 1867.
49. Ritzel, Zeit. Kryst. 52, 238, 1912.
50. Schmidt, Zeit. angew. Min. I, 1, 1937.
51. Seifert, Centr. f. Min. 1920, 97.
52. Tarrico, Acad. Linc. 19, 278 and 508, 1910.
53. Viet, Neues. Jahr. B. B. 45. 121, 1922.
54. Watson, U. S. Engineer Office, Boston. BII; 17—3, 1938.

ГЛАВА X

ВЯЗКОСТЬ

Содержание

Таблица 1—X. Вязкость некоторых стекол минералов и горных пород 139
» 2—X. Вязкость в системе ортоклаз-альбит 141
» 3—X. Вязкость в системе диопсид-альбит-анортит . . . 141
» 4—X. Вязкость, вычисленная по данным полевых измерений 141
» 5—X. Влияние давления на вязкость 142

ВВЕДЕНИЕ

Согласно закону Ньютона о внутреннем трении жидкости, тангенциальное или сдвигающее напряжение в движущейся жидкости пропорционально скорости изменения угла сдвига. Настоящие жидкости могут быть разделены на две категории: «ньютоновские», или «вязкие» жидкости, для которых фактор пропорциональности, «вязкость», не зависит от скорости сдвига, и «не ньютоновские» жидкости, для которых фактор пропроциональности зависит от этой скорости. «Ньютоновское» поведение многих обыкновенных жидкостей и некоторых стекол проверено для значительных пределов скорости сдвига. «Не ньютоновское» поведение наблюдалось для таких материалов, как некоторые коллоидные растворы, асфальт и другие битуминозные продукты; одной величины «вязкости» недостаточно для описания течения таких материалов (см. также гл. IX). Если напряжение измеряется в динах $\cdot$ см$^{-2}$, а скорость сдвига — в радианах $\cdot$ сек.$^{-1}$, то вязкость будет выражена в динах $\cdot$ сек. $\cdot$ см$^{-2}$ или в г $\cdot$ сек.$^{-1}$ $\cdot$ см$^{-1}$. Эта единица, названная пуазом, использована в таблицах этой главы.

Вязкость данного материала зависит от давления и температуры. Остается исследовать другие весьма важные для геологических приложений факторы, как, например, действие растворенных газов или жидкостей на вязкость природных стекол. В специальных проблемах следует принимать во внимание частичную кристаллизацию. Большое количество измерений вязкости расплавов естественных пород было сделано советскими и японскими исследователями. Они собраны в литературных ссылках [17], а несколько примеров дано в таблицах. Вопрос о полезности таких данных для геологических и петрологических проблем остается открытым, хотя имеются некоторые доказательства [18] того, что полевые и лабораторные измерения согласуются в отношении порядка величин. Большинство приведенных данных в таблицах вязкостей относятся к определенным соединениям. Изучение влияния состава на вязкость производилось специалистами по технологии стекла, но лишь для составов промышленного значения. Эта литература тщательно просмотрена [20]. Смазочные материалы являются объектом специального изучения [21]. Действие давления на вязкость большого количества органических жидкостей, не включенных в нижеследующие таблицы, исследовалось Бриджменом [22].

Таблица 1—X

Вязкость стекол некоторых минералов и горных пород

(при 1 ат)

Стекло	Температура, °С	Вязкость, пуазы	Ссылка
B_2O_3, борный ангидрид	260	$6{,}1 \cdot 10^{11}$	10
	300	$4{,}4 \cdot 10^{9}$	
	400	$1{,}6 \cdot 10^{6}$	
	500	$3{,}9 \cdot 10^{4}$	1
	600	$4{,}8 \cdot 10^{3}$	
	700	850	
	800	260	
	900	120	
	1000	74	
	1100	43	
	650	1345	12
	800	338	
	900	188	
	1000	126	
	1100	83	
	530	$1{,}3 \cdot 10^{4}$	15
	470	$8{,}4 \cdot 10^{4}$	
SiO_2, кремнезем	1100	$4{,}67\ 10^{13}$	13
	1220	$7{,}4 \cdot 10^{12}$	
	1300	$1{,}05 \cdot 10^{12}$	
	1400	$4{,}62 \cdot 10^{10}$	
	1440	$1{,}08 \cdot 10^{10}$	
$CaSiO_3$, волластонит.....	1550	2,73	9
	1600	2,40	
	1650	2,38	
$CaMg(SiO_3)_2$, диопсид.....	1400	26	9
(см. табл. 3 –X)	1500	1,85	
	1600	1,2	
	1280	106	4
	1300	33	
	1400	80	8
$(CaSiO_3)_{30}(MgSiO_3)_{70}$.....	1450	4	3
$CaAl_2Si_2O_8$, анортит	1450	111	9
(см. табл. 3—X)	1500	60	
	1600	25	
	1555	107	8
K_2SiO_3	875	44,5	15
	906	37,3	
$KAlSi_3O_8$, ортоклаз	1250	10^{8}	2
(см. табл. 2—X)			
	1400	$10 \cdot 10^{6}$	7
	1450	$4 \cdot 10^{6}$	
$NaBO_2$	844	16,1	15
	885	14,6	
$NaPO_3$	450	88,3	15
	572	16,2	
$NaAlSi_3O_8$, альбит	1150	10^{8}	2
(см. табл. 2—X и 3—X)	1400	$4 \cdot 10^{4}$	
	1300	$11 \cdot 10^{5}$	7
	1400	$1{,}8 \cdot 10^{5}$	

Продолжение табл. I—X

Стекло	Температура, °С	Вязкость, пуазы	Ссылка
Na_2O 25,95 SiO_2 74,05 Натриевое стекло	485	$5{,}56 \cdot 10^{12}$	5
	600	$7{,}31 \cdot 10^{11}$	
	701	$5{,}05 \cdot 10^{6}$	
	820	$1{,}06 \cdot 10^{5}$	
	920	$1{,}08 \cdot 10^{4}$	
	1028	1780	
	1240	96	
	1310	77	
Натронное стекло SiO_2 73,18 Na_2O 19,38 CaO 6,26 MgO 0,21 Fe_2O_3 + Al_2O_3 1,19	600	$3{,}1 \cdot 10^{9}$	5
	700	$2 \cdot 10^{7}$	
	800	$5 \cdot 10^{5}$	
	900	$3 \cdot 10^{4}$	
	1000	5000	
	1100	1200	
	1200	400	
	1300	250	
Тахилит (поток Мауна-Ики, Килауэа, 1924)	1074	4950	11
	1147	800	
	1248	150	
	1314	76	
Оливиновый базальт Гембудо	1150	37900	6
	1200	3180	
	1300	296	
	1400	137	
Конура	1200	732	6
	1300	173	
	1400	120	
Андезитовый базальт, Мотомура	1150	80000	6
	1200	31200	
	1300	260	
	1400	140	
Нефелиновый базальт, Нагахама	1200	190	6
	1300	97	
	1400	80	
Лава, гора Везувий	1100	28300	16
	1200	2760	
	1300	730	
	1400	256	
Обсидиан	800	$10^{11} - 10^{12}$	14
	1000	$10^{9} - 10^{10}$	
	1200	$10^{7} - 10^{8}$	
Обсидиан Оки Ниижима Арита Еревань	1400	10^{6} $4{,}4 \cdot 10^{6}$ $4{,}4 \cdot 10^{6}$ $1{,}7 \cdot 10^{5}$	
Роговообманковый гранит	1400	$2 \cdot 10^{6}$	17
Роговообманково-слюдистый андезит	1400	$1{,}6 \cdot 10^{4}$	
Андезиты	1400	150 — 1500	
Диабазы	1400	15 — 400	

Таблица 2—X

Вязкость в системе ортоклаз-альбит [7]

Or, %	100	80	60	40	20	0
Ab, %	0	20	40	60	80	100
1300°C						$1{,}1\cdot10^6$
1350			$2\cdot10^6$	$1{,}5\cdot10^6$	10^6	$4{,}3\cdot10^5$
1400	10^7	$1{,}7\cdot10^6$	$7{,}6\cdot10^5$	$6{,}4\cdot10^5$	$4{,}5\cdot10^5$	$1{,}8\cdot10^5$
1450	$4\cdot10^6$	$7\cdot10^5$	$3{,}2\cdot10^5$	$2{,}5\cdot10^5$	$1{,}8\cdot10^5$	

Таблица 3—X

Вязкость в системе диопсид-альбит-анортит [8]

Di, %	100	80	60	40	20	0
Ab, %	0	20	40	60	80	100
1200°C				9700	$1{,}2\cdot10^5$	
1300			280	1600	$2\cdot10^4$	$1{,}1\cdot10^6$
1400	80	86	110	440	4300	$1{,}8\cdot10^5$

Di, %	20	40	60	80
An, %	80	60	40	20
1300°C		5900	150	
1400		100	91	83
1500	110			

Ab, %	80	60	40	20	0
An, %	20	40	60	80	100
1300°C	$3{,}2\cdot10^5$	$4{,}7\cdot10^4$			
1400	$4{,}3\cdot10^4$	7800	(2500)		
1500			460	190	
1555				(130)	110

Di, %	60	40	40	20	20	20
Ab, %	20	40	20	60	40	20
An, %	20	20	40	20	40	60
1200°C		4500		$6{,}8\cdot10^4$		
1300	170	830	470	7500	3700	
1400	97	230	130	1500	620	360

Таблица 4—X

Вязкость, вычисленная по данным полевых измерений [18]

Поток Алика, Гавайские острова ..... $4{,}3\cdot10^4$
Поток Кеа, Гавайские острова (1887)..... $4{,}77\cdot10^4$

Таблица 5—X

Влияние давления на вязкость [22]

Жидкость	Температура, °С	Абсолютная вязкость при 1 ат, пуазы	Относительная вязкость при давлении, кг/см²				
			1	1000	4000	8000	12000
i-Пентан	30	0,00198	1	2,208	7,834	26,98	88,51
	75	—	0,662	1,560	5,188	15,10	38,55
Ацетон	30	0,00285	1	1,683	4,027	9,705	
	75	—	0,785	1,297	2,786	5,781	10,74
CS_2	30	0,00352	1	1,445	3,228	6,918	15,45
	75	—	0,750	1,125	2,355	4,688	8,83
Серный эфир	30	0,00212	1	2,109	6,194	18,24	46,77
	75	—	0,755	1,409	3,990	9,683	20,46
Петролейный эфир	30	—	1	1,995	8,51	38,9	151,4
	80	—	—	—	3,63	11,5	30,9
Керосин	30	—	1	2,88	51,3	—	
	80	—	—	—	8,13	75,9	631
Вода	0	0,01792	1	0,921	1,111	Замерзает	
	10,3	—	0,779	0,743	0,842	1,152	
	30	0,00801	0,488	0,514	0,658	0,923	
	75	0,00380	0,222	0,239	0,302	0,445	
	100	0,00284	—	—	—	—	

Примечание. О влиянии давления на вязкость B_2O_3 см. ссылку 19.

Если вязкость изображена выражением $\eta = \eta_0 e^{\alpha P}$, тогда

при 359°С $\alpha = 15 \cdot 10^{-4}$ см²/кг,

при 516°С $\alpha = 4{,}6 \cdot 10^{-4}$ см²/кг; для P, не превышающего 2000 кг/см².

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ X

1. Arndt, Zeit. Elektrotech. 13, 578, 1907.
2. Bowen, Trans. Am. Geophys. Union. Pt. 1, 249, 1934.
3. Bowen, Am. Journ. Sci. 39, 175, 1915.
4. Doelter, Sirk, Sitzber. Akad. Wiss. Wien, 120, 1, 1911.
5. English, Journ. Soc. Glass Tech., 7, 25, 1923; 8; 205, 1924; 9, 83, 1925; 10, 52, 1926.
6. Kani Proc. Imp. Acad. (Tokyo) 10, 29, 79, 1934.
7. Kani, idem. 11, 334, 1935.
8. Kani, Kozu, idem. 11, 383, 1935.
9. McCaffery, Lorig, Goff, Oesterle, Fritsche, Am. Inst Min. Met. Eng. Tech. Pub. 383, 1931.
10. Parks, Spaght, Physics 6, 67, 1935.
11. Verhoogen J. По сообщению R. A. Daly.
12. Воларович Г. П. и Фридман Р. С., Volarovich, Fridman, Acta, Phys. Chim. U. R. S. S. 6, 393, 1937.
13. Воларович Г. П. и Леонтьева А. А., Volarovich, Leontieva, Trans. Soc. Glass Tech. 20, 139, 1936.
14. Воларович Г. П. и Леонтьева А. А., ДАН СССР, 17, 423, 1937.
15. Воларович Г. П. и Толстой Д. М., Volarovich, Tolstoi, Trans. Soc. Glass Tech. 18, 209, 1934.
16. Воларович Г. П. и Толстой Д. М., Volarovich, Tolstoi, idem. 20, 54, 1936.
17. Воларович Г. П. и Корчемкин А. И., ДАН СССР, 17, 413, 1937.
18. Nichols, Journ. Geol., 47, 290; 1939.
19. Dane, Birch., Journ. App. Phys., 9, 669; 1938.
20. Morey, The Properties of Glass, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1938.
21. Hersey, Theory of Lubrication, Wiley, New York, 1938.
22. Bridgman, The Physics of High Pressure, Macmillan., New York, 1931.

ГЛАВА XI

ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ МИНЕРАЛОВ И ДРУГИХ ВЕЩЕСТВ

Содержание

Таблица 1—XI. Элементы 145
» 2—XI. Окислы 146
» 3—XI. Водные и гидратированные окислы 147
» 4—XI. Алюминаты 149
» 5—XI. Бораты (двойные) 150
» 6—XI. Двойные системы (окиси) 150
» 7—XI. Системы из трех и больше окисей (за исключением SiO_2) 152
» 8—XI. Двойные силикаты 152
» 9—XI. Силикатные системы, тройные и более высокие . 154
» 10—XI. Алюмосиликаты 156
» 11—XI. Боросиликаты 159
» 12—XI. Разные системы, содержащие силикаты 159
» 13—XI. Гидротермальное изменение силикатов и других минералов 159
» 14—XI. Карбонаты 160
» 15—XI. Сульфаты 160
» 16—XI. Соли кислородных кислот 162
» 17—XI. Галоиды 163
» 18—XI. Минералы сульфидного типа 165
» 19—XI. Тройные системы сульфидов 168

ВВЕДЕНИЕ

Содержание таблиц. Эти таблицы включают температуры плавления (конгруэнтного и инконгруэнтного), температуры кипения и температуры перехода для наиболее важных веществ, представляющих интерес для геологов, геохимиков и петрологов. Эвтектические и связанные с ними данные приводятся, когда рассматриваемое вещество изучалось как часть бинарной или более высокой системы. Целью составления таблиц было кратко показать известные термические реакции соединений и систем, но все же с достаточной детальностью, чтобы исследователь мог извлечь из них пользу в поле, где обычно подробные справочники недоступны.

Расположение. Данные расположены в алфавитном порядке химических обозначений (элементов) или формул (соединений). Соединения, состоящие из двух или больше окисей (за исключением карбонатов, сульфатов и других кислородных солей), включены в возрастающем алфавитном порядке сложных окисей.

Названия минералов даны по номенклатуре, употребленной в книге Dana-Ford, Texbook of mineralogy, John Wiley and Sons Inc., New York.

Температуры включены без знака градуса, так что все числа, не обозначенные другим путем (например, 5 ат), показывают температуру, при которой происходит рассматриваемое превращение (плавление, кипение, переход).

Температурная шкала. Практическая шкала температуры, основанная на «стандартной термодинамической шкале» (Int. Crit. Tables, vol. 1, p. 52), за последние годы постепенно подвергалась пересмотру в области высоких температур (см., например, *G. K. Burgess*, Nat. Bur. of Standards Research Paper 22, Oct. 1928; *H. T. Wensel*, J. Am. Ceram. Soc. **19**, 81, 1936). Были опубликованы таблицы разниц между прежде принятыми и пересмотренными величинами (*R. B. Sosman*, J. Am. Ceram. Soc. **16**, 54, 1933). Для практических целей эти разницы становятся заметными немного ниже 1500°, где разница равна 4° С, но она быстро увеличивается при более высоких температурах (см. также книгу «Temperature, its measurement and control in Science and Industry», гл. 1 и 2 (1941), Reinhold, Publ. Corp. New. York).

Из-за возможного дальнейшего пересмотра шкалы и во избежание путаниц, температуры, приведенные в этой сводке, являются неисправленными первоначальными величинами, за исключением тех случаев, когда имеются специальные указания (Междунар. темпер. шкала). В частности, определения точки плавления для силикатов, произведенные в Геофизической лаборатории, относятся к шкале газового термометра Дейя и Сосмана, на которой основываются стандартные таблицы термопар (Int. Crit. Tables, vol. I, p. 57).

Точность (в отличие от абсолютной точности) определения превращения, когда она известна, указана, как, например, ± 3. Где не даны скобки, последняя из приведенных цифр ненадежна.

Таблица 1—XI

Элементы

A Аргон, т. пл. — 188; тройная точка —189,3; т. кип. —185,8

Ag Серебро, т. пл. 960,5; летит при > 1350

Al Алюминий, т. пл. 660,0 ± 0,1; т. кип. 1800

As Мышьяк, т. пл. (36 ат) 817; т. возгонки 604

Au Золото, т. пл. 1062,6 (Дей-Сосман), 1063 (Междунар. темпер. шкала); т. кип. > 2200

B Бор, т. пл. 2300±300

Ba Барий, т. пл. 710; т. перех. 370; т. кип. 1537

Be Бериллий, т. пл. 1278; т. кип. 2970

Bi Висмут, т. пл. 271,3 ± 0,1; т. перех. 75; т. кип. 1560

Br Бром, т. пл. —7,3; т. кип. 58,6

C Углерод, т. пл. 3700 ± 100; т. возгонки 3950 ± 100

Ca Кальций, т. пл. 851; т. перех. (260), 440; т. кип. 1439

Cb Колумбий, т. пл. 2500

Cd Кадмий, т. пл. 320,9; т. кип. 767

Ce Церий, т. пл. 600 ± 50

Cl Хлор, т. пл. —103; тройная точка —100,5; т. кип —34

Co Кобальт, т. пл. 1489,8 (Дей-Сосман); магнитн. перех. 1150; т. перех. вверх 465 ± 20; т. перех. вниз 400; т. перех. 850

Cr Хром, т. пл. 1920 (вакуум); т. кип. 2200

Cs Цезий, т. пл. 28,4

Cu Медь, т. пл. 1083,0 ± 0,1; т. кип. 2336

F Фтор, т. пл. —223; т. кип. —188

Fe Железо, т. пл. 1535 ± 3; магнитн. перех. 768; т. перех. вверх 909; т. перех. вниз 898; т. перех. 1411; (т. перех. 370); т. кип. 3235

Ga Галлий, т. пл. 29,78 ± 0,02; т. кип. 1700

Ge Германий, т. пл. 958,5 (в H_2); летит при 1350

H Водород, тройная точка, нормальный H —259,25; пара H —259,38; орто H —259,21; т. кип. нормального H —252,78

D Дейтерий (тяжелый водород), тройная точка —254,58; т. кип. —249,66

He Гелий, т. пл. —272,0 (25,3 ат); —268,9 (140,5 ат), 2 жидкости 270,9 (1 ат); т. кип. —268,8

Hf Гафний, т. пл. 2230

Hg Ртуть, т. пл. —38,87 ± 0,02; кип. 3570

I Иод, т. пл. 113,5; т. кип. 184,5

In Индий, т. пл. 156,4 (т. кип. > 1450)

Ir Иридий, т. пл. 2454 ± 3.

K Калий, т. пл. 63; т. кип. 760

Kr Криптон, т. пл. —156,6; т. кип —152,9

La Лантан, т. пл. 826 ± 5

Li Литий, т. пл. 186 ± 5, т. кип. 1336

Mg Магний, т. пл. 659; т. кип. 1110

Mn Марганец, т. пл. 1254 ± 20, т. перех. 742; т. перех. 1191; т. кип. 2032

Mo Молибден, т. пл. 2620; т. кип. 3560

N Азот, тройная точка —210,07; т. перех. —237,55; т. кип. —195,81

Na Натрий, т. пл. 97,6; т. кип. 883

Nd Неодим, т. пл. 840 ± 40

Ne Неон, т. пл. —248,8; т. кип. —245,9

Ni Никель, т. пл. 1452,6 (Дей-Сосман); магнитн. перех. 360; т. кип. 3075

O Кислород, тройная точка —218,92; т. перех. —229,7; т. перех. —249,4 т. кип. —182,96

Os Осмий, т. пл. 2700 ± 200.

P Фосфор, т. пл. желтого (белого) 44,0; т. перех. желтого —68; т. пл. фиолетового (красного) 592,5 (в запаянной трубке); т. кип. 280,5

Pb Свинец, т. пл. 327,4 ± 0,1; т. кип. 1750 (т. перех. 160).

Pd Палладий, т. пл. 1549,5 (Дей-Сосман); т. пл. 1555 (Междунар. темпер. шкала)

Pr Празеодим, т. пл. 940 ± 50.

Pt Платина, т. пл. 1755 (Дей-Сосман); т. пл. 1773,5 (Междунар. темпер шкала)

Ra Радий, т. пл. 700

Pb Рубидий, т. пл. 38; т. кип. 696

Re Рений, т. пл. 3150

Ph Родий, т. пл. 1966 ± 3 (Междунар. темпер. шкала)

Rn Радон, т. пл. —71; т. кип. —65

Ru Рутений, т. пл. 2500 ± 100; т. перех. 1035, т. перех. 120,0 т. перех. 1500

S Сера, т. пл. (моноклин., призматич.) природн. 115, идеальной 119; т. пл. (моноклин. перлитной) природн. 104, идеальной 107; т. пл. (неустойчивой, ромбич.) 113; тройная точка ромбич. — моноклин. — жидкой при давлении 1320 кг/см² 151, т. кип. 444,60 (Междунар. темпер. шкала)

Sb Сурьма, т. пл. 630,5 ± 0,1; т. перех. 413; т. кип. 1640

Sc Скандий, т. пл. 1200

Se Селен, т. пл. 217,4; т. пл. красного 144; т. пл. аморфноосажденного 50; т. кип. 690

Si Кремний, т. пл. 1414; т. кип. 2355

Sm Самарий, т. пл. 1300

Sn Олово, т. пл. 231,9; т. перех. светлого в серый 18; т. перех. 145; т. перех. 162; т. кип. 2362 ± 15

Sr Стронций, т. пл. 770 ± 10; т. кип. 1151

Ta Тантал, т. пл. 3000 ± 50

Tb Тербий, т. пл. 327 ± 5

Te Теллур, т. пл. 449,8 ± 0,2 (вакуум); т. кип. 1390

Th Торий, т. пл. около 1800

Ti Титан, т. пл. 1820 ± 100

Tl Таллий, т. пл. 303,5; т. перех. 232; т. кип. 1457.

U Уран, т. пл. 1690 (сомнительно)

V Ванадий, т. пл. 1720 ± 50

W Вольфрам, т. пл. 3410 ± 20 (Междунар. темпер. шкала); т. перех. 650

Xe Ксенон, т. пл. —111,5; т. кип. 107

Y Иттрий, т. пл. 1490 ± 200

Zn Цинк, т. пл. 419,4; т. перех. 175; 320 (сомнительно); т. кип. 907

Zr Цирконий, т. пл. 1750±700; т. перех. 862

Таблица 2—XI
Окислы

Ag_2O диссоциирует (1 ат) при 191.

Al_2O_3 α-**Корунд** тригон, т. пл. 2050 ± 10; т. пл. природн. 1750—2050 (в зависимости от чистоты); монотропные формы: все перех. в корунд:
(1) βAl_2O_3 гексагон. — из щелочного расплава;
(2) γAl_2O_3 шпинелевый тип решетки — при дегидратации γ-водного Al_2O_3; т. перех. в корунд > 1200;
(3) γ′Al_2O_3 кубич. — при электролитич. окислении Al;
(4) δAl_2O_3 гексагон. или тригон. — при дегидратации $AlCl_3 \cdot 6H_2O$; т. перех. в корунд > 950;
(5) εAl_2O_3 кубич. — полученный электронной диффракцией по Штейнгейлю;
(6) ζAl_2O_3 кубич. — из расплава Li; т. перех. в корунд > 1600

As_2O_3 Арсенолит кубич., т. пл. 275 (неустойчивый)
— **Клаудетит** моноклин., т. пл. 313

As_2O_5 только стекловатый

B_2O_3 тригон., т. пл. 450 ± 2

BaO т. пл. 1925

BeO Бромелит, т. пл. 2530 ± 30

Bi_2O_3 Бисмут диморфный, I устойчивый, т. пл. 820 ± 2; II неустойчивый, белое каление 680, переходит в I; т. кип. 1890

CO_2 т. возгонки (1 ат) — 78,48; тройная точка (5,112 ат) — 56,60

CaO т. пл. 2570 ± 10

CeO_2 т. пл. > 2600; частично разлагается при 2500

CoO т. пл. 1935.

Co_3O_4 диссоциирует (1 ат O_2) при 970; переходит в CoO

Cr_2O_3 т. пл. 2435 ± 50; т. кип. > 3000

CrO_3 т. пл. 198; жидкий разлагается на Cr_2O_3 и O_2

CuO Тенорит, т. пл. > 1233 (> 59 ат O_2); диссоциирует при 1104 с образованием раствора, бедного O, насыщенного CuO; эвтектика CuO, Cu_2O 1080 (0,51 ат O_2), раствор составляет 86% Cu, 14% O_2; аномалии теплоемкости — 40,—60, в зависимости от термической истории

Cu_2O Куприт, т. пл. 1235 (природн. < 1235); т. перех. (природн.) прозрачного до непрозрачного 56; эвтектика с Ag 940,98% Ag; 2 жидкости с Ag 1135.

FeO искусств., **Вюстит** содержит избыток O_2, распадается при < 570 на Fe и Fe_3O_4, ферромагнитен ниже 570
— природн. **«Жозит»,** ферромагнитен
— искусств., плавится при 1370 (инконгруэнтно?)
— с Fe дает 2 жидкости при > 1520
— аномалия теплоемкости при FeO — 88

Fe_3O_4 Магнетит искусств., образует твердые растворы как при избытке Fe, так и при избытке O; при избытке O т. пл. 1591; превращается в Fe_2O_3 на воздухе (⅓ ат O_2 = 1 ат воздуха) ниже 1388; магнитн. перех. природн. 580; искусств. 510—680; аномалия теплоемкости —159, магнитная аномалия —160.

Fe_2O_3 Гематит, искусств., твердый раствор с небольшим избытком Fe в равновесии с Fe_3O_4, богатом O, на воздухе (⅓ ат O_2) 1388 ± 3; при 1 ат. O_2 1452 ± 5; т. пл. неизвестна, возможно ниже Pt при давлении $O_2 > 1$ ат.
— αFe_2O_3 парамагнитный, изоморфный с корундом
— γFe_2O_3 ферромагнитный, изоморфный с магнетитом, образуется при окислении магнетита, а также при дегидратации γFeOOH (лепидокрокит)

Ga_2O_3 т. пл. 1740 ± 25; диморфный; αGa_2O_3 изоморфный с корундом, βGa_2O_3 моноклин., т. перех. 650

GeO_2 т. пл. (тип кварца, растворимый) 1116 ± 4;
— т. пл. (тип рутила, нерастворимый), неустойчивый 1086 ± 5;
— т. перех. 1033 ± 10; летит при > 1250.

H_2O т. пл. 0,000, т. кип. 100,000 (термометрически фиксированные точки) при 1 ат
— Модификации при высоком давлении, тройные точки:

(1) I — III — L, — 22 (2047 ат)
(2) I — II — III, — 34,7 (2100 ат)
(3) II — III — V, — 24,3 (3397 ат)
(4) III — V — L, — 17 (3416 ат)
(5) V — VI — L, 0,16 (6175 ат)

— D_2O, тяжелая вода т. пл. 3,82, т. кип. 101,42 (1 ат)

HfO_2 т. пл. 2810 ± 25.

Продолжение табл. 2—XI

HgO Монтроидит, диссоциирует (½ ат O_2) при 426; (1 ат O_2) при 496 (в зависимости от размера зерна).
La_2O_3 т. пл. 2315 ± 20.
MgO Периклаз, т. пл. 2800 ± 13 (Дей-Сосман).
MnO Манганозит, т. пл. 1785; образует две жидкости с Mn; окисляется в Mn_3O_4 на воздухе при < 1200, аномалия удельной теплоемкости — 155.
Mn_3O_4 Гаусманнит, устойчивый при прокаливании на воздухе < 1200; окисляется в Mn_2O_3 на воздухе при < 940; т. пл. 1560.
Mn_2O_3 Браунит, искусств., диссоциирует на воздухе (½ ат O_2) 940; при 1 ат. O_2 1090 на Mn_3O_4 и O_2.
MnO_2 Полианит (пиролюзит частично гидратизированный, аморфный?) диссоциирует на воздухе при 530 ± 50, при 1 ат. O_2 565 ± 50; аномалия теплоемкости при — 181.
MoO_3 Молибдит, т. пл. 795 ± 2.
NiO Бунзенит, т. пл. 1990.
Ni_3O_4 диссоциирует на NiO и O_2 ниже 1000.
Ni_2O_3 неустойчивый, в безводном состоянии.
P_2O_5 т. пл. (таблитчатого) > 570; т. пл. (игольчатого) 569, имеет склонность оставаться стекловидным; т. возгон. около 360; возгоняется в стекловидный при 400—500.
PbO Массикот, т. пл. 886 ± 2; диморфный, тетрагон. до ромбич. 488; летит при < 750.
Pb_3O_4 Минимум искусств., диссоциирует (1 ат O_2) при 601 на PbO и O_2.
PbO_2 Платтнерит, искусств., диссоциирует (1 ат O_2) на Pb_3O_4 и O_2, осажденный при 344; электролитический при 313.
SO_2 т. пл.— 72,7; т. кип. —10,0.
SO_3 т. пл. (призматич., подобный льду) 16,8; т. пл. (низкотемпературный, асбестоподобный) 32,5; т. пл. (высокотем. асбестоподобный при 2,29 ат) 62,2; т. кип. 44,8.
Sb_2O_3 Валентинит ромбич., т. пл. 655.
— **Сенармонтит** кубич., т. пл. 642.
— т. перех. ромбич. в кубич. 557; т. кип. 1455.
— окисляется на воздухе в SbO_2 ниже 1080.
SbO_2 Сервантит, т. пл. неизвестна, диссоциирует на Sb_2O_3 и O_2 ($^1/_5$ ат O_2) при 1080
Sb_2O_5 диссоциирует ($^1/_5$ ат O_2) при 380.
SiO_2 Кварц, т. пл. (1470?); т. перех. тригон. в гексагон. 573 ± 3; т. перех. кварца в тридимит 867 ± 3;
— **Тридимит**, т. пл. (1670?); т. перех. ромбич. в низкотемпературный гексагон. 105 ± 15; т. перех. низкотемпературного гексагон. в высокотемпературный гексагон. 160 ± 15; т. перех. тридимита в кристобалит 1470 ± 10;
— **Кристобалит**, т. пл. 1713 ± 10 (Дей-Сосман) или 1728 ± 10 (Междунар. темпер. шкала); т. перех. ромбич. (?) в кубич. 200—270, в зависимости от предшествующей термической истории;
— **Халцедон**, опал и т. д.; см. водные окислы.
SnO_2, Касситерит, т. пл. 1625; летуч, распадается в т. плавления.
SrO т. пл. 2430.
TeO_2 Теллурит, т. пл. 732,6; летуч; затвердевает в стекловидные капли.
ThO_2 определенная т. пл. 3050.
TiO_2 Рутил, Анатаз, Брукит; т. пл. рутила 1825 ± 25; анатаз искусств. при дегидратации TiO_2 геля < 900; анатаз в присутствии плавня переходит в рутил при 400; без плавня при 915; α-β-анатаз т. перех. 642; природн. брукит в присутствии плавня переходит в рутил при < 800; TiO_2 разлагается на воздухе на Ti_2O_3 при > 1600.
V_2O_5 т. пл. 656.
WO_3 Тунгстит, т. пл. 1473; летуч.; диссоциирует на W_2O_3 и O_2 при 2460 (вычисленный).
ZnO Цинкит искусств., т. пл. 1975 ± 25; летуч.
ZrO_2 Бадделеит, т. пл. 2690 ± 20; моноклин., 2 тетрагон.; т. перех. 625, 1000, 1900.

Таблица 3—XI

Водные и гидратированные окислы

Al_2O_3—H_2O (1) Аморфный гель, отмеченные формы:
— **α-гель** белый, в виде хлопьев, с > $3H_2O$, свежеосажденный очень активный на холоду.
— **β-гель**, белый, получен в результате старения α-геля в течение 30 часов.
— **γ-гель**, белый, хлопьевидная суспензия, получен в результате старения α-геля в течение от 5 до 24 месяцев в воде, неактивный.

Продолжение табл. 3—XI

Al_2O_3 — H_2O(2) $Al(OH)_3$, кристаллический.
— **Гиббсит** моноклин., получен из γ-геля в результате старения при темпер. $\sim$ 100.
— **Байерит** триклин.? получен из α-геля в результате старения на холоду, более активный, чем гиббсит;
— (3) **Моно-гидроокись** AlOOH, кристаллическая.
— **Диаспор** ромбич., при дегидратации переходит в корунд, только природн.
— **Бёмит** ромбич.? при дегидратации переходит в γAl_2O_3.
— (4) **Постепенная дегидратация** $Al(OH)_3$ переходит в AlOOH при < 200; в γAl_2O_3 — при темпер. около 400, в корунд — при темпер. около 950.
— (5) **Минералы глин,** см. силикаты.

As_2O_5 — H_2O, постепенная дегидратация (при давлении в 10 мм) $As_2O_5 \cdot 4H_2O$ при темпер. около 50, $3As_2O_5 \cdot 5H_2O$ при темпер. около 120.

B_2O_3 — H_2O; H_3BO_3, **Сассолин**, т. пл. 171 (неустойчивый).
— HBO_2 I 336, HBO_2 II 201, HBO_2 III 176, все в запаянных трубках.
— H_3BO_3, плавится инконгруэнтно при 170 в HBO_2 I и жидкость.

BaO — H_2O; $Ba(OH)_2$ диссоциирует на BaO при 998; кристаллические гидраты: 8, 3 и $1H_2O$.

BeO — H_2O; $Be(OH)_2$, искусств. α-криптокристалл, неустойчивый; β — устойчивый, ромбич.; постепенная дегидратация аморфного (?) осадка (при давлении 10 мм) дает $BeO \cdot 1{,}05\ H_2O$ при темпер. около 25, при старении в течение 6 месяцев.

Bi_2O_3 — H_2O природн. $Bi(OH)_3$ связан с **бисмитом**. Искусств. осаждение с $> 3H_2O$ дает кристаллы, в отличие от Bi_2O_3.

CO_2 — H_2O; $CO_2 \cdot 6H_2O$ устойчив ниже 8; 2 жидкости выше 8 при > 30 ат.

CaO — H_2O; $Ca(OH)_2$, температура диссоциации 545.

CdO — H_2O; $Cd(OH)_2$, аморфно осажденный переходит в кристаллический, после старения, температура дегидратации (при давлении 10 мм) около 180.

CoO — H_2O; $Co(OH)_2$ температура дегидратации (при давлении 10 мм) около 168.

Cr_2O_3 — H_2O; **CrOOH** из аморфного осадка в результате старения при 400 (400 ат).

CuO — H_2O кристаллизованный, $Cu(OH)_2$ в растворе неустойчив в отношении CuO.

FeO — H_2O; $Fe(OH)_2$ при изобарической дегидратации переходит в Fe_3O_4 при 200.

Fe_2O_3—H_2O; **αFeOOH Гётит, γFeOOH Лепидокрокит** искусств., осажденный при медленном старении дегидратируется. Гётит переходит в гематит; лепидокрокит переходит в γFe_2O_3; необратимо дегидратированный FeOOH переходит в Fe_2O_3 при темпер. около 300; при постоянном давлении в 10 мм гётит дегидратируется при 275, лепидокрокит при 240.

Fe_3O_4 — H_2O. Водный Fe_3O_4 не имеет стадий дегидратации.

K_2O — H_2O; **KOH** т. пл. 360; гидраты; 4, 2, $1H_2O$.

Li_2O — H_2O; **LiOH** т. пл. 462; жидкость т. кип. 930.

MgO — H_2O; $Mg(OH)_2$ — **Брусит**, температура равновесной диссоциации около 140; при быстрой и необратимой дегидратации задержка при 400—480.

MnO — H_2O; $Mn(OH)_2$, Пирохроит, при изобарической дегидратации распадается при темпер. < 400;

Mn_2O_3—H_2O; **MnOOH Манганит,** также искусств., необратимо дегидратируется; задержка при темпер. около 365.

MoO_3 — H_2O; т. перех. $MoO_3 \cdot 2H_2O$ в $MoO_3 \cdot H_2O$, (при давлении 20 мм) 61.
— $MoO_3 \cdot H_2O$; Т. перех. в MoO_3 (при давлении 16 мм) около 120.

Na_2O — H_2O; **NaOH,** т. пл. 320; т. перех. α—β 300; жидкость т. кип. 900 ± 100; гидраты 7, 5, 4α; 4β; 3,5α; 3,5β; 2; $1H_2O$.

NiO — H_2O; $Ni(OH)_2$ при постоянном давлении в 10 мм дегидратируется при 230, переходя в $NiO \cdot 0{,}2H_2O$ (приблизительно).

Ni_2O_3 — H_2O; **NiOOH** при постоянном давлении в 10 мм дегидратируется при 138, распадается до NiO.

P_2O_5 — H_2O; (a) $H_3PO_4 \cdot H_2O$ т. пл. 29,3
(b) H_3PO_4 т. пл. 42,35
(c) $H_4P_2O_7$ т. пл. около 61.

PbO — H_2O; $Pb_2O(OH)_2$ при постоянном давлении в 10 мм дегидратируется при 110, переходя в PbO.

PbO_2 — H_2O, нет ступенчатых стадий дегидратации.

SO_3 — H_2O;
(a) $H_2SO_4 \cdot 8H_2O$ плавится инконгруэнтно при —62.
(b) $H_2SO_4 \cdot 6H_2O$ плавится инконгруэнтно при —54
(c) $H_2SO_4 \cdot 2H_2O$ т. пл. —28,5.
(d) $H_2SO_4 \cdot 2H_2O$ т. пл. — 39.
(e) $H_2SO_4 \cdot H_2O$ т. пл. 9.
(f) H_2SO_4 т. пл. 10,5.
(g) $H_2S_2O_7$ т. пл. 35.
(h) $H_2S_4O_{13}$ т. пл. от 0,5 до 4,0.

Продолжение табл. 3—XI

Sb_2O_3 — H_2O, нет ступенчатых стадий дегидратации.
Sb_2O_4 — H_2O; $Sb_2O_4 \cdot H_2O$ Стибиконит, имеет решетку Sb_2O_4, дегидратация не дает изменений в решетке.
SeO_3 — H_2O, H_2SeO_4 т. пл. 58; $H_2SeO_4 \cdot H_2O$ т. пл. 26; $H_2SeO_4 \cdot 4H_2O$ т. пл. — 51,7.
SeO_2 — H_2O; H_2SeO_3 плавится инконгруэнтно? около 80.
SiO_2 — H_2O **Опал, гиалит, гейзерит, триполит** и т. д., при дегидратации ведут себя подобно гелю; аморфные, подвергшиеся старению гели.
— **Халцедон, агат, оникс, кремень** показывают в большей или меньшей степени кристобалитовую инверсию. В некоторых происходит инверсия высокотемпературного кварца в низкотемпературный после термической обработки.
— **Гель кремнезема** искусств., нет ступенчатых стадий дегидратации. При дегидратации и регидратации дает явление гистерезиса.
— $SiO_2 \cdot nH_2O$, n, по сообщениям, = от 2 до ⅙; все сомнительно.
SnO_2 — H_2O; аморфные «оловянные кислоты» являются гелями; могут содержать кристаллы SnO_2 коллоидных размеров. Нет ступенчатых стадий дегидратации.
SrO — $H_2O \cdot Sr(OH)_2$ температура диссоциации 755; кристаллические гидраты 8, $1H_2O$.
TeO_3 — H_2O; $H_2TeO_4 \cdot 6H_2O$ плавится инконгруэнтно при 9, переходя в $H_2TeO_4 \cdot 2H_2O$; $H_2TeO_4 \cdot 2H_2O$ плавится инконгруэнтно при > 100, переходя в H_2TeO_4(?).
ThO_2 — H_2O, нет ступенчатых стадий дегидратации. Гели очень медленно стареют в ThO_2 даже при высоких температурах.
TiO_2 — H_2O, нет ступенчатых стадий дегидратации. Гели окиси титана медленно стареют, давая TiO_2.
UO_3 — H_2O; $UO_3 \cdot 2H_2O$ при постоянном давлении в 15 мм дегидратируется и дает $UO_3 \cdot H_2O$ при 100, UO_3 при 300.
ZnO — H_2O, кристалл. $Zn(OH)_2$; температура диссоциации неизвестна.
— Аморфный ZnO гель в щелочном растворе дает ZnO
ZrO_2 — H_2O, нет ступенчатых стадий дегидратации. Аморфные гели очень медленно стареют до ZrO_2 даже при высокой температуре.

Таблица 4—XI

Алюминаты

$BaAl_2O_4$; **Ba шпинель**, т. пл. 2000 ± 40; эвтектика с Al_2O_3 1875.
$BeAl_2O_4$ **Хризоберилл**, т. пл. 1820?
$Ca_3Al_2O_6$ плавится инконгруэнтно в CaO и жидкость (41% Al_2O_3) 1535 ± 5; эвтектика с $Ca_5Al_6O_{14}$ (50% Al_2O_3) 1395 ± 5.
$Ca_5Al_6O_{14}$ т. пл. 1455 ± 5; эвтектика с $CaAl_2O_4$ (53% Al_2O_3) 1400 ± 5.
$CaAl_2O_4$ т. пл. 1600 ± 5; эвтектика с $Ca_3Al_{10}O_{18}$? или $CaAl_4O_7$? (67% Al_2O_3) 1590 ± 5.
$Ca_3Al_{10}O_{18}$? т. пл. 1720 ± 10; эвтектика с Al_2O_3 (76% Al_2O_3) 1700 ± 10; существование соединения под вопросом, может быть $CaAl_4O_7$.
$CaAl_4O_7$? плавится инконгруэнтно в Al_2O_3 и жидкость (76% Al_2O_3) 1765; оптические свойства тождественны с таковыми для $Ca_3Al_{10}O_{18}$.
CeO_2 — Al_2O_3 широкий минимум 1885.
$CoAl_2O_4$ т. пл. 1960; эвтектика с Al_2O_3 1910; эвтектика с CoO 1715.
Cr_2O_3 — Al_2O_3 непрерывные твердые растворы.
Cu_2O — Al_2O_3 эвтектика (7 мол. % Al_2O_3) 1160.
$FeAl_2O_4$ **Герцинит**, плавится инконгруэнтно в Al_2O_3 и жидкость 1440.
$Fe_3Al_2O_6$ распадается ниже ликвидуса на FeO и герцинит 1230.
Fe_2O_3 (или Fe_3O_4?) — Al_2O_3; серия твердых растворов в области ликвидуса, но в твердом состоянии Al_2O_3 принимает только 12% Fe_2O_3; а Fe_2O_3 только около 1% Al_2O_3.
Ga_2O_3 — Al_2O_3 непрерывные твердые растворы
$K_2Al_2O_4$ т. пл. > 1650.
La_2O_3 — Al_2O_3 широкий минимум (75 мол. % Al_2O_3) 1860.
$Li_2Al_2O_4$ т. пл. > 1625.
$MgAl_2O_4$ **Шпинель**, т. пл. 2135 ± 25; эвтектика с MgO, (55% Al_2O_3) 2030 ± 30 с Al_2O_3 (95% Al_2O_3) 1925 ± 40.
Mn_3O_4 (или MnO) — Al_2O_3, широкий минимум 1580.
$Na_2Al_2O_4$ т. пл. > 1650.
$NiAl_2O_4$ т. пл. 2020; эвтектика с NiO 1875, с Al_2O_3 1955.
$SrAl_2O_4$ т. пл. 2015; эвтектика с Al_2O_3 1805.
ThO_2 — Al_2O_3 широкий минимум 1910.
$TiAl_2O_5$ т. пл. 1860; эвтектика с TiO_2 1700, с Al_2O_3 1850.
$ZnAl_2O_4$ **Ганит**, т. пл. 1950.
ZrO_2 — Al_2O_3 широкий минимум 1910.

Таблица 5—XI

Бораты (двойные)

$Ca_3B_2O_6$ т. пл. 1479 ± 3; эвтектика с $Ca_2B_2O_5$ (36% B_2O_3) 1291 ± 3
$Ca_2B_2O_5$ т. пл. 1298 ± 3; эвтектика с CaB_2O_4 (48,5% B_2O_3) 1132 ± 3
CaB_2O_4 т. пл. 1154 ± 3
CaB_4O_7 плавится инконгруэнтно в CaB_2O_4 и жидкость состава CaB_4O_7 986; CaB_4O_7 и две жидкости (77 до 99,5% B_2O_3) 971; эвтектика с B_2O_3 (> 99,5% B_2O_3) 450
CdB_2O_4 т. пл. 850; эвтектика на стороне CdO 750
$Cd_2B_6O_{11}$ т. пл. 860; жидкость, не смешивающаяся на стороне B_2O_3.
$K_2B_2O_4$ т. пл. 950; эвтектика с $K_2B_4O_7$ 787
$K_2B_4O_7$ т. пл. 815; эвтектика с $K_2B_6O_{10}$ 770
$K_2B_6O_{10}$ плавится инконгруэнтно в $K_2B_8O_{13}$ и жидкость 825
$K_2B_8O_{13}$ т. пл. 857; эвтектика с $K_2B_{10}O_{16}$ 780
$K_2B_{10}O_{16}$ т. пл. 780; эвтектика с B_2O_3 около 450
$Li_2B_2O_4$ т. пл. 843; эвтектика с $Li_2B_4O_7$ 680
$Li_2B_4O_7$ т. пл. 930; эвтектика с $Li_2B_6O_{10}$ 655
$Li_2B_6O_{10}$ т. пл. 750; эвтектика с $Li_2B_8O_{13}$ 700
$Li_2B_8O_{13}$ т. пл. 730; эвтектика с $Li_2B_{10}O_{16}$ 620
$Li_2B_{10}O_{16}$ т. пл. 680; эвтектика с B_2O_3 около 450
MnB_2O_4 т. пл. 840; эвтектика на стороне MnO 750
MnB_4O_7 т. пл. 950; эвтектика с MnB_2O_4 800
MnB_6O_{10} т. пл. 925; эвтектика с MnB_4O_7 860
$Na_4B_2O_5$ т. пл. 625; эвтектика с $Na_2B_2O_4$, определено 620
$Na_2B_2O_4$ т. пл. 966; эвтектика с $Na_2B_4O_7$ (68% B_2O_3) 740
$Na_2B_4O_7$ т. пл. 742 ± 1; триморфный (монотропный); эвтектика с $Na_2B_6O_{10}$ (72,3% B_2O_3) 722

$Na_2B_6O_{10}$ плавится инконгруэнтно в $Na_2B_8O_{13}$ и жидкость (76% B_2O_3) 766
$Na_2B_8O_{13}$ т. пл. 816; диморфный?, т. перех. 700; эвтектика с B_2O_3 около 450
$Pb_4B_2O_7$ т. пл. 565 ± 3; диморфный, т. перех. 552; эвтектика с PbO (6,3% B_2O_3) 560; эвтектика с $Pb_2B_2O_5$ (12% B_2O_3) 495
$Pb_2B_2O_5$ плавится инконгруэнтно в $Pb_5B_8O_{17}$ и жидкость (12,7% B_2O_3) 497; диморфный, т. перех. 473
$Pb_5B_8O_{17}$ плавится инконгруэнтно в PbB_4O_7 и жидкость (17% B_2O_3) 548
PbB_4O_7 т. пл. 768; в равновесии с 2 жидкостями (57 до 91% B_2O_3) 742; эвтектика с B_2O_3 около 450

Разное:
(1) **Жидкость несмешивающаяся** представлена системами B_2O_3 с As_2O_3, BaO, Bi_2O_3, CaO, CdO, CoO, Cu_2O, FeO, MgO, MnO, MoO_3, NiO, PbO, Sb_2O_3, SrO, TiO_2, V_2O_5, WO_3, ZnO.
(2) B_2O_3 очень слабо реагирует с Al_2O_3, Cr_2O_3, редкоземельными окислами, SnO_2, ThO_2, UO_3, U_3O_8, ZrO_2
(3) B_2O_3 реагирует с выделением O_2 с As_2O_5, CeO_2, CuO, Fe_2O_3, Mn_2O_3, Sb_2O_5, Tl_2O_3

Таблица 6—XI

Двойные системы (окиси)

BaO — MgO соединения отсутствуют; эвтектика (41 мол. % MgO) 1500
$BaZrO_3$ т. пл. 2650; эвтектика с BaO (10 мол. % ZrO_2) 1440; эвтектика с ZrO_2 (90 мол. % ZrO_2) 2050
BeO — CaO эвтектика (44% CaO) 1470
BeO — CeO_2 минимум 1960 (25 мол. % CeO_2)
BeO — CoO минимум 1750 (65 мол. % BeO)
BeO — Cr_2O_3 минимум 2210 (30% BeO)
BeO — Cu_2O эвтектика 1200 (около 1% BeO)
BeO — Fe_3O_4 минимум 1580 (15% BeO)
BeO — La_2O_3 минимум 1400 (25% BeO)
BeO — MgO минимум 1955 (48% BeO)
BeO — Mn_3O_4 минимум 1540 (16% BeO)
BeO — NiO эвтектика 1900 (12% BeO)
BeO — ThO_2 минимум 2210 (20% BeO)
$BeTiO_3$ т. пл. 1730; эвтектика с TiO_2 1690; эвтектика с Be_3TiO_5 1700
Be_3TiO_5 т. пл. 1800; эвтектика с BeO 1740

Продолжение табл. 6—XI

BeO — ZrO_2 эвтектика 2200 (75% BeO)
CaO — CeO_2 минимум 1980 (30% CaO)
CaO — CoO эвтектика 1420 (36% CaO)
CaO — Cr_2O_3 легко окисляется в хроматы
$CaCr_2O_4$ минимум 2160 (в N_2); эвтектика с CaO 1950: эвтектика с Cr_2O_3 2100
CaO — Cu_2O эвтектика 1140 (27% CaO)
$2CaO \cdot Fe_2O_3$ плавится инконгруэнтно в CaO и жидкость (38% CaO) 1436
$CaO \cdot Fe_2O_3$ плавится инконгруэнтно в $2CaO \cdot Fe_2O_3$ и жидкость (24,5% CaO) 1216; эвтектика с Fe_2O_3 (10% CaO) 1203
CaO — FeO непрерывные твердые растворы
CaO — MgO эвтектика 2360 (53% CaO)
CaO — Mn_3O_4 минимум 1450 (15% CaO)
CaO — NiO эвтектика 1750 (36% CaO)
CaO — SrO непрерывные твердые растворы
CaO — ThO_2 эвтектика 2300 (24% CaO)
$CaTiO_3$ Перовскит, т. пл. 1970; эвтектика с TiO_2 (12% CaO) 1420
Ca_2TiO_4 т. пл. 1800; эвтектика с $CaTiO_3$ 1750
Ca_3TiO_5 т. пл. 1860; эвтектика с Ca_2TiO_4 1780; эвтектика с CaO (70% CaO) 1850
$CaZrO_3$ т. пл. 2550; эвтектика с ZrO_2 (24% CaO) 2390; эвтектика с CaO (60% CaO) 2250
$CeO_2 \cdot Cr_2O_3$ т. пл. 2440
CeO_2 — Fe_2O_3 минимум 1510 (30% CeO_2)
CeO_2 — MgO минимум 2250 (20% CeO_2)
CeO_2 — Mn_3O_4 минимум 1540 (20% CeO_2)
CeO_2 — ThO_2 не плавится ниже 2600
CeO_2 — TiO_2 минимум 1500 (55% CeO_2)
CeO_2 — ZrO_2 не плавится ниже 2400
CoO — MgO непрерывные твердые растворы
CoO — ZrO_2 минимум 1730
$Cr_2O_3 \cdot FeO$. **Хромит**, т. пл. 1670
Cr_2O_3 — MgO непрерывное повышение температуры от Cr_2O_3 к MgO
Cr_2O_3 — ZrO_2 минимум 2320
Cu_2O — MgO эвтектика 1190 (20 мол. % MgO)
CuO — PbO эвтектика 698 (41% PbO)
FeO — MgO непрерывные твердые растворы
FeO — MnO непрерывные твердые растворы
(Fe, Zn, Mn)O · (Fe, Mn)$_2O_3$ франклинит, т. пл. >1420
$FeTiO_3$ Ильменит, природн., т. пл. 1450; диморфный, т. перех. 215
$Fe_2O_3 \cdot MgO$ **Магнезиоферрит**, т. пл. 1750 с потерей O_2
Fe_2O_3 — Mn_3O_4 твердые растворы (0—60 мол. % Fe_2O_3) при нагревании при 900—1300
Fe_2O_3 — ZrO_2 минимум 1520
K_2GeO_3 т. пл. 842; эвтектика с $K_2Ge_2O_5$ (63,6% GeO_2) 710
$K_2Ge_2O_5$ т. пл. 797; эвтектика с $K_2Ge_4O_9$ (70,4% GeO_2) 789
$K_2Ge_4O_9$ т. пл. 1038; эвтектика с GeO_2 (85,1% GeO_2) 1006
$La_2O_3 \cdot MgO$ т. пл. 2030; эвтектика с La_2O_3 (8% MgO) 1970; эвтектика с MgO (34% MgO) 1990
$La_2O_3 \cdot 3ZrO_2$?, плавится инконгруэнтно при 2300; эвтектика с La_2O_3 (20% ZrO_2) 2080
Li_4GeO_4 т. пл. 1298
Li_2GeO_3 т. пл. 1239
MgO — Mn_3O_4 постепенное повышение температуры, минимум отсутствует
MgO — NiO непрерывные твердые растворы
MgO — SrO эвтектика (45% MgO) 1935
Mg_2TiO_4 т. пл. 1840; эвтектика с MgO (64% MgO) 1800
$MgTi_2O_5$ т. пл. 1680; эвтектика с TiO_2 (10% MgO) 1650; эвтектика с Mg_2TiO_4 (29% MgO) 1620
MgO — ZrO_2 твердые растворы в ZrO_2 (0 до 40 мол.% MgO), диморфный, тетрагон. и кубич.; эвтектоид (50 мол.% MgO) 2150
$MnTiO_3$ Пирофанит, т. пл. 1405
Mn_3O_4 — ZrO_2 минимум 1460
Na_2GeO_3 т. пл. 1083; эвтектика с $Na_2Ge_2O_5$ (76% GeO_2) 778
$Na_2G_2O_5$ т. пл. 799; эвтектика с $Na_2Ge_4O_9$ (78,5% GeO_2) 789
$Na_2Ge_4O_9$ т. пл. 1052; эвтектика с GeO_2 (89% GeO_2) 1042
Na_2TiO_3 т. пл. 1030
$Na_2Ti_2O_5$ т. пл. 985
$Na_2Ti_3O_7$ т. пл. 1128

Продолжение табл. 6—XI

$NiO — ZrO_2$ минимум 1940
SnO_2 — ZrO_2; SnO_2 улетучивается, прежде чем происходит плавление
$SrZrO_3$ т. пл. > 2700
$ThO_2 — TiO_2$ минимум (45% TiO_2) 1640
$ThO_2 — ZrO_2$ твердые растворы, не смешиваются при 2700
$TiO_2 — ZrO_2$ эвтектика 1750
$ZnO — ZrO_2$ эвтектика 1810; ZnO улетучивается

Таблица 7—XI

Система из трех и более окисей (за исключением SiO_2)

$Al_2O_3 \cdot 4CaO \cdot Fe_2O_3$ т. пл. 1415 ± 5; эвтектика с CaO 1395; эвтектика с $Ca_5Al_6O_{14}$ 1335
— твердые растворы с $2CaO \cdot Fe_2O_3$
$Al_2O_3 \cdot 4CaO \cdot 2MgO \cdot Fe_2O_3$ распадается при 1350
— твердые растворы с $Al_2O_3 \cdot 4CaO \cdot Fe_2O_3$
— твердые растворы с $2CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot MgO$
— твердые растворы с $2CaO \cdot Fe_2O_3$
$Al_2O_3 — CaO — K_2O$ изучение ликвидуса и отношений твердой фазы (Браунмиллер, Бог, 1932); не образует тройных соединений
$Al_2O_3 — CaO — MgO$ изучение ликвидуса и отношений твердой фазы (Ранкин, Райт, 1916); не образует тройных соединений
$Al_2O_3 — CaO — Na_2O$ изучение ликвидуса и отношений твердой фазы (Браунмиллер, Бог, 1932)
— $(CaO)_3 \cdot (Na_2O)_2 \cdot (Al_2O_5)_3$ т. пл. > 1630
— $(CaO)_8 \cdot (Na_2O) \cdot (Al_2O_3)_3$ плавится инконгруэнтно в CaO и жидкость 1510
$Al_2O_3 — Cr_2O_3 — MgO$ (Бонтрон, 1931)
$B_2O_3 — K_2O — Na_2O$ система $K_2B_2O_4 — Na_2B_2O_4$ твердые растворы с минимумом (55 мол.% $Na_2B_2O_4$) 840; не смешивается в твердом состоянии при верхней критической температуре 550
$BeO — CaO — ZrO_2$ тройная эвтектика (15% BeO, 33% CaO) 2000
$BeO — CeO_2 — ZrO_2$ тройная эвтектика < 2000
$2CaO \cdot MgO \cdot Fe_2O_3$ непрерывные твердые растворы с $2CaO \cdot Fe_2O_3$
$CaO — ThO_2 — ZrO_2$ тройная эвтектика (33% CaO, 50% ZrO_2) 2200
$MgO — ThO_2 — ZrO_2$ тройная эвтектика? (30% MgO, 50% ZrO_2) 2100

Таблица 8—XI

Двойные силикаты

$Al_6Si_2O_{13}$ Муллит плавится инконгруэнтно в корунд и жидкость (44% SiO_2) 1810 ± 10; эвтектика с кристобалитом (94,5% SiO_2) 1545 ± 5
Al_2SiO_5 Силлиманит, Кианит, Андалузит: все распадаются до муллита и SiO_2; кианит > 1000, < 1325; андалузит > 1325, < 1410; силлиманит > 1345, < 1550
$B_2O_3 — SiO_2$ соединений нет; несмешивающиеся жидкости отсутствуют; эвтектика (около 100% B_2O_3) 450
Ba_2SiO_4 т. пл. > 1700; эвтектика с $BaSiO_3$ (24,5% SiO_2) 1551 ± 10
$BaSiO_3$ т. пл. 1604 ± 5; эвтектика с $Ba_2Si_3O_8$ (40% SiO_2) 1437±5
$Ba_2Si_3O_8$ т. пл. 1450 ± 2; непрерывные твердые растворы с $BaSi_2O_5$
$BaSi_2O_5$ т. пл. 1420 ± 5; эвтектика с тридимитом (51% SiO_2) 1374 ± 5
$BaO — SiO_2$ ликвидус кристобалита не имеет несмешивающихся жидкостей, в отличие от CaO—, SrO—,
Be_2SiO_4 Фенакит плавится инконгруэнтно? при > 1750; в системе $BeO—SiO_2$ нет жидкостей, не смешивающихся с SiO_2
Ca_3SiO_5 распад (ниже ликвидуса) 1900±20 на CaO и $Ca_2—SiO_4$
Ca_2SiO_4 Ларнит, т. пл. 2130 ± 20; эвтектика с CaO (30,5% SiO_2) 2065 ± 20; триморфный, т. перех. 675±5, 1420±5
$Ca_3Si_2O_7$ плавится инконгруэнтно в Ca_2SiO_4 и жидкость (44,5% SiO_2) 1475±5; эвтектика с $CaSiO_3$ (45,5% SiO_2) 1455 ± 5
$CaSiO_3$ Волластонит, псевдо-волластонит, т. пл. 1540 ± 2; т. перех. 1150 ± 10; эвтектика с тридимитом (63% SiO_2) 1436 ± 5
$CaO — SiO_2$ кристобалит сосуществует с двумя жидостями (72 до 90% SiO_2) 1698 ± 5

Продолжение табл. 8—XI

Cd_2SiO_4 плавится инконгруэнтно в CdO и жидкость 1252±10; эвтектика с тридимитом 1242 ± 5; весьма вероятно, жидкость не смешивается на ликвидусе кристобалита в системе $CdO — SiO_2$

$CoO — SiO_2$ 2 жидкости наблюдались при 1725, 90% SiO_2

$Cr_2O_3 — SiO_2$ в системе нет жидкостей, не смешивающихся в большой степени; эвтектика около SiO_2

Fe_2SiO_4 Фаялит, т. пл. 1205 ± 2; эвтектика с вюститом (FeO_{1+x}) (24% SiO_2) 1177 ± 5; эвтектика с тридимитом (38% SiO_2) 1178 ± 2

$FeO — SiO_2$ Кристобалит в присутствии 2 жидкостей (58 до 97% SiO_2) 1690 ± 10

$FeSiO_3$ **Клиноферросилит,** кристаллы в обсидиане из Кении и других мест (Боуэн); в системе может существовать только при низких температурах

$Fe_2O_3 — SiO_2$ соединений нет; гематит сосуществует с 2 жидкостями (2 жидкости наблюдались около 1700); эвтектика вблизи SiO_2

K_2SiO_3 т. пл. 976; триморфный (?), т. перех. 750 ± 10; 725 ± 10; эвтектика с $K_2Si_2O_5$ (45,5% SiO_2) 780 ± 10

$K_2Si_2O_5$ т. пл. 1045 ± 1; диморфный, т. перех. 594 ± 2; эвтектика с $K_2Si_4O_9$ (67,6% SiO_2) 742 ± 5

$K_2Si_4O_9$ т. пл. 770 ± 1; диморфный, т. перех. 592 ± 2; давление снижает точку плавления на 60° на килобар; поднимает т. перех. на 28° на килобар; эвтектика с кварцем (72,5% SiO_2) 769; эвтектика с тридимитом (73,6% SiO_2) 767 ± 2

Li_4SiO_4 плавится инконгруэнтно при 1255 ± 2; эвтектика с Li_2SiO_3 (55,3% SiO_3) 1024±2

Li_2SiO_3 т. пл. 1201±1

$Li_2Si_2O_5$ плавится инконгруэнтно в Li_2SiO_3 и жидкость (80,1% SiO_2) 1033 ± 2; эвтектика с тридимитом (82,2% SiO_2) 1028 ± 2; диморфный, т. перех. 939

Mg_2SiO_4 Форстерит, т. пл. 1890 ± 20; эвтектика с MgO (36% SiO_2) 1850 ± 20

$MgSiO_3$ **Энстатит** клино-энстатит; плавится инконгруэнтно в форстерит и жидкость (60,9% SiO_2) 1557 ± 2; т. перех. ромбич. в моноклин. 1140; эвтектика с кристобалитом (64,9% SiO_2) 1543 ± 2

$MgO — SiO_2$ кристобалит и 2 жидкости (от 69 до 99% SiO_2) 1695±5.

Mn_2SiO_4 Тефроит плавится инконгруэнтно в MnO и жидкость (34% SiO_2) 1340 ± 20; эвтектика с $MnSiO_3$ (37% SiO_2) 1210 ± 10

$MnSiO_3$ Родонит плавится инконгруэнтно в тридимит и жидкость (42% SiO_2) 1297±20;

$MnO — SiO_2$ кристобалит и 2 жидкости (от 51 до 98% SiO_2) 1695

Na_4SiO_4 плавится инконгруэнтно при 1118±5; эвтектика с Na_2SiO_3 (43,1% SiO_2) 1022±2

Na_2SiO_3 т. пл. 1089 ± 1; эвтектика с $Na_2Si_2O_5$ (62,1% SiO_2) 837 ± 1

$Na_2Si_2O_5$ т. пл. 874 ± 3; триморфный, т. перех. 678 и 706; эвтектика с кварцем (74,2% SiO_2) 789 ± 1; эвтектика с тридимитом 770 ± 5

$NiO — SiO_2$ 2 жидкости наблюдались при 1725, 90% SiO_2

$P_2O_5 — SiO_2$ соединения $SiO_2 \cdot P_2O_5$ и $3SiO_2 \cdot P_2O_5$ кристаллизуются быстро, тогда как компоненты SiO_2 и P_2O_5 стремятся к образованию из жидкости в стекловидном состоянии

Pb_4SiO_6 плавится инконгруэнтно в PbO и жидкость (6,7% SiO_2) 725 ± 2 триморфный, т. перех. 120—155 и 720 ± 2; эвтектика с Pb_2SiO_4 (8,2% SiO_2) 714 ± 3

Pb_2SiO_4 т. пл. 743 ± 3; эвтектика с $PbSiO_3$ (15,4% SiO_2) 716 ± 3

$Pb_3Si_2O_7$ **Барисилит,** т. пл. природн. 690; искусств. не кристаллизуется в течение 20 час. при 705

$PbSiO_3$ Аламозит, т. пл. 764 ± 3; эвтектика с кремнеземом (тридимитом?) (29,6% SiO_2) 732 ± 2

$Rb_2Si_2O_5$ т. пл. 1115

$Rb_2Si_4O_9$ т. пл. 957

$SnO_2 — SiO_2$ не дает несмешивающихся жидкостей при 80 и 90% SiO_2 соответственно при 1715 и 1725

Sr_2SiO_4 т. пл. > 1700; эвтектика с $SrSiO_3$ (34,5% SiO_2) 1545 ± 5

$SrSiO_3$ т. пл. 1580 ± 4; эвтектика с тридимитом (53,5% SiO_2) 1358 ± 5

$SrO — SiO_2$ Кристобалит и 2 жидкости (от 70 до 97,5% SiO_2) 1693 ± 5

$TiO_2 — SiO_2$ эвтектика (10,5% TiO_2) 1540 ± 10

Zn_2SiO_4 **Виллемит,** т. пл. 1512 ± 5; эвтектика с ZnO (22,5% SiO_2) 1507 ± 5; эвтектика с тридимитом (50,9% SiO_2) 1432 ± 5

$ZnO — SiO_2$ Кристобалит и 2 жидкости (от 65 до 98% SiO_2) 1695 ± 5

$ZrSiO_4$ **Циркон,** т. пл. 2430 ± 20; эвтектика с SiO_2 (94% SiO_2) 1705; эвтектика с ZrO_2 (26% SiO_2) 2220

Таблица 9—XI

Силикатные системы, тройные и более высокие

(за исключением систем с Al_2O_3 и B_2O_3)

$BaBe_2Si_2O_7$ типичный **«Юстит»** (Аминов, 1923) кристаллизуется в шлаках, даны термические данные

$BaCa_2Si_3O_9$ плавится инконгруэнтно в псевдо-волластонит и жидкость (48% $CaSiO_3$) 1320 ± 4; эвтектика в $BaSiO_3$ (27,5% $CaSiO_3$) 1270 ± 3 (Эскола, 1922)

$BaSiO_3$ — Li_2SiO_3 эвтектика (23% Li_2SiO_3) 880; твердые растворы? (Валлас, 1909)

$BaSiO_3$ — $MgSiO_3$ аналога с диопсидом не существует (Эскола, 1922)

BaO — MnO — SiO_2 предварительное изучение (Лебедев, 1911)

$BaSiO_3$ — Na_2SiO_3 эвтектика? (50—60% Na_2SiO_3) 900 (Валлас, 1909)

BaO — SiO_2 — TiO_2 предварительное изучение (Смоленский, 1912)

BeO — K_2O — SiO_2 предварительное изучение (Сильвермен, Лаи, Инслей, 1930)

BeO — Na_2O — SiO_2 предварительное изучение (Сильвермен, Лаи, 1928)

$CaCuSi_4O_9$ «Египетская синь» древних (Лаиру, Маклинток, Майльс, 1914; Фукэ, 1889)

$CaO \cdot FeO \cdot SiO_2$; **Ca-Fe-Оливин,** т. пл. 1208 ± 3. Непрерывные твердые растворы с фаялитом дают минимум при 1030; двойная система с волластонитом; эвтектика 1205; не двойная в области ликвидуса с Ca_2SiO_4; β Ca_2SiO_4 твердые растворы (10% Fe_2SiO_4) в равновесии с Ca — Fe оливином (59% Ca_2SiO_4) и жидкостью (54% Ca_2SiO_4) при 1230 ± 2 (Боуэн, Шерер, 1933)

$CaO \cdot FeO \cdot 2SiO_2$ **Геденбергит** превращается в твердый раствор волластонита, того же состава при 965; не двойной — в области ликвидуса (Боуэн, Шерер, 1933).

CaO — FeO — SiO_2 тройные поля (1) кремнезем с 2 жидкостями; (2) α$CaSiO_3$; (3) β-волластониты (т. перех. α—β достигает от 1150 до 1285), (4) Ca — Fe оливины; (5) твердые растворы β Ca_2SiO_4

— не дает тройной эвтектики, минимум на границе между β-волластонитами и Ca — Fe оливинами (17% CaO, 46% FeO) при 1093

— были изучены реакции твердой фазы (Боуэн, Шерер, Позняк; 1932, 1933)

CaO — Fe_2O_3 — SiO_2 (Ганзен, Богю, 1926)

$CaFeSi_2O_6$ — $CaMgSi_2O_6$ **Геденбергит — Диопсид,** твердые растворы (Винчелл, 1923, на основании изучения показателей преломления)

$Ca_2K_2Si_9O_{21}$ плавится инконгруэнтно в β $CaSiO_3$ и жидкость 1050; эвтектика с $K_2Si_4O_9$ 730; тройная эвтектика с $K_2Si_4O_9$ и кварцем 720; тройная эвтектика с $K_2Si_2O_5$ и $K_2Si_4O_9$ 720

$CaK_8Si_{10}O_{25}$ т. пл. 946

$CaK_4Si_6O_{15}$ т. пл. 959

$Ca_3K_2Si_6O_{16}$ плавится инконгруэнтно в β $CaSiO_3$ и жидкость 1020; диморфный, т. перех. 985

$CaK_4Si_3O_9$ плавится инконгруэнтно в CaK_2SiO_4 и жидкость 1005; эвтектика с K_2SiO_3 900; эвтектика с $K_2Si_2O_5$ 900; эвтектика с $CaK_8Si_{10}O_{25}$ 895; эвтектика с $CaK_4Si_6O_{15}$ 895; тройная эвтектика с K_2SiO_3 и $K_2Si_2O_5$ 770

CaK_2SiO_4 т. пл. 1630

CaO — K_2O — SiO_2 область хороших стекол; поля $Ca_2K_2Si_9O_{21}$ и $Ca_3K_2Si_6O_{16}$, границы состава от 2 до 15% CaO, от 67 до 73% SiO_2 (Морэй, Крачек, Боуэн)

$Ca_4Li_{12}Si_5O_{20}$ т. пл. 1105; эвтектика с $Ca_6Li_8Si_5O_{20}$ 1085

$Ca_6Li_8Si_5O_{20}$ т. пл. 1095; эвтектика с Ca_2SiO_4 1070 (Швартц, Гааке, 1921)

$CaSiO_3$ — Li_2SiO_3 эвтектика (50% Li_2SiO_3) 980 (Валлас, 1909).

$CaMgSi_2O_6$ **Диопсид,** т. пл. 1391 ± 1; твердые растворы пироксена: (а) непрерывная серия с клиноэнстатитом, (б) с избытком молекул ($CaSiO_3$) к границе с β-волластонитом (β $CaSiO_3$); эвтектика с β-волластонитом 1358

$Ca_2MgSi_2O_7$ **Акерманит, т. пл. 1458**

$CaMgSiO_4$ **Монтичеллит,** плавится инконгруэнтно в периклаз и жидкость 1503; прерывная серия твердых растворов, содержащая до 10% избытка Mg_2SiO_4

CaO — MgO — SiO_2 наинизшая тройная эвтектика с диопсидом, тридимитом и $Ca_5Mg_2Si_6O_{19}$ (30,6% CaO, 8% MgO) 1320

— Форстерит (Mg_2SiO_4) — диопсид, двойная эвтектика 1387 (23,1% CaO, 22,5% MgO)

— Волластонит ($CaSiO_3$) образует ограниченную серию твердых растворов с диопсидом, который повышает т. перех. α — β от 1150 до 1368; ограниченные твердые растворы с акерманитом (вплоть до 70% акерманита)

— кристобалит и 2 жидкости (от 72 до 99% SiO_2 и от 69 до 99% SiO_2 соответственно у боковых линий CaO — SiO_2 и MgO — SiO_2) 1695 ± 5 (Фергусон, Мервин, 1919; Грейг, 1927)

$CaMgSi_2O_6$—$CaTiO_3$ **Диопсид—Перовскит** эвтектика (31% $CaTiO_3$) 1268 (Низиока, 1936)

Продолжение табл. 9—XI

$CaSiO_3$ — $MnSiO_3$ **Волластонит — Родонит,** изодиморфные твердые растворы α—β $CaSiO_3$, т. перех. повышается от 1150 до 1374±4; β $CaSiO_3$ полностью смешивается с родонитом (Фоос, 1930)

Ca_2SiO_4 — Mn_2SiO_4 **Ларнит — Тефроит,** твердые растворы с минимумом (15 мол. % Mn_2SiO_4) 1170; **Глаукохроит** ($CaMnSiO_4$) при 50—50 мол. % твердые растворы? (Калленберг, 1914, Токоди, 1928)

$CaSiTiO_5$ — $MnTiO_3$ **Титанит — Родонит;** эвтектика (48% $MnTiO_3$) 1210 (Ивасэ, Низиока, 1936)

$CaNa_4Si_3O_9$, плавится инконгруэнтно в $Ca_2Na_2Si_3O_9$ и жидкость 1141; эвтектика с Na_2SiO_3 1060

$Ca_2Na_2Si_3O_9$ т. пл. 1284; эвтектика с $Na_2Si_2O_5$ 862

$Ca_3Na_2Si_6O_{16}$ плавится инконгруэнтно в β $CaSiO_3$ и жидкость (15% CaO, 67% SiO_2) 1047

CaO—Na_2O—SiO_2 наинизшая тройная эвтектика с $Ca_3Na_2Si_6O_{16}$, $Na_2Si_2O_5$ и кварцем (5,2% CaO, 73,5% SiO_2) 725.

— область хороших стекол; поле $Ca_3Na_2Si_6O_{16}$ и непосредственно прилегающие области в границах от 5 до 15% CaO, от 67 до 74% SiO_2 (Морей, Боуэн, 1925, Морей, 1930)

$CaSiO_3$ — $SrSiO_3$ серия твердых растворов с минимумом (56% $SrSiO_3$) при 1475 (Эскола, 1922)

$CaSiTiO_5$ **Сфен,** т. пл. 1382; эвтектика с $CaTiO_3$ (11% $CaTiO_3$) 1375; эвтектика с тридимитом (14% SiO_2) 1373; эвтектика с α $CaSiO_3$ (41% $CaSiO_3$) 1340; эвтектика с рутилом (20,5% TiO_2) 1375. Были также исследованы метаустойчивые кристаллизации (Ивасэ, Фукусима, 1936)

$CdSiO_3$ — $ZnSiO_3$ Ван Клостер в 1910 г. получил твердые растворы с минимумом 1052; однако $ZnSiO_3$ (и, вероятно, $CdSiO_3$) по более поздним сведениям не существует

Co_3O_4 — Fe_2O_3 — SiO_2 тройная эвтектика (деформация конуса) 1150 (Шеперд, 1929)

FeO — Fe_2O_3 — SiO_2 Несмешивающаяся жидкость (Грейг, 1927; Боуэн, Шерер, 1930)

— тройная эвтектика с фаялитом, грюнеритом и Fe_3O_4 при (40% FeO, 20% Fe_2O_3, 40% SiO_2) (Халлимонд, Уитлей, 1919); однако грюнерит ($FeSiO_3$ амфибол) по более поздним данным не кристаллизуется в двойной FeO — SiO_2.

$Fe_2O_3 \cdot K_2O \cdot 6SiO_2$ **«Железный ортоклаз»** плавится инконгруэнтно в $Fe_2O_3 \cdot K_2O \cdot 4SiO_2$ и жидкость, богатую SiO_2, 920

$Fe_2O_3 \cdot K_2O \cdot 4SiO_2$ **«Железный лейцит»** плавится инконгруэнтно в Fe_2O_3 и жидкость 1050 (Фрост, 1936)

Fe_2SiO_4 — Mg_2SiO_4 серия твердых растворов **фаялит — форстерит;** оливины

$FeSiO_3$ — $MgSiO_3$ не двойной в области ликвидуса; важные серии твердых растворов орто- и клинопироксенов, серия **энстатит — гиперстен.** Фазовые соотношения слишком сложны для краткого реферата

FeO — MgO — SiO_2 тройные поля в области ликвидуса:

(1) твердые растворы FeO — MgO;
(2) твердые растворы Fe_2SiO_4 — Mg_2SiO_4 оливинов;
(3) клинопироксены;
(4) тридимит;
(5) кристобалит;
(6) область несмешивающейся жидкости;
(7) в системе нет тройной эвтектики (Боуэн, Шерер, 1935)

FeO — MnO — SiO_2 выведена диаграмма шлака (Бенедикс, Лефквист, 1929), термическое изучение (Меддокс, 1935)

$Fe_2O_3 \cdot Na_2O \cdot 4SiO_2$ **Акмит,** плавится инконгруэнтно в Fe_2O_3 и жидкость (14,7% Na_2O, 25,8% Fe_2O_3, 56,8% SiO_2) 990; эвтектика с $Na_2Si_2O_5$ 810, $5Na_2O \cdot Fe_2O_3 \cdot 8SiO_2$ 817

$Fe_2O_3 \cdot 5Na_2O \cdot 8SiO_2$ искусств.; может встречаться в природе, т. пл. 838; эвтектика с $Na_2Si_2O_5$ 818; эвтектика с Na_2SiO_3 837; эвтектика с гематитом 816

$4Fe_2O_3 \cdot 6Na_2O \cdot 5SiO_2$ искусств. т. пл. > 1091

$Fe_2O_3 \cdot 2Na_2O \cdot SiO_2$? искусств. т. пл. > 1145

Fe_2O_3 — Na_2O — SiO_2 тройная эвтектика с кварцем, акмитом и $Na_2Si_2O_5$ (4,2% Fe_2O_3, 72,1% SiO_2) 760

— тройная эвтектика с акмитом, гематитом и (1 : 5 : 8) при (28,8% Fe_2O_3, 45,4% SiO_2) 809

— точка реакции акмита, тридимита, гематита (21,7% Fe_2O_3, 67,9% SiO_2) 955

— важные поля:

(1) гематит с несмешивающейся жидкостью, связывающей боковую линию Fe_2O_3 — SiO_2; (2) поле кремнезема без несмешивающейся жидкости; (3) акмит; (4) $NaSi_2O_5$; (5) (1 : 5 : 8); (6) Na_2SiO_3 (Боуэн, Шерер, Виллемс, 1930)

Продолжение табл. 9—XI

K_2SiO_3 — Li_2SiO_3 (Валлас, 1909)
K_2SiO_3 — Na_2SiO_3 эвтектика (30% Na_2SiO_3) 745
$K_2Si_2O_5$ — Na_2SiO_3 эвтектика (35% Na_2SiO_3) 680
$K_2Si_2O_5$ — $Na_2Si_2O_5$ три серии твердых растворов в области ликвидуса, минимум (17,0% Na_2O, 61,0% SiO_2) 733
$KNaSi_2O_5$ распадается на твердые растворы того же состава 296
K_2O—Na_2O—SiO_2 наинизшая тройная эвтектика (8% Na_2O, 69% SiO_2) 540 (Крачек, 1932)
$K_2Pb_2Si_2O_7$ т. пл. 918 ± 3; эвтектика с $K_2Si_2O_5$ 806; эвтектика с Pb_2SiO_4 704; эвтектика с $K_2PbSi_4O_{10}$ 716; эвтектика с $K_2Pb_4Si_8O_{21}$ 683
$K_4PbSi_3O_9$ плавится инконгруэнтно в $K_2Pb_2Si_2O_7$ 735
$K_2PbSi_4O_{10}$ т. пл. 757; эвтектика с $K_2Si_2O_5$ 740; эвтектика с $K_2Si_4O_9$ 715; эвтектика с $K_2Pb_4Si_8O_{21}$ 719; эвтектика с кварцем? 718; тройная эвтектика с $K_2Si_4O_9$ и кварцем? (19% PbO, 63% SiO_2) около 700
$K_2Pb_4Si_8O_{21}$ т. пл. 779; эвтектика с $PbSiO_3$ (аламозит) 737 (Геллер, Бантинг, 1936)
Li_2SiO_3 — $MgSiO_3$ эвтектика (55% $MgSiO_3$) 870 (Валлас, 1909)
$LiNaSiO_3$ плавится инконгруэнтно при 847± 1; непрерывные твердые растворы с Na_2SiO_3; точка минимума в области ликвидуса 845 ± 1 (Крачек, 1939)
Li_2SiO_3 — $SrSiO_3$ эвтектика (60% $SrSiO_3$) 990 (Валлас, 1909)
Li_2SiO_3 — идеальный $ZnSiO_3$; минимум (52% Li_2SiO_3) 990 (Ван Клостер, 1911)
$4Li_2O \cdot 3ZrO_2 \cdot 5SiO_2$ т. пл. 1152; эвтектика с Li_4SiO_4 1021; эвтектика с $ZrSiO_4$ (не определено) (Шварц, Гааке, 1921)
Mg_2SiO_4 — Mn_2SiO_4 **Форстерит — Тефроит,** серии твердых растворов (Калленберг, 1911)
$MgSiO_3$ — $MnSiO_3$ **Энстатит — Родонит,** не полностью двойной в области ликвидуса; диморфная серия твердых растворов; т. перех. α—β $MgSiO_3$ повышается от 1150 до 1330; ниже т. перех. непрерывная серия ромбических манганопироксенов (по Лебедеву 1911, с изменением)
MgO — Na_2O — SiO_2 (Валлас, 1909, Лебедев, 1911, Грейг, 1928)
MgO — SrO_2 — SiO_2 не существует аналога с диопсидом (Эскола, 1922)
$MnSiO_3$ — $MnTiO_3$ **Родонит — Пирофанит;** эвтектика (27% $MnTiO_3$) 1120 (Смоленский, 1912; Кэн, 1920)
Na_2GeO_3 — Na_2SiO_3 серия твердых растворов с минимумом (40% Na_2SiO_3) при 1062
$Na_2Pb_2SiO_5$ т. пл. 840
$Na_2Pb_2Si_3O_9$ т. пл. 630 (Кракау, 1936)
Na_2SiO_3 — $SrSiO_3$ (Валлас, 1909)
$Na_2Si_2Ti_2O_9$ **Рамзаит,** т. пл. 624 (Гинзберг, Никогосиан, 1928)
Na_2SiZrO_5 плавится инконгруэнтно в ZrO_2 и жидкость 1477; эвтектика с Na_2SiO_3 1077 (Д'Анс, Леффлер, 1930)

Таблица 10—XI
Алюмосиликаты

Al_2O_3 — FeO — SiO_2 тройная эвтектика тридимит, фаялит, герцинит 1073 ± 5 (40,5% SiO_2, 12,5% Al_2O_3, 47% FeO). Пятерная точка герцинит, муллит, тридимит 1210 ± 10 (46,5% SiO_2, 20,0% Al_2O_3, 33,5% FeO). Пятерная точка муллит, корунд, герцинит 1375 ± 10 (35% SiO_2, 27% Al_2O_3, 38% FeO) (Шерер, не опубликовано)
$BaAl_2Si_2O_8$ **Цельзиан,** т. пл. > 1700; непрерывные твердые растворы с **ортоклазом** ($KAlSi_3O_8$) — **гиалофановыми полевыми шпатами** (Эскола, 1922)
$BaAl_2Si_2O_8$ — $CaAl_2Si_2O_8$ **Цельзиан — Анортит,** твердые растворы (Гинзберг, 1915)
$Be_3Al_2Si_6O_{18}$ **Берилл,** т. пл. 1420 (природн.)
$CaAl_2Si_2O_8$ **Анортит,** т. пл. 1550 ± 2; эвтектика с тридимитом (10,5% CaO; 70% SiO_2) 1359; эвтектика с α $CaSiO_3$ (34,1% CaO, 47,3% SiO_2) 1299, эвтектика с α Al_2O_3 (19,3% CaO; 41,4% SiO_2) 1547; эвтектика с гелинитом (30,2% CaO; 33,0% SiO_2) 1385; тройная эвтектика с муллитом и тридимитом (9,8% CaO; 70,4% SiO_2) 1345; тройная эвтектика с α$CaSiO_3$ и тридимитом (23,3% CaO; 62,2% SiO_2) 1170; тройная эвтектика с α$CaSiO_3$ и гелинитом (38% CaO; 42% SiO_2) 1265; тройная эвтектика с гелинитом и αAl_2O_3 (29,2% CaO; 31,8% SiO_2) 1380; точка реакции с αAl_2O_3 и муллита (15,6% CaO; 47,9% SiO_2) 1512 (Боуэн, 1912, Ранкин, Райт, 1915)
$Ca_2Al_2SiO_7$ **Гелинит,** т. пл. 1590 ± 2; эвтектика с α $CaSiO_3$ (45,7% CaO; 41,1% SiO_2) 1316; эвтектика с α Ca_2SiO_4 (49,6% CaO; 26,7% SiO_2) 1545; эвтектика с $CaAl_2O_4$ (37,8% CaO, 9,3% SiO_2) 1512; эвтектика с $Ca_3Al_{10}O_{18}$ (35,0% CaO; 14,2% SiO_2) 1552
$Ca_3Al_2SiO_8$ только искусственный; распадается ниже ликвидуса, 1335, на гелинит и $CaAl_2O_4$

Продолжение табл. 10—XI

CaO — Fe_2O_3 — Al_2O_3 — SiO_2 несколько тройных сечений через четверную систему; нет четверных соединений (Ли, Паркер, 1934)

$CaAl_2Si_2O_8$ — $KAlSi_2O_6$ — SiO_2 **Анортит — Лейцит — SiO_2**; поля анортита; лейцита, ортоклаза и SiO_2; наклон к тройной эвтектике с ортоклазом, анортитом и тридимитом $\leqq$ около 1000 (3 анортита; 43 лейцита, 54 SiO_2) (Боуэн, 1937)

$CaMgSiO_2O_6$ — $KAlSi_2O_6$ **Диопсид—Лейцит** эвтектика (61,5% диопсида) 1300 ± 2 (Боуэн, Шерер, 1929)

$CaMgSi_2O_6$ — $KAlSi_2O_6$ — SiO_2 **Диопсид—Лейцит — SiO_2**; поля вышеупомянутых соединений и ортоклаза; наклон к тройной эвтектике с ортоклазом, тридимитом и диопсидом. > 1000 (2 диопсида, 43 лейцита, 55 SiO_2) (Боуэн, 1915)

$CaMgSi_2O_6$—$CaAl_2Si_2O_8$ **Диопсид—Анортит**; эвтектика (42% анортита) 1270 (Боуэн, 1915)

$Ca_2MgSi_2O_7$ — $Ca_2Al_2SiO_7$ **Акерманит—Гелинит**, серия твердых растворов с минимумом (27% гелинита) 1385 (Фергусон, Бэддингтон, 1920)

$Ca_2MgSi_2O_7$ — $Ca_2Al_2SiO_7$ — $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ **Акерманит—Гелинит—Гроссуляр**, серия твердых растворов (Бэддингтон, 1922)

$CaAl_2Si_2O_8$ — Mg_2SiO_4 — SiO_2 **Анортит — Форстерит — SiO_2**, частично четверная в ликвидусе из-за внедрения поля шпинели ($MgAl_2O_4$);

— поля (1) кристобалита и 2 жидкостей; (2) клиноэнстатита; (3) форстерита; (4) анортита;

— тройная эвтектика с тридимитом, клиноэнстатитом и анортитом (50,5% анортита, 23,6% энстатита, 25,9% SiO_2) 1222 ± 5 (Андерсен, 1915)

$CaSiO_3$ — $CaMgSi_2O_6$ — $CaAl_2Si_2O_8$ **Волластонит—Диопсид—Анортит**, частично четверные у ликвидуса вследствие внедрения поля $Ca_5Mg_2Si_6O_{19}$ (?); в других случаях просто тройные, эвтектика с волластонитом, диопсидом и анортитом в первичных фазах (33% волластонита, 27% диопсида, 40% анортита) 1243 (Кох, 1930)

Ca_2SiO_4 — MgO — $Ca_5Al_6O_{14}$ (Ганзен, 1928)

$CaMgSi_2O_6$ — $NaAlSi_3O_8$ **Диопсид—Альбит**; эвтектика (97% альб.) 1085 (Боуэн, 1915)

$CaMgSi_2O_6$ — $CaAl_2Si_2O_8$ — $NaAlSi_3O_8$ **Диопсид — Анортит — Альбит**, только два поля у ликвидуса; плагиоклазовые полевые шпаты и диопсид; граница снижается от диопсид-анортитовой эвтектики (1270) к диопсид-альбитовой эвтектике (1085) (Боуэн, 1915)

$CaAl_2Si_2O_8$ — $NaAlSi_3O_8$ **Анортит—Альбит; плагиоклазовые полевошпаты**, серия твердых растворов. Измерены интервалы плавления:

		Солидус	Ликвидус
	An	1550 ± 2	1550±2
Ab_1	An_5	1465±4	1521±2
Ab_1	An_2	1372±4	1490±2
Ab_1	An_1	1287±4	1450±2
Ab_2	An_1	1205±5	1394±2
Ab_3	An_1	1175±8	1362±2
Ab_{775}	An_{225}	1158±5	
Ab_4	An_1		1334
Ab_8	An_1		1265±3
Ab_{98}	An_1	1100±10	

(Боуэн, 1913)

$CaAl_2Si_2O_8$ — $Na_2Al_2Si_2O_8$ **Анортит — Нефелин (Карнегиит)**, диморфная серия твердых растворов; т. перех. нефелин—карнегиит повышается от 1248 до 1352; ниже перехода нефелин в твердом растворе принимает до 36% анортита, в равновесии с анортитом, содержащим в твердом растворе до 4% нефелина — эвтектика (45% анортита) 1305 (Боуэн, 1912)

$(Ca,Na_2)_3Al_2Si_3O_{12}$ **Сарколит** (Монте Сомма), распадается? 1150—1170

$CaAl_2Si_2O_8$ — $SrAl_2Si_2O_8$ **Анортит — Стронциевый анортит**, возможна непрерывная серия твердых растворов (Эскола, 1922)

$CaAl_2Si_2O_8$ — $CaTiO_3$ **Анортит — Перовскит**; эвтектика (34,5% $CaTiO_3$) 1350

$CaAl_2Si_2O_8$ — $CaTiSiO_5$ **Анортит — Сфен**; эвтектика (62% $CaTiSiO_5$) 1290

$CaAl_2Si_2O_8$ — $CaSiO_3$ — $CaTiSiO_5$ **Анортит—Волластонит—Сфен**; тройная эвтектика (39% анортита, 25% титанита, 35% волластонита) 1240 (Ивасэ, Низиока, 1936)

Fe_2SiO_4 — $NaAlSi_3O_8$ **Фаялит — Альбит** эвтектика (84% альбита) 1050 ± 5 (Боуэн, Шерер, 1936)

FeO — $NaAlSiO_4$ — SiO_2 **Вюстит — Нефелин — SiO_2**

— нет тройных соединений;

— тройная эвтектика с Ne., Ab., Fa как первичные фазы 990 (9% FeO; 30% SiO_2);

Продолжение табл. 10—XI

$FeO — NaAlSiO_4 — SiO_2$ — тройная эвтектика с Fa., Ab., тридимитом в качестве первичных фаз 990 (5% FeO, 61% SiO_2);
— частично четверные у ликвидуса вследствие внедрения герцинитового поля ($FeAl_2O_4$)
— важные поля: (1) кристобалита и 2 жидкостей; (2) тридимита; (3) альбита; (4) фаялита; (5) нефелина; (6) вюстита (Боуэн, Шерер, 1938)

$KAlSiO_4$ Калиофилит, т. пл. > 1755, т. перех. $\alpha—\beta$ 1550 ± 10 (Боуэн, 1917)

$KAlSi_2O_6$ Лейцит, т. пл. 1686 ± 5, т. перех. $\alpha—\beta$ от 560 до 714 (Боуэн, Шерер, 1929)

$KAlSi_3O_8$ Ортоклаз плавится инконгруэнтно в лейцит и жидкость (73% лейцита, 27% SiO_2) 1170 ± 10; эвтектика с SiO_2 (60% лейцита, 40% SiO_2) < 1000 (Морей, Боуэн, 1922)

$KAlSiO_4 — NaAlSiO_4$ Калиофилит — Нефелин (Карнегиит)
— β-калиофилит и β-нефелин образуют непрерывную серию твердых растворов
— т. перех. $\alpha—\beta$-калиофилит повышается от 1550 до 1580
— т. перех. $\alpha—\beta$-нефелин (карнегиита в β-нефелин) повышается от 1248 до 1405
— ликвидус карнегиита снижается при добавлениях калиофилита к эвтектике (27% калиодилита) 1405 (т. перех.), причем вторая первичная фаза представляет собой твердый раствор β-калиофилит—нефелин
— ликвидус α-калиофилита снижается до перитектического состояния при 1580 с твердым раствором β-калиофилит — нефелин как вторая первичная фаза
— между 1405 и 1580 первичной фазой является твердый раствор β-калиофилит — нефелин (Боуэн,1917)

$KAlSi_3O_8 — NaAlSi_3O_8$ Ортоклаз—Альбит, минимум 1070, ближе к альбиту, чем к ортоклазу; первичная фаза: серия непрерывных твердых растворов с минимумом (Боуэн, Шерер, 1937)

$KAlSiO_4 — NaAlSiO_4 — SiO_2$ Калиофилит — Нефелин — SiO_2
— поля в системе:
(1) SiO_2 (кристобалит, тридимит);
(2) твердые растворы альбит — ортоклаз;
(3) лейцит;
(4) серии твердых растворов β-калиофилит — нефелин
— нет тройной эвтектики; минимум в поле (2) (10% калиофилита, 30% нефелина, 60% SiO_2) < 1050; второй минимум вдоль границы между полями (2) и (4) (18% калиофилита, 47% нефелина, 35% SiO_2) 1038
— пятерная точка (нет тройной эвтектики) между полями (2), (3) и (4) (20% калиофилита, 46% нефелина, 34% SiO_2) 1042
— добавочные поля (5) карнегиита, (6) α-калиофилита не имеют значения в системе (Боуэн, Шерер, 1937)

$LiAlSiO_4$ Эвкриптит, т. пл. (искусств.) 1388; диморфный; т. перех. не определена

$LiAlSi_2O_6$ Сподумен, т. пл. (природн.) 1418—1428; т. пл. (искусств.) 1417; диморфный (монотропный?), β превращается в α при 900—1000

$LiAlSi_4O_{10}$ Петалит, т. пл. 1370; диморфный, т. перех. моноклин. в кубич. 1150 (Егер, Жимэк, 1914)

$Mg_2Al_2Si_5O_{18}$ Кордиерит плавится инконгруэнтно в муллит и жидкость 1470; диморфный (монотропный), т. перех. β в α от 925 до 1150

$Mg_5Al_{12}Si_2O_{27}$ Сапфирин (Валь Кодеро) плавится инконгруэнтно в $MgAl_2O_4$ и жидкость 1580

$MgO — Al_2O_3 — SiO_2$ тройная эвтектика между тридимитом, клиноэнстатитом и кордиеритом (20,3% MgO; 18,3% Al_2O_3) 1345
— тройная эвтектика между $MgAl_2O_4$, MgO и форстеритом (56% MgO; 16% Al_2O_3) 1700
— поля муллита и корунда имеют меньшее значение (Ранкин, Мервин, 1918)

$Mn_2Al_2SiO_7$ Марганцевый гелинит встречается в шлаках, т. пл. 1170

$MnAl_2Si_2O_8$ Марганцевый юстит — в шлаках, т. пл. 1130 (Глазер, 1926)

$NaAlSiO_4$ Нефелин (Карнегиит), т. пл. 1526; т. перех. Ne—Cg 1248; т. перех. в Ne 660—690; эвтектика с $Na_2Si_2O_5$ 768; эвтектика с Na_2SiO_3 846; тройная эвтектика с Na_2SiO_3 и $Na_2Si_2O_5$ 762; эвтектика с альбитом 1068 (Боуэн, 1912; Тилей, 1933; Грейг, 1938)

$NaAlSi_3O_8$ Альбит, т. пл. 1118 ± 4; эвтектика с $Na_2Si_2O_5$ 780; тройная эвтектика с $Na_2Si_2O_5$ и нефелином < 740 (Грейг, 1938, Шерер)

$SrAl_2Si_2O_8$ Стронциевый анортит, т. пл. > 1700; изоморфный с анортитом (Эскола, 1922)

$ZnO — Al_2O_3 — SiO_2$ тройная эвтектика между виллемитом, ганитом и тридимитом (40 мол. % ZnO; 8 мол. % Al_2O_3) 1305 ± 5 (Бэнтинг, 1935)

Таблица 11—XI

Боросиликаты

$Ca_5B_2SiO_{10}$ т. пл. 1419 ± 5; эвтектика с Ca_2SiO_4 (67,7% CaO; 13,3% B_2O_3) 1400 ± 5; эвтектика с $Ca_3B_2O_6$ (69,4% CaO; 22,8% B_2O_3) 1415 ± 5; эвтектика с CaO (69,7% CaO; 16,2% B_2O_3) 1412 ± 5 (Флинт, Уэллс, 1936)

$CaB_2Si_2O_8$ Данбурит, разлагается с образованием 2 жидкостей при 996—1002 (Морей, Ингерсон, 1937)

$CaO — B_2O_3 — SiO_2$ главной отличительной чертой является область несмешивающихся жидкостей (лежащая между 72 и 99% SiO_2; 77 и 99,5% B_2O_3); ниже находятся кристаллические CaB_4O_7, CaB_2O_4, $CaSiO_3$, (под вопросом) тридимит и кристобалит

— самая низкая температура эвтектики или точка реакции? (38,3% CaO; 31,5% B_2O_3) 977, присутствуют фазы: $CaSiO_3$, CaB_2O_4, тридимит (Флинт, Уэллс, 1936; Морей, Ингерсон, 1937)

$Li_2B_2O_4 — Li_2SiO_3$ эвтектика (22% Li_2SiO_3) 803 (Ван Клостер, 1910)

$Na_2B_2O_4 — Na_2SiO_3$ эвтектика (20% Na_2SiO_3) 800 (Ван Клостер, 1910)

Таблица 12—XI

Разные системы, содержащие силикаты

$3CaO \cdot P_2O_5 \cdot 3SiO_2$ т. пл. 1630

$5CaO \cdot P_2O_5 \cdot 2SiO_2$ Силикокарнотит, т. пл. > 1770

$9CaO \cdot P_2O_5 \cdot 3SiO_2$ т. пл. > 1750

$Fe_2SiO_4 — FeS$ эвтектика (47% FeS) 995

$FeSiO_4 — MnS$ эвтектика (10% MnS) 1055

$MnSiO_3 — MnS$ эвтектика (10% MnS) 1250

$Na_2SiO_3 — NaF$ эвтектика (39% NaF) 795

$Na_2SiO_3 — Na_2SO_4$ эвтектика (7% $NaSiO_4$) 868

$Na_2SiO_3 — Na_2WO_4$; Na_2SiO_3 и 2 жидкости (от 14 до $> 99\%$ Na_2SiO_3) 1080; эвтектика (около 100% Na_2WO_4) 696

Таблица 13—XI

Гидротермальное изменение силикатов и других минералов

Обширная сводка данных, относящихся к этой теме, была опубликована Мореем и Ингерсоном (The Pneumatolytic and Hydrothermal Alteration and Synthesis of Silicates, Econ. Geol., Suppl. to vol. 32, 607—761, 1937). Это издание содержит ссылки и данные о всех работах, проделанных вплоть до 1937 г., достаточно детальные, чтобы служить рабочей сводкой о современных знаниях в этой области. Всем, кому потребуются данные на эту тему, рекомендуется обращаться к этой сводке.

Минералы глин; минералы каолиновой группы, если их накаливать в открытых тиглях, обнаруживают поглощение тепла при температуре около 550, вызванное диссоциацией на водяной пар и смесь аморфного Al_2O_3 и аморфного SiO_2. При дальнейшем накаливании происходит резкий экзотермический эффект при температуре около 950, вызванный кристаллизацией γAl_2O_3 (Инслей, Эвелл, 1935).

Каолинит, дикит, бейделлит и нонтронит были синтезированы в автоклаве из совместно осажденных гелей подходящего состава, при нагревании до 310 (каолинит), 350—365 (дикит), 350—390 (бейделлит), все из $Al_2O_3 — SiO_2$ геля; нонтронит был получен при 350 из геля $Fe_2O_3 \cdot 2SiO_2$ (Эвелл, Инслей, 1935).

Серпентин и тальковые минералы; серпентин, повидимому, был получен при действии растворимого в воде стекла на MgO и из совместно осажденного геля $MgO — SiO_2$ в автоклаве (300—400), а также при пневматолитических экспериментах из $Mg(OH)_2$ и геля кремнезема при 400 (Ипатьев, Муромцев, 1927; Ф. Г. Уэллс, 1929; Сыромятников, 1935).

Тальк распадается на энстатит, аморфный SiO_2 и водяной пар (1 ат) при 800—840 (Эвелл, Бантинг, Геллер, 1935).

Биотит, не имеется надежного доказательства фактического синтеза.

Мусковит, синтезирован при 450 в автоклаве из смеси: 0,7 г SiO_2, 1,00 г Al_2O_3, 0,63 г K_2O, 4,3 г H_2O (Баур, Бекке, 1911). Синтезирован при 225—300 в автоклаве из геля состава $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot x\,H_2O$ (Нолл, 1935).

Цеолитовые минералы, по составу цеолиты приближаются к полевым шпатам и фельдшпатоидам с избытком или без избытка SiO_2 и с присутствием воды в молекуле. Имеются сведения о синтезе цеолитов типа гейландита, филлипсита, шабазита и натролита, получаемых из полевого шпата и геля кремнезема и воды, или из различных подходящих смесей требуемых окислов, нагретых в автоклаве при различных температурах от 100 до 500; в некоторых случаях присутствовал CO_2 (литература весьма обширна; основными являются работы Морея и Ингерсона).

Таблица 14—XI

Карбонаты

Ag_2CO_3 диссоциирует (1 ат CO_2) при 219 (Центнершвер, Бруж, 1926).
$BaCO_3$ **Витерит,** т. пл. (90 ат CO_2) 1740; диссоциирует (1 ат CO_2) при 1352; т. перех. $\alpha-\beta-\gamma$ 811, 982.
$BaK_2(CO_3)_2$ т. пл. 800.
$BaNa_2(CO_3)_2$ т. пл. 740 (Лешателье).
$BeCO_3 \cdot 4H_2O$ теряет H_2O при 100.
$CaCO_3$ **Кальцит** т. пл. (1025 ат CO_2) 1339; эвтектика с CaO (39,5 ат CO_2; 50 мол. % CaO) при 1240; диссоциирует (1 ат CO_2) при 885 ± 10.
— **Арагонит,** монотропный, т. перех. в кальцит < 425.
— **Ватерит,** монотропный, т. перех. в кальцит наблюдалась при 430—440 (Смит, Адамс, 1923; и др.).
$CaK_2(CO_3)_2$ т. пл. 814.
$CaCO_3$ — Li_2CO_3 эвтектика (56% Li_2CO_3) при 662 (Эйтель, Скаликс, 1929).
$Ca(Mg, Fe, Mn)(CO_3)_2$ Анкерит диссоциирует (1 ат CO_2) в две стадии при 610—770 и 900.
$CaNa_2(CO_3)_2$ разлагается (54,2 ат CO_2) на $CaCO_3$ и жидкость при 810 эвтектика с Na_2CO_3 (твердый раствор) (38% $CaCO_3$) при 805 (Ниггли, 1916; Эйтель, 1925).
$CaCO_3 \cdot 6NaAlSiO_4$, Канкринит искусств., плавится инконгруэнтно (107 ат CO_2) в нефелин и жидкость 1253 ± 5; эвтектика с $CaCO_3$ при 1190 (Эйтель, 1925).
$CaCO_3 \cdot 2Ca_2SiO_4$ **Спуррит,** т. пл. (122 ат CO_2) 1380 (Эйтель, 1923).
$CaMg(CO_3)_2$ **Доломит,** диссоциирует (1 ат CO_2) в 2 стадии при < 500 и 890; при неравновесных условиях задержки происходят при более высоких температурах (разные авторы).
$CdCO_3$ диссоциирует (1 ат CO_2) при 345 (Андрусов, 1925; Яндер, 1928).
$CoCO_3$ **Сферокобальтит,** диссоциирует (1 ат CO_2) при 341 (Крустинсонс, 1933).
$CuCO_3$ диссоциирует (1 ат CO_2) при 237 (Каллаунер, Матейка, 1923).
$2CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ **Азурит,** разлагается при 200.
$CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ **Малахит,** разлагается при 200.
$FeCO_3$ **Сидерит,** диссоциирует (1 ат CO_2) при 282; неравновесные задержки до 500.
K_2CO_3 т. пл. 895, жидкий диссоциирует (0,047 ат CO_2) при 1400 (Говарс, Тэрнер, 1931).
Li_2CO_3 т. пл. 735; жидкий диссоциирует (0,177 ат CO_2) 1100.
$LiNaCO_3$ т. пл. 514; эвтектика с Na_2CO_3 при 510; с Li_2CO_3 при 510, 39 и 44% Li_2CO_3 при 510, 39 и 44% Li_2CO_3 соответственно (Эйтель, Скаликс, 1929).
$MgCO_3$ **магнезит,** диссоциирует (1 ат CO_2) при 373; может быть задержка до > 500, так как диссоциация крайне медленная (разные авторы).
$MgCO_3 \cdot 3H_2O$ **Нескегонит** теряет H_2O в атмосфере CO_2, дегидратируется при 165 до $MgCO_3$ (Менцель и др., 1930).
$MgNa_2(CO_3)_2$ т. пл. 677 (1200 ат CO_2).
$MnCO_3$ **Родохрозит** диссоциирует (1 ат CO_2) при 400 (Крустинсонс, 1933).
Na_2CO_3 т. пл. 851; жидкий диссоциирует (0,085 ат CO_2) при 1400 (Говарс, Тернер, 1930).
Na_2CO_3 — Na_2S эвтектика при 756,38% Na_2S (Тамман, Эльсон, 1930).
$PbCO_3$ **Церуссит** диссоциирует постепенно в Pb_2OCO_3 при 285, в $Pb_3O_2CO_3$ при 362, в PbO при 395 (Центнершвер, 1925, Бруж, 1926).
$2PbCO_3 \cdot PbO \cdot H_2O$ **Гидроцеруссит.** разлагается при 400.
Pb_2CO_3 т. пл. 837.
$SrCO_3$ **Стронцианит,** т. пл. 1497 (60 ат CO_2); диссоциирует (1 ат CO_2) при 1289; т. перех. ромбич. в тригон. 926 (Лютуа, 1927; Эйтель, 1924).
$ZnCO_3$ **Смитсонит** диссоциирует (1 ат CO_2) при 296 (Центнершвер; 1930).

Таблица 15—XI

Сульфаты

Ag_2SO_4 т. пл. 652, диссоциирует (0,295 ат) при 1220 (Маршал, 1923).
$Al_2(SO_4)_3$ распадается при 770.
$BaSO_4$ **Барит,** т. пл. с распадом 1580, диссоциирует (1 ат) при 1510, т. перех. 1178 (Маршал, 1925).
$BeSO_4$ диссоциирует (0,28 ат) при 830.
$BeSO_4 \cdot 4H_2O$ т. перех. к $BeSO_4 2H_2O$ 100 (Маршал, 1923).
$BeK_2(SO_4)_2$ т. пл. 900, диссоциирует (жидкий 0,265 ат) при 1000 (Маршал, 1925).
$Bi_2(SO_4)_3$ диссоциирует (1 ат) при 773.
$CaSO_4$ **Ангидрид,** т. пл. с распадом 1450; т. перех. ромбич. в моноклин. 1193 (1231); диссоциирует (0,0127 ат) при 1230.

Продолжение табл. 15—XI

$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ **гипс,** т. перех. в $CaSO_4$ 42 ± 2; т. перех. в гемигидрат 97 ± 1; т. перех. в растворимый ангидрит не определена (старая величина **170—200 неправильна**).
$Ca_2K_2(SO_4)_3$ т. пл. 1020 ± 10; диморфный; т. перех. 936.
$CaNa_2(SO_4)_2$ **Глауберит,** природн., т. пл. 905, однако распадается ниже ликвидуса на $CaSO_4$ и $CaNa_8(SO_4)_5$; не может быть получен из расплава.
$CaNa_8(SO_4)_5$ т. пл. 944; эвтектика с $CaSO_4$ (35 мол. % $CaSO_4$) при 905; серия твердых растворов с Na_2SO_4.
$Ca_2Rb_2(SO_4)_3$ т. пл. 1043.
$Ca_2K_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$ **Полигалит,** распадается (1 ат H_2O) при 298 (Шторх, 1930).
$CdSO_4$ т. пл. около 1000; диссоциирует (0,309 ат) при 1120.
$CdSO_4 \cdot {}^8/_3H_2O$ т. перех. в $CdSO_4 \cdot H_2O$ 74.
$CoSO_4$ т. пл. 989; жидкий, диссоциирует (0,287 ат) при 1030.
$CoSO_4 \cdot 7H_2O$ **Биберит,** т. перех. в $CoSO_4 \cdot 6H_2O$ 45.
$Cr_2(SO_4)_3$ Диссоциирует (1 ат) при 777.
$CuSO_4$ **Гидроцианит,** распадается (1 ат) при 771.
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ **Халькантит,** т. перех. в $CuSO_4 \cdot 3H_2O$ 95.
$CuSO_4 \cdot 3H_2O$, т. перех. в $CuSO_4 \cdot 1H_2O$ 114.
$CuSO_4 \cdot 1H_2O$, т. перех. в $CuSO_4 > 300$; (при 1 ат) 250.
$CuPbSO_4(OH)_2$ **Линарит,** температура дегидратации 170—190.
$FeSO_4$ диссоциирует (1 ат) при 665 (Грейлих, 1928).
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ **Мелантерит,** т. перех. в $FeSO_4 \cdot 4H_2O$ 56,7; в $FeSO_4 \cdot 1H_2O$ 100; в $FeSO_4$, 300.
$6FeSO_4 \cdot 2Fe(OH)_3 \cdot 12H_2O$ **Фармакосидерит** дегидратируется при 233; остаток распадается при 391.
$Fe_2(SO_4)_3$ распадается при 480.
$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ **Кокимбит,** т. перех. в более низкие гидраты 85, 93, 161.
$Ga_2(SO_4)_3$ диссоциирует (0,117 ат) при 700 (Маршал, 1923).
K_2SO_4 **Арканит,** т. пл. 1076; т. перех. ромбич. в гексагон. 588 (Робертс, 1924).
$K_2S_2O_7$ т. пл. > 300.
$KHSO_4$ **Мизенит,** т. пл. (дымит) 210.
$K_2Mg_2(SO_4)_3$ **Лангбейнит,** т. пл. 930.
$K_3Na(SO_4)_2$ **Глазерит,** т. перех. ромбич. в гексагон. твердый раствор 431; выше этой температуры соединений не существует.
Li_2SO_4 т. пл. 860, диморфный, т. перех. 580.
$MgSO_4$ т. пл. 1185; диссоциирует (0,28 ат) при 1190.
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ **Эпсомит,** т. перех. в $MgSO_4 \cdot 6H_2O$ 51.
$MgSO_4 \cdot 6H_2O$, т. перех. в $MgSO_4 \cdot 1H_2O$ (кизерит) 68
$MgSO_4 \cdot KCl \cdot 3H_2O$ **Каинит,** распадается (1 ат) при 158 (1980 ат) при 178 (10 950 ат) 225 (Геллер, 1930).
$MgSO_4 \cdot 3Na_2SO_4$ **Вантгоффит,** т. перех. в твердый раствор того же состава 489 (Наккен, 1907).
$MnSO_4$, т. пл. 700; жидкий распадается (0,296 ат) при 1110.
$MnSO_4 \cdot 7H_2O$ **Маллардит,** т. перех. в $MnSO_4 \cdot 6H_2O$ — 5.
$MnSO_4 \cdot 6H_2O$, т. перех. в $MnSO_4 \cdot 4H_2O$ 8.
$MnSO_4 \cdot 4H_2O$, т. перех. в $MnSO_4 \cdot 3H_2O$ 18.
$MnSO_4 \cdot 3H_2O$ т. перех. в $MnSO_4 \cdot 2H_2O$ 40.
$MnSO_4 \cdot 2H_2O$, т. перех. в $MnSO_4 \cdot H_2O$ (Сцмикит) 57
$MnSO_4 \cdot 1H_2O$ т. перех. в $MnSO_4$ 117.
Na_2SO_4 **Тенардит,** т. пл. $835 \pm 0{,}5$; полиморфный, т. перех. 235, 185; эвтектика с Na_2S (27,5% Na_2S) при 740.
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, **Мирабилит, глауберова соль,** т. перех. в Na_2SO_4 около $32{,}4 \pm 0{,}1$.
$Na_2SO_4 \cdot 7H_2O$, т. перех. в Na_2SO_4 24,5 (неустойчивый).
$(NH_4)_2SO_4$ **Маскагнит,** т. пл. 513 (с ничтожным объемом пара) (Дэвидсон, Кендалл, 1921).
$NiSO_4$ диссоциирует (0,289 ат) при 945.
$NiSO_4 \cdot 7H_2O$ **Моренозит,** т. перех. в $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ 31,5.
$PbSO_4$ **Англезит** распадается при 1000; т. перех. ромбич. в моноклин. 865.
Pb_2OSO_4 **Ланаркит,** т. пл. 977.
Rb_2SO_4, т. пл. 1060, т. перех. 653.
$SrSO_4$ **Целестин,** т. пл. с распадом 1605, т. перех. 1166.
$ZnSO_4$ **Цинкозит** распадается (1 ат) при 740.
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ **Гослерит,** т. перех. в $ZnSO_4 \cdot 6H_2O$ 39.

Таблица 16—XI

Соли кислородных кислот

Ag_3AsO_3 арсенат серебра, распадается при 150.

AgCN цианистое серебро, распадается при 320.

$Ag_2C_2O_4$ щавелевокислое серебро, взрывается при 140.

$Ag_2C_2N_2O_2$ фульминат серебра, взрывается при < 100.

$AgClO_3$ хлорноватокислое серебро, т. пл. 230.

$AgClO_4$ хлорнокислое серебро, т. пл. 486.

$AgNO_3$ азотнокислое серебро, т. пл. 212; т. перех. α—β 159.

Ag_3PO_4 ортофосфат серебра, т. пл. (распад) 849.

$AgPO_3$ метафосфат серебра, т. пл. (распад) 482.

$Ag_4P_2O_7$ пирофосфат серебра, т. пл. 585.

$Al(NO_3)_3$ распадается (1 ат) при 142.

$Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ т. пл. 73.

$4AlPO_4 \cdot 2Al(OH)_3 \cdot 9H_2O$ **Вавелит** дегидратируется при 250.

Алюминаты, см. окиси.

Бораты, см. окиси.

$Ba(ClO_3)_2$ хлорноватокислый барий (ангидрит), т. пл. 414.

$Ba(ClO_4)_2$ хлорнокислый барий, т. пл. 505.

$BaMoO_4$ т. пл. с распадом 1480 ± 5.

$Ba(NO_3)_2$ **Нитробарит**, т. пл. 592, жидкий распадается (1 ат) при 664.

$Ca(IO_3)_2$ **Лаутарит**, легко распадается.

$CaMoO_4$ **Поуэллит**, т. пл. неизвестна.

$Ca(NO_3)_2$ **Нитрокальцит**, т. пл. 561, т. пл. с распадом (1 ат) 563.

$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ т. перех. α в $Ca(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ 42,7; т. перех. β в $Ca(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ 39,7.

$Ca(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ т. пл. 51,1.

$Ca_4P_2O_9$ четырехкальциевый фосфат, т. пл. 1700.

$Ca_3(PO_4)_2$ ортофосфат кальция, α т. пл. 1730, т. перех. α—β 1400?

$Ca_2P_2O_7$ **Брушит**, пирофосфат кальция β, т. пл. 1300.

CaP_2O_6 метафосфат кальция, т. пл. 975.

$Ca_{10}(PO_4)_6ClF$ **Апатит**, т. пл. 1270

$Ca_5(PO_4)_3Cl$ **Хлорапатит**, т. пл. 1580.

$Ca_5(PO_4)_3F$ **Фторапатит**, т. пл. 1660.

$Ca_5(PO_4)_3OH$ Гидроксиапатит, распадается при > 1400.

$Ca_{10}(PO_4)_6CO_3$ **Карбонатоапатит** или **подолит** (110 ат CO_2), плавится инконгруэнтно при 1470.

$Cd(NO_3)_2$ распадается (1 ат) при 166.

$Cd_3(PO_4)_2$ ортофосфат кадмия, т. пл. 1500.

$Co(NO_3)_2$ распадается (1 ат) при 226.

$Cr(NO_3)_3$ распадается (1 ат) при 166.

$CsNO_3$ т. пл. 414.

$Cu(NO_3)_2$ распадается (1 ат) при 257.

$Fe_3(PO_4)_2$ ортофосфат двухвалентного железа, т. пл. 1238.

$2Fe_2O_3 \cdot P_2O_5$ фосфат трехвалентного железа (2 : 1) разлагается в (1 : 1); плавится инконгруэнтно при 1095.

$Fe_2O_3 \cdot P_2O_5$ (1:1) т. пл. 1240; эвтектика при (2 : 3); эвтектика при 964.

$2Fe_2O_3 \cdot 3P_2O_5$ (2 : 3), т. пл. 1278.

$HgC_2N_2O_2$ гремучая ртуть, взрывается.

K_3AsO_4 ортоарсенат калия, т. пл. 1310.

$K_2As_2O_7$ пироарсенат калия т. пл. 996.

$K_5As_3O_{10}$ (распадается в пироарсенат калия и жидкость), плавится инконгруэнтно при 630.

$KAsO_3$ метаарсенат калия, т. пл. 650.

$KClO_3$ хлорноватокислый калий, т. пл. 368.

$KClO_4$ хлорнокислый калий, распадается при 400.

K_2CrO_4 **Тарапакаит**, т. пл. 971, т. перех. α—β 666.

$K_2Cr_2O_7$ двухромовокислый калий, т. пл. 398, т. перех. α в β 236.

K_2MoO_4 молибденовокислый калий, т. пл. 919.

KNO_3 **Селитра**, т. пл. 333, тройная точка (80 ат) тригон. I — тригон. III — ромбич. II. 128;0; т. перех. ромбич. II в тригон. I 127,6; т. перех. тригон. I в тригон. III неустойчива 126,1.

K_3PO_4 ортофосфат калия, т. пл. 1340.

KPO_3 метафосфат калия, т. пл. 810.

$KPO_3 \cdot KBO_2$ т. пл. 855; эвтектика с KPO_3 и KBO_2, соответственно при 800 и 670.

$LiClO_4$ т. пл. 236.

$LiNO_3$ азотнокислый литий, т. пл. $252{,}0 \pm 0{,}2$.

$LiNO_3 \cdot 3H_2O$ т. перех. в $LiNO_3 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ 29,88.

$LiNO_3 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ т. перех. в безводный $LiNO_3$ 63.

Li_3PO_4 ортофосфат лития, т. пл. 857.

$Mg_2P_2O_7$ пирофосфат магния, т. пл. 1383.

$Mg_4(PO_4)_2F_2$ **Вагнерит** распадается на MgF_2 и жидкость, плавится инконгруэнтно при 845.

$Mn(NO_3)_2$ распадается (1 ат) при 195.

Na_3AsO_4 ортоарсенат натрия, т. пл. 1260, т. перех. α—β—γ 688, 410; эвтектика с пироарсенатом при 820.

$Na_4As_2O_7$ пироарсенат натрия, т. пл. 850.

$Na_5As_3O_{10}$ распадается в пироарсенат, плавится инконгруэнтно при 696; эвтектика с метаарсенатом; эвтектика при 586.

$NaAsO_3$ метаарсенат натрия, т. пл. 615; эвтектика с As_2O_5; эвтектика при 570.

Продолжение табл. 16—XI

Na_2MoO_4 молибдат натрия, т. пл. 687.
$Na_2Mo_2O_7$ пиромолибдат натрия, т. пл. 612.
$NaClO_3$ хлорноватокислый натрий, т. пл. 248.
$NaClO_4$ хлорнокислый натрий, распадается при 482.
$NaNO_3$ **Натриевая селитра,** т. пл. 310; постепенный переход заканчивается при 275,5.
$Na_4P_2O_7$ пирофосфат натрия, т. пл. 970.
$NaPO_3$ метафосфат натрия, т. пл. 617 (склонен к стекловидному затвердеванию).
$NaPO_3 \cdot NaBO_2$ т. пл. 800.
Na_2WO_4 вольфрамовокислый натрий, т. пл. 695,5 ± 0,5
NH_4ClO_3 хлорноватокислый аммоний, взрывается при 102.
NH_4ClO_4 хлорнокислый аммоний, температура распада (?).
NH_4NO_3 т. пл. 169,6; точки перех. ромбич.-моноклин.-тетрагон. - кубич.: 32, 84, 125.
$Ni(NO_3)_2$ распадается (1 ат) при 302.
$Pb_2As_2O_7$ пирофосфат свинца, т. пл. 802.
$Pb_3(AsO_4)_2$ ортофосфат свинца, т. пл. 1042.
$Pb_4As_2O_9$ распадается в ортофосфат; плавится инконгруэнтно при 834.
$Pb_8As_2O_{13}$ т. пл. 862.
$Pb_2Bi_2O_5$ т. пл. 625.
$Pb_2Bi_6O_{11}$ т. пл. 686.
$PbBi_4O_7$ распадается до Bi_2O_3; плавится инконгруэнтно при 690.
$PbCrO_4$ **Крокоит,** плавится с распадом, т. пл. 844.
$Pb_7Cr_2O_{13}$ **Меланхроит,** распад 830; т. перех. α—β? 745.
$PbMoO_4$ **Вульфенит,** искусственный т. пл. 1065; природный т. пл. 1060—1064.
$Pb_3(PO_4)_2 \cdot 5PbO$ т. пл. 860.
$Pb_3(PO_4)_2 \cdot PbO$ т. пл. 980.
$Pb_3(PO_4)_2$ ортофосфат свинца, т. пл 1015.
$Pb_3(PO_4)_2 \cdot Pb_2P_2O_7$ ортопирофосфат свинца, т. пл. 920.
$Pb_2P_2O_7$ пирофосфат свинца, т. пл. 805.
PbP_2O_6 метафосфат свинца, т. пл. 825.
$Pb_5(PO_4)_3(Cl, F)$ **Пироморфит, Хлоропироморфит,** т. затвердевания 1156; **фторопироморфит,** т. затвердевания 1098.
$Pb_3(VO_4)_2 \cdot 5PbO$, т. пл. 794
$Pb_3(VO_4)_2$ ортованадат свинца, т. пл. 952.
$Pb_2V_2O_7$ пированадат свинца, т. пл. 722.
$PbWO_4$ **Штольтцит, Распит,** т. пл. 1123; т. перех. α—β 877.
Pb_2WO_5 т. пл. 900.
$Th(NO_3)_4$ распадается (0,472 ат) при 161.
$Zn(NO_3)_2$ распадается 1 ат при 302.
$ZnO \cdot P_2O_5$ образует стекла.

Таблица 17—XI

Галоиды

AgF т. пл. 435.
AgCl **Кераргирит,** т. пл. 455±5.
AgBr **Бромаргирит,** т. пл. 422.
AgI **Иодирит,** т. пл. 558; т. перех. α—β 146.
AlF_3 т. возг. 1260.
$AlCl_3$ т. возг. 180,7, тройная точка 192,5 (2,2 ат).
$AlBr_3$ т. перех. 70,2, т. пл. 97, т. кип. 255.
AlI_3 т. пл. 191, т. кип. 381.
AsF_3 т. пл. — 8,5, т. кип. 63.
AsF_5 т. пл. — 79,8, т. кип. —52,8.
$AsCl_3$ т. пл. —16, т. кип. 130.
$AsBr_3$ т. пл. 32, т. кип. 221.
AsI_3 т. пл. 141, т. кип. 400.
$AuCl_3$ (распадается) 254.
AuCl (распадается) 290.
$AuBr_3$ (распадается) 160.
AuBr (распадается) 115.
AuI (распадается) 120.
BF_3 т. пл. —128, т. кип. —100.
BCl_3 т. пл. —108, т. кип. 18.
BBr_3 т. пл. —45, т. кип. 90,5.
BI_3 т. пл. 43, т. кип. 210.
BaF_2 т. пл. 1287.
$BaCl_2$ т. пл. 962.
$BaBr_2$ т. пл. 847.
BaI_2 (распадается) 740.
BeF_2 т. пл. 800.
$BeCl_2$ т. пл. 416, т. кип. 488, т. перех. α—β 300.
$BeBr_2$ плавится (1,5 ат); т. пл. 488, т. возг. 473.
BeI_2 плавится (0,8 ат); т. пл. 480±4, т. кип. 488.
$BiCl_2$ (жидкий распадается при 300) т. пл. 163.
$BiCl_3$ т. пл. 230, т. кип. 442.
$BiBr_3$ т. пл. 218, т. кип. 480.
BiI_3 т. пл. 439.
CF_4 т. пл. —186; т. кип. —129.
CCl_4 т. пл. —22,85; т. кип. 76,7, т. перех. α—β —48.
CBr_4 (жидкий распадается) т. пл. 93,7.
CI_4 (жидкий распадается) т. пл. 171.
CaF_2 **Флюорит,** т. замерз. 1378, т. кип. 2450.
$CaF_2 — Al_2O_3$ эвтектика 27% Al_2O_3 при 1260.
$CaF_2 — Na_3AlF_6$ эвтектика (твердые растворы) 26% CaF_2 при 900.
$CaCl_2$ **Гидрофилит,** т. пл. 773.

$CaBr_2$ т. пл. 765.
CaI_2 т. пл. 575.
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$, т. пл. 29,9.
$CaBr_2 \cdot 6H_2O$, т. пл. 38,2.
$CaI_2 \cdot 6H_2O$, т. пл. 42.
CdF_2 т. пл. 1100; т. кип. 1758.
$CdCl_2$ т. пл. 568.
$CdBr_2$ т. пл. 583.
CdI_2 т. пл. 388.
$CeCl_3$ т. пл. 848.
CeI_3 т. пл. 752.
$CoCl_3$ т. возг. (?).
$CoCl_2$ т. пл. 735.
$CoBr_2$ т. пл. 678.
CoI_2 т. пл. 515.
CrF_2 т. пл. 1100.
CrF_3 т. пл. $>$ 1000.
$CrCl_3$ (возгоняется).
CrI_2 т. пл. 795
CsF т. пл. 683, т. кип. 1253.
CsCl т. пл. 638, т. перех. $\alpha \rightarrow \beta$ 479.
CsBr т. пл. 636.
$CsBrI_2$ т. пл. 195,5.
CsI т. пл. 621.
Cu_2F_2 т. пл. 908.
Cu_2Cl_2 **Нантокит**, т. пл. 430, т. кип. 1367.
$CuCl_2$ т. пл. 498 $\pm$ 4 (?).
Cu_2Br_2 т. пл. 488, т. кип. 1345, т. перех. $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ 380, 470.
Cu_2I_2 **Маршит**, т. пл. 605 $\pm$ 5, т. кип. 1293, т. перех. $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ 402, 440.
$FeCl_3$ **Молизит**, т. пл. 300 $\pm$ 5, т. кип. 307.
FeI_2 т. пл. 592.
$GaCl_3$ т. пл. 76,7, т. кип. 199,6.
$GaBr_3$ т. пл. 124,5, т. кип. 284.
GaI_3 т. пл. 213, т. кип. 337.
$GdCl_3$ т. пл. 765.
$GdBr_3$ т. пл. 609.
GdI_3 т. пл. 926.
GeF_4 плавится при 4 ат; т. пл. — 15.
$GeCl_4$ т. пл. — 49,5, т. кип. 86,5
$GeBr_4$ т. пл. 26,1, т. кип. 186
GeI_4 т. пл. 144, т. кип. 350—400
Hg_2F_2 т. пл. 570
HgF_2 т. пл. 645, т. кип. 650
Hg_2Cl_2 **Каломель**, т. пл. 543, т. кип. 383, плавление в запаянной трубке
$HgCl_2$ **Сулема**, т. пл. 277, т. кип. 305
Hg_2Br_2 т. возг. 345
$HgBr_2$ т. пл. 237, т. кип. 320
Hg_2I_2 т. пл. 290, т. кип. 310
HgI_2 т. пл. 256, т. кип. 350, т. перех. желтого в красный 127
KF т. пл. 880, т. кип. 1498
KCl **Сильвин**, т. пл. 770,3, т. кип. 1411
KBr т. пл. 748, т. кип. 1380
KI т. пл. 686, т. кип. 1330
K_2GeF_4 т. пл. 730
K_2PbCl_4 **Псевдо-котунит**, плавится инконгруэнтно при 490, распадается на KCl и жидкость
LiF т. пл. 845, т. кип. 1670, т. перех. $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ 762, 812
LiCl т. пл. 614
LiBr т. пл. 549

Продолжение табл. 17—XI

LiI т. пл. 450 $\pm$ 5
MgF_2 **Селлаит**, т. пл. 1248, т. кип. 2260.
$MgCl_2$ **Хлоромагнезит**, т. пл. 712
$MgBr_2$ т. пл. 695
MgI_2 (распадается) т. пл. 650
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$ **Бишофит**, плавится инконгруэнтно при 116,7
MnF_2 т. пл. 856
$MnCl_2$ т. пл. 650
$MnBr_2$ т. пл. 695
MnI_2 т. пл. 638
MoF_6 т. пл. 17, т. кип. 35
$MoCl_5$ т. пл. 97, т. кип. 268
NaF **Виллиомит**, т. пл. 995$\pm$5; т. кип. 1705
NaCl **Каменная соль**, т. пл. 800,4 $\pm$ $\pm$ 0,5, т. кип. 1445
NaBr т. пл. 766, т. кип. 1396
NaI т. пл. 663, т. кип. 1300
Na_3AlF_6 **Криолит**, т. пл. 1020, т. перех. моноклин. в кубич. 560 $\pm$ 10; эвтектика с NaF при 880
$Na_5Al_3F_{14}$ **Хиолит**, распадается на криолит и жидкость, плавится инконгруэнтно при 725; эвтектика с AlF_3 680
Na_3AlF_6 — Al_2O_3 эвтектика при 935
NH_4Cl **Нашатырь** (1 ат) т. возг. 335
NH_4Cl плавится при 66 ат; т. пл. 550, постепенный переход, т. перех. —31; т. перех. кубич. I в кубич. II, 184
PF_3 т. пл. —160.
PF_5 т. пл. —83
PCl_3 т. пл. —112; т. кип. 76.
PCl_5 плавкий (под давлением) т. пл. 148
PBr_3 т. пл. —40; т. кип. 172.
PBr_5 т. пл. 100
PI_2 т. пл. 110
PI_3 т. пл. 61
PbF_2 т. пл. 824, т. кип. 1285, т. перех. ромбич. в кубич. 250 $\pm$ 30
$PbCl_2$ **Котунит**, т. пл. 499, т. кип. 954
$PbCl_4$ т. пл. —15.
$PbBr_2$ т. пл. 370 $\pm$ 3, т. кип. 916
PbI_2 т. пл. 412, т. кип. 900
$PbCl_2 \cdot PbO$ **Матлокит**, т. пл.? 615
$PbCl_2 \cdot 2PbO$ **Мендипит**, т. пл.? 693
RbF т. пл. 760, т. кип. 1410
RbCl т. пл. 715, т. кип. 1385
RbBr т. пл. 682, т. кип. 1345
RbI т. пл. 642, т. кип. 1305
SbF_3 т. пл. 292
SbF_5 т. пл. 7
$SbCl_3$ т. пл. 73, т. кип. 219; триморфный?, т. перех.? 65, 69,5
$SbCl_5$ т. пл. 3, т. кип. 103 (при давлении в 68 мм)
$SbBr_3$ т. пл. 96, т. кип. 288
SiF_4 (1 ат), т. возг. —95,7; (1,735 ат) т. пл. —90,0
$SiCl_4$ т. пл. — 70,4, т. кип. 57,5
Si_2Cl_6 т. пл. 2; т. кип. 147
$SiBr_4$ т. пл. 5,2, т. кип. 153
Si_2Br_6 т. пл. 95, т. кип. 265

Продолжение табл. 17—XI

SiI_4 т. пл. 123,8, т. кип. 290
Si_2I_6 плавится в вакууме, т. пл. 250, т. кип. (распадается)
SnF_4 т. кип. 705
$SnCl_4$ т. пл. —30,2, т. кип. 115.
Sn_2Cl_4 т. пл. 247, т. кип. 605
$SnBr_4$ т. пл. 33, т. кип. 203, т. перех. α—β —6
Sn_2Br_4 т. пл. 215, т. кип. 625
SnI_4 т. пл. 146, т. кип. 340
Sn_2I_4 т. пл. 320, т. кип. 720
SrF_2 т. пл. 1190, т. кип. 2480
$SrCl_2$ т. пл. 873
$SrBr_2$ т. пл. 643
SrI_2 т. пл. 507?
TiF_4 (1 ат) т. возг. 284
$TiCl_4$ т. пл. —25, т. кип. 136
$TiCl_3$ (1 ат) т. возг. 440
$TiBr_4$ т. пл. 39, т. кип. 230, т. перех. α—β —15
TiI_4 т. пл. 150, т. кип. >360
WF_6 т. пл. 2, т. кип. 17
ZnF_2 т. пл. 872, т. кип. 1500
$ZnCl_2$ т. пл. 313? т. кип. 732
$ZnBr_2$ т. пл. 394, т. кип. 650
ZnI_2 т. пл. 446, т. кип. 624
$ZrCl_4$ плавится при 25 ат, т. пл. 437; т. возг. 331
$ZrBr_4$ плавится при 15 ат, т. пл. 450, т. возг. 357
ZrI_4 плавится при 6,3 ат, т. пл. 499, т. возг. 431

Таблица 18—XI

Минералы сульфидного типа

Ag_3As **Хунтилит** (искусственный Ag_5As) плавится инконгруэнтно в Ag и жидкость 595
Ag — Bi искусственный, соединений нет; эвтектика (3% Ag) 262; природный Ag_6Bi? Чиленит
Ag_2S **Аргентит** (кубич.), **Акантит** (ромбич.), т. пл. 840 ± 3; 2 жидкости с Ag 905, т. перех. ромбич. в кубич. 175, т. перех. (избыток Ag) 586, т. перех. (избыток S) 620
Ag_3Sb **Дискразит** плавится инконгруэнтно в Ag и жидкость 559; эвтектика с Sb при 483
Ag_2Se **Науманнит** (природн. содержит различные количества PbSe); искусств., т. пл. 900; 2 жидкости с Ag 892; 2 жидкости с Se 620.
Ag_2Te **Гессит,** искусств., т. пл. 959 ± 2; т. перех. α—β 140, т. перех. (избыток Ag) 801, т. перех. (избыток Te) 692; 2 жидкости с Ag 877; эвтектика с Ag при 868
Ag_5Te_3 искусств. плавится инконгруэнтно в Ag_2Te 455; т. перех. α—β—γ 280 и 415; эвтектика с Te при 352,8
As — Bi задержки 484, 267
AsS Реальгар, искусств., т. пл. 320; жидкий т. кип. 565; т. перех. красного в черный 267
As_2S_3 **Аурипигмент,** искусств., т. пл. 310; жидкий т. кип. 707—960?; т. перех. желтого в красный 170
As_4S_3 **Диморфин,** смесь As_2S_3 и As, в вакууме летит при <200
As — Sb искусств. серия тверд. растворов с минимумом (17,5% As) при 615, природный As_3Sb **Аллемонтит**
As_2Te_3 искусств., т. пл. 362
Au — Bi эвтектика (18% Au) при 240
$AuSb_2$ плавится инконгруэнтно в Sb и жидкость 460; эвтектика с Au при 360
$AuTe_2$ **Калаверит (Креннерит** содержит Ag), т. пл. искусств. 464; эвтектика с Au при 445, эвтектика с Te при 415
Bi_2S_3 **Бисмутинит,** т. пл. >800 (>1 ат)
Bi — Sb серия твердых растворов
Bi_2Se_3 **Гуанахуатит,** т. пл. искусств. 690; 2 жидкости с Se 615
BiSe искусств. плавится инконгруэнтно в Bi_2Se_3 и жидкость 605, задержка около 422.
Bi_2Te_3 **Тетрадимит** искусств., т. пл. 585, эвтектика с Bi 264, эвтектика с Te 389
Cd_3As_2 искусств., т. пл. 720
$CdAs_2$ искусств., т. пл. 630
Cd — Bi эвтектика (62% Bi) 146
CdS Гринокит распадается (1 ат) при >1000; т. пл. (100 ат) 1750.
CdSb искусств., т. пл. (устойчивая система) 455, эвтектика с Sb при 445
Cd_3Sb_2 искусств., т. пл. (неустойчивая система) 420; эвтектика с Sb при 400
CdTe искусств., т. пл. 1040; 2 жидкости с Cd
Co — As; $CoAs_3$ Скуттерудит, $CoAs_2$ **Смальтин,** т. пл. неизвестна, искусственно не воспроизведен
CoAs искусств., т. пл. 1180
Co_3As_2 искусств. плавится инконгруэнтно в CoAs и жидкость 1010
Co_2As искусств. плавится инконгруэнтно в Co_3As_2 и жидкость 960
Co_5As_2 искусств., т. пл. 930
Co — Bi 2 жидкости 1345

Продолжение табл. 18—XI

CoS Джайпурит, т. пл. > 1125
CoSb искусств., т. пл. 1238
$CoSb_2$ искусств. плавится инконгруэнтно в CoSb и жидкость 888
$CrSb_2$ искусств. плавится инконгруэнтно при 676
CrSb искусств., т. пл. 1115
Cu_3As Домейкит, т. пл. 830, эвтектика с Cu (79% Cu) 684 (**Альгодонит** Cu_6As, **Витнеит** Cu_9As искусственно не воспроизведены)

Cu_5As_2 искусств. плавится инконгруэнтно в Cu_3As и жидкость 710
Cu — Bi эвтектика ($> 99\%$ Bi) при 270
Cu_2S Халькозин, т. пл. (в вакууме) 1130, т. перех. α—β 90 ± 5, т. перех. 150 не подтверждается, т. пл. понижается в H_2S и в парах S; 2 жидкости с Cu при 1110; эвтектика с Cu при 1070

CuS Ковеллин, темпер. диссоциации (1 ат паров S) 501 ± 10
Cu_3Sb искусств. устойчив при < 425; **Cu_9Sb_2** искусств. устойчив. при < 450; серия смешанных кристаллов Cu_9Sb_2 до Cu_5Sb_2, пределы плавления от 650 до 680; Cu_2Sb плавится инконгруэнтно при 586; эвтектика с Sb при 535. Природн. **Cu_6Sb Хорсфордит** искусственно не воспроизведен
Cu_2Se Берцелианит искусств., т. пл. 1114, 2 жидкости с Cu при 1105; эвтектика с Cu при 1065

Cu_3Se_2 Умангит диссоциирует (1 ат) при < 800
Cu_2Te искусств., т. пл. 880, 2 жидкости с Cu при 1050; эвтектика с Cu при 870
CuTe искусств. плавится инконгруэнтно в Cu_2Te и жидкость 640, т. перех. α—β 380; эвтектика с Te 358
Cu_4Te_3 Рикардит искусственно не воспроизведен
$FeAs_2$ Леллингит ромбич., также **Арсеноферрит** (кубич.); т. пл. (в запаянной трубке) 980—1040; распадается (1 ат) на FeAs и пары As при темпер. около 735
FeAs искусств., т. пл. (в запаянной трубке) 1030; теряет As при 1 ат вблизи т. пл.
Fe_2As искусств., т. пл. 920; эвтектика со смешанными кристаллами γFe при 827
Fe — Bi соединений нет, 2 жидкости (?)
Fe_3P искусств. плавится инконгруэнтно в Fe_2P и жидкость 1160, эвтектика со смешанными кристаллами αFe при 1050
Fe_2P искусств., т. пл. 1360; метаустойчив. эвтектика со смешанными кристаллами αFe 945; эвтектика с FeP при 1260
FeP искусств. диссоциирует в Fe_2P и пары P (при давлении в 27 мм) при темпер. около 1215
FeP_2 искусств. диссоциирует в FeP и пары P (при давлении 608 мм) при темпер. около 973
FeS_x (x от 1,0 до 1,14) **Пирротин, троилит;** т. пл. (в H_2S) 1175; т. пл. (в парах S, 1 ат) 1187; $FeS_{1,13}$ плавится конгруэнтно при 1191 (Енсен, не опубликовано); т. перех. ромбич. в гексагон. 140 в FeS, понижена избытком S, т. перех. 300, 320, превращение (при $x = 1{,}06$) при 140; (при $x = 1{,}13$) повышается до 300; система склонна оставаться в неустойчивом состоянии; эвтектика с γFe (смешанные кристаллы?) при 980
FeS_2 диморфный, монотропный, **пирит,** устойчивый, пиритогедр.; **марказит** неустойчивый ромбич.; превращается в пирит при 415 в измеримой степени, т. пл. (под давлением) неизвестна; темпер. диссоциации (в парах S, 1 ат) 690; распадается в вакууме на FeSx и пары S при < 480
$FeSb_2$ искусств. плавится инконгруэнтно, образуя смешанные кристаллы Fe_4Sb_3(?), богатые Sb при 732
Fe_4Sb_3(?) искусств. образует смешанные кристаллы, богатые как Fe, так и Sb; максимум при Fe_4Sb_3 1020; эвтектика со смешанными кристаллами αFe при 1002
H_2S т. пл. — 85,6, триморфный, т. перех. — 169,6 и —147,0 т. кип. —60,8
H_2Se т. пл. —64, т. кип. —42
H_2Te т. пл. —48, т. кип. 0,0
Hg — Bi эвтектика (около 100% Hg) при — 39
HgS триморфная; α — **Киноварь,** гексагон., устойчивая; α'**HgS** искусств. идентична с природн. **метациннабаритом** гексатетраэдральн., неустойчива; β**'HgS** только искусств., одноосная положительная, вероятно гексагон., неустойчива; т. возг. 580 (термич. анализ), 446 (равновес. при 1 ат), т. пл. в N_2 (120 ат) 1450; превращение красной в черную при 386
HgSe Тиманнит искусств. образуется в запаянной трубке при 500; т. пл. неизвестна; эвтектика с Se при 217, задержка при 135
HgTe Колорадоит искусств., т. пл. около 580; эвтектика с Te (87 атомн. % Te) при 410
I_4Te искусств., т. пл. 259; эвтектика с Te (58% I) при 165, эвтектика с I при 105
Mg_3Bi_2 т. пл. 715; эвтектика с Mg(66% Bi) при 552

Продолжение табл. 18—XI

Mg_3Sb_2 т. пл. 961; эвтектика с Sb при 594, эвтектика с Mg при 626
MnAs **Канеит**; искусств. ферромагнитный, теряет As в H_2 при 420
MnS Алабандит, т. пл. 1620; диморфный, додекаэдральн. и кубич.; аномалия теплоемкости при —135, —126
MnS_2 **Гауэрит**, пиритогедр., температура диссоциации на MnS и пары S_2 неизвестна
MnSb искусств., т. пл. 809; эвтектика с Sb (9% Mn) при 580,
Mn_3Sb_2 искусств. плавится инконгруэнтно в Mn_2Sb при 872
Mn_2Sb искусств., т. пл. 948; эвтектика с Mn (55% Mn) при 920
MoS_2 **Молибденит, т. пл. 730?**
$NiAs_2$ диморфный; **Хлоантит**, пиритогедр. **Раммельсбергит** ромбич. (?); часто много Co, по составу постепенно переходит в **смальтин**; теряет As (при 1 ат) ниже 600
NiAs **Николит**, т. пл. 970
Ni_3As_2 **Маухерит (Плакодин** в шлаках) плавится инконгруэнтно в NiAs и жидкость около 850. Развивается при охлаждении от >900 при 600—700 с выделением тепла
Ni_5As_2 искусств., т. пл. 998, смешанные кристаллы с избытком As и с избытком Ni
Ni_3As встречается в природе, т. пл. искусств. около 950, непрерывные смешанные кристаллы с Ni_5As_2
NiBi искусств. плавится инконгруэнтно в Ni и жидкость 655
$NiBi_3$ искусств. плавится инконгруэнтно в NiBi и жидкость 469; эвтектика с Bi при 270
NiS **Миллерит**, т. пл. 990
Ni_3S_2 искусств., т. пл. 780, смешанные кристаллы, богатые Ni и S; в сплавах, богатых S, превращаются в Ni_6S_5(?) при < 554
Ni_2Sb_3 искусств. плавится инконгруэнтно в NiSb и жидкость 612
NiSb **Брейтгауптит** искусств., т. пл. 1160; эвтектика с Ni_5Sb_2 при 1072
Ni_5Sb_2 искусств., т. пл. 1170; эвтектика со смешанными кристаллами, Ni богат Sb 1100
Ni_3Sb? температура превращения в смешанных кристаллах Ni, богатых Sb, и Ni_5Sb_2 677
Pb — As эвтектика (3,0% As) при 288
Pb — Bi эвтектика (56% Bi) при 125
PbS **Галенит**, т. пл. искусств. 1130; 2 жидкости с Pb при 1050
Pb—Sb в области ликвидуса соединений не дает; эвтектика (87% Pb) при 248; ниже 245 реакция дает соединение $PbSb_2$
PbSe **Клаусталит**, т. пл. 1088; 2 жидкости с Se при 673
PbTe **Алтаит**, т. пл. 920
$PdSb_2$ плавится инконгруэнтно в PdSb 680
PdSb т. пл. 805
Pd_3Sb т. пл. 1180 образуется ряд смешанных кристаллов между PdSb и Pd.
Pt—As; $PtAs_2$ Сперрилит природн.; Pt_2As_3 искусств., т. пл. (получена путем экстраполяции) около 1400; эвтектика с Pt (13% As) (смешанные кристаллы?) при 600
$PtSb_2$ искусств., т. пл. 1230
PtSb искусств. плавится инконгруэнтно в $PtSb_2$ и жидкость 950; эвтектика со смешанными кристаллами Pt_5Sb(?) при 710
Pt_5Sb_2(?) искусств. распадается на смешанные кристаллы PtSb и Pt_5Sb(?) при 640
Pt_5Sb(?) искусств. плавится инконгруэнтно в смешанные кристаллы Pt и жидкость при 752
Sb_2S_3 **Стибнит**, искусств., т. пл. 546, 2 жидкости с Sb при 615; эвтектика с Sb при 519, 2 жидкости с S при 530, эвтектика с S при 114
S—Se соединений нет; эвтектика смешанных кристаллов S и смешанных кристаллов Se (40-мол. % Se) при 100; перитектическая смесь кристаллов; переход при 160.
S — Te соединений нет; эвтектика смешанных кристаллов S и смешанных кристаллов Te 108
Sb_2Se_3 искусств., т. пл. 620, 2 жидкости с Sb при 570; эвтектика с Sb при 530; эвтектика с Se при 210
Sb_2Te_3 искусств., т. пл. 650, 2 жидкости с Sb при 665; эвтектика с Sb при 540, эвтектика с Te при 425
Se — Te соединений нет; серия смешанных кристаллов с минимумом (?)
Sn_3As_2 искусств. (также продукт доменной печи) плавится инконгруэнтно в SnAs и жидкость 580
SnAs искусств., т. пл. 590; эвтектика с $SnAs_2$ (?) (50% As) при 570
Sn — Bi эвтектика (58% Bi) при 140
SnS искусств., т. пл. 880, 2 жидкости с Sn при 840
Sn — Sb несколько смешанных кристаллов; перитектическое превращение при 245, 325, 425 у ликвидуса; ниже 325—320 между Sn_3Sb_2 и SbSn непрерывная серия смешанных кристаллов
SnSe т. пл. 860, 2 жидкости с Sn при 820; эвтектика с $SnSe_2$ при 640

Продолжение табл. 18—XI

$SnSe_2$ т. пл. 650
SnTe т. пл. 780, 2 жидкости с Sn при 725
Zn_3As_2 т. пл. 1015, т. перех. α—β 672; эвтектика с $ZnAs_2$ (62% As) при 750
$ZnAs_2$ т. пл. 770; эвтектика с As (79% As) при 723
Zn — Bi соединений нет, 2 жидкости при 415
ZnS диморфный, энантиотропный; **Сфалерит (цинковая обманка)** тетрагедральн., низкотемпературный, **вуртцит** гексагон. высокотемпературный; переход при 1020 ± ± 10; летит при 1000; т. пл. (150 ат N_2) 1800—1900.
Zn_3Sb_2 т. пл. 565, неустойчив; эвтектика с Sb при 480.
ZnSb плавится инконгруэнтно в Zn_3Sb_2 и жидкость 540; эвтектика с Sb при 505.
ZnSe искусств., диморфный, модификация типа сфалерита и вуртцита
ZnTe искусств., т. пл. 1240.

Таблица 19—XI

Тройные системы сульфидов

Ag—As—S; двойная Ag_2S—As_2S_3
— **Ag_3AsS_3** диморфный, **Прустит** гексагон., **Ксантоконит** моноклин., искусств., т. пл. 490; эвтектика с Ag_2S при 470, эвтектика с $AgAsS_2$ при 400.
— **$AgAsS_2$** диморфный? **Смитит** моноклин. **Арсеномиаргирит** моноклин., но с другим соотношением осей, искусств., т. пл. 420.
Ag—Sb—S; двойная Ag_2S—Sb_2S_3
— **Ag_3SbS_3** диморфный, **Пираргирит** гексагон.; **Пиростильпнит** моноклин., т. пл. искусств. 485; эвтектика с Ag_2S при 465; эвтектика с $AgSbS_2$ при 455.
— **$AgSbS_2$ Миаргирит** искусств., т. пл. 510; эвтектика с Sb_2S_3 при 450.
Ag_3AsS_3 — Ag_3SbS_3 Прустит — Пираргирит смешанные кристаллы с минимумом при 465
Ag—Cu—S; двойная Ag_2S—Cu_2S; смешанные кристаллы (33 мол. % Cu_2S) с минимумом при 675; в природе **штромейерит** $(Ag, Cu)_2S$
Ag—Fe—S; двойная Ag_2S—FeS искусств. (11% FeS) эвтектика при 610; природн. **штернбергит** $AgFe_2S_3$ искусственно не воспроизводится.
Ag—Pb—S; двойная Ag_2S—**PbS** искусств. (23% PbS) эвтектика при 630.
Ag_2S—Cu_2S—PbS тройная эвтектика при 400.
Ag_2S — ZnS эвтектика (4% ZnS) при 810.
$Bi_4S_3Te_3$ Тетрадимит, природн. т. пл. 593—602, искусств. т. пл. 615; эвтектика с Bi_2S_3—Bi_2Te_3 (около 50 мол. % Bi_2Te_3) при 614, а при 97 мол. % Bi_2Te_3 570
CaS—$CaSiO_3$ эвтектика (3% CaS) при 1440.
CoAsS Кобальтин, т. перех. ромбич. в кубич. 850.
Co—Ni—As; (Co—Ni)As гомогенные твердые растворы.
Cu—Fe—S Работа Мервина и Ломбарда [Econ. Geol. 32 (Suppl.) 203—284, 1937] содержит полное описание исследований фазовых соотношений в системе. Имеющиеся детали невозможно изложить в кратком реферате. Установлены тройные соединения:
(a) **$CuFeS_2$ Халькопирит;**
(в) **$CuFe_2S_3$ Кубанит;**
(c) **Cu_5FeS_4 Борнит;**
(d) **$Cu_3Fe_4S_6$** } новые соединения.
(e) **Cu_5FeS_6** }

Эти соединения вместе с **халькозином** Cu_2S, **ковеллином** CuS, **пирротином** FeSx и **пиритом** FeS_2 образуют сложную систему смешанных кристаллов, границы которой для равновесия между твердым и парообразным состояниями были установлены при давлении паров S до 1 ат и при температурах до 950. Рекомендуются также руководства по неорганической химии, как, например, руководство Меллора.
Cu_2S—Ni_3S_2 эвтектика (77% Ni_3S_2) при 728.
Cu_2S — PbS эвтектика (51% PbS) при 540.
Cu — Pb — S жидкость, не смешивающаяся в границах Cu — Cu_2S в тройной системе в направлении Pb, вблизи 100% Pb.
Cu_3SbS_3 Фалькенгаинит или стилотипит? искусств., т. пл. 610.
$CuSbS_2$ Халькостибит, искусств., т. пл. 552.
FeAsS Арсенопирит распадается на FeSx и пары As при 675.
FeS — MnS эвтектика (6% MnS) при 1165.
Fe — P — S на участке Fe — Fe_2P — FeSx тройных соединений нет; тройная эвтектика при 953, несмешивающиеся жидкости от соединения Fe_2P—FeS по направлению к Fe, критич. точка (смешанные кристаллы αFe; 2 жидкости) (4% P, 4,5% S) 1240

Продолжение табл. 18—XI

FeSx—PbS эвтектика? (70% PbS) при 863
MnS — MnO эвтектика (50% MnO) при 1285.
$Pb_2As_2S_5$ природн. Дюфрезноит плавится инконгруэнтно при 580
$Pb_2Sb_2S_5$ Джемсонит (плюмозит) плавится инконгруэнтно в PbS и жидкость 610.
$Pb_5Sb_8S_{17}$ Плагионит плавится инконгруэнтно в $Pb_2Sb_2S_5$ и жидкость 570.
$PbSb_2S_4$ Цинкенит плавится инконгруэнтно в плагионит и жидкость 525.
PbS—SnS эвтектика (9% SnS) при 820.
PbS — Tl_2S эвтектика (60% Tl_2S) при 282.
PbS — ZnS эвтектика (6% ZnS) при 1045.
$Sb_4O_3S_3$ Кермезит, т. пл. 520.
$SnSb_2S_4$ плавится инконгруэнтно при 480.

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ XI

Ссылки приводятся не полно, так как потребовалось бы очень большое количество литературных цитат. Цитаты приведены лишь в том случае, если описание в таблицах, особенно для многокомпонентных систем, слишком кратко, чтобы охватить все известные детали поведения данных веществ.

Основные ссылки:

(I) Простые соединения: основные ссылки можно будет найти в:

a) Landolt — Börnstein — Roth — Scheel, Physikalisch — Chemische Tabellen; 5. Aufl. u. Evgänz. (1923); Julius Springer, Berlin.

b) Tables Annuelles de Constantes et Données de Chimie, de Physique, de Biologie et de Technologie (Ежегодные тома начиная с 1910 г.). Gauthier — Villars et Cie, Paris, и McGraw-Hill Book Co., New York.

c) J. W. Mellor, A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry, 16 volumes (1922—1937); Longmans Green and Co., London; New York, Toronto.

d) Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie, 8. Aufl. (выходит с 1927); Verlag Chemie G. M. B. H., Berlin.

e) Реферативные журналы.

(II) Минералы типа сульфидов:

a) W. Guertler, Metallographie, Bd. I (1912); Gebrüder Borntraeger, Berlin.

b) C. Doelter, H. Leitmeier, Handbuch der Mineralchemie, Bd. IV — 1-я половина (1926); Theodor Steinkopff, Dresden, Leipzig.

c) International Critical Tables, vol. IV, pp. 22—83 (1928); National Research Council and McGraw-Hill Book Co., Inc., New York and London.

d) Руководства, уже приведенные под (I).

(III) Соединения и системы с кремнеземом, глиноземом и другими огнеупорными окислами:

a) F. P. Hall, Herbert Insley, A Compilation of Phase-rule Diagrams of Interest to the Ceramist and Silicate Technologist, Journ. Am. Ceram. Soc. 16, 459—567 (1933); supplement ibid., 21, 113—164 (1938). Эта сводка представляет собой диаграммы для всех систем, описанных до даты опубликования сводки, вместе с литературными цитатами.

b) International Critical Tables, vol. IV, pp. 83—98 (1928).

c) H. E. Boeke, W. Eitel, Grundlagen der Physikalisch-chemischen Petrographie (1923); Gebrüder Borntraeger, Berlin.

d) W. Eitel, Physikalische Chemie der Silikate (1929); Leopold Voss, Leipzig.

e) N. L. Bowen, The Evolution of the Igneous Rocks (1928); Princeton University Press, Princeton.

(IV) Системы, включающие летучие компоненты:

a) G. W. Morey, Earl Ingerson, The Pneumatolytic and Hydrothermal Alteration and Synthesis of Silicates, Econ. Geol., Supplement to vol. 32, pp. 607—761 (1937).

ГЛАВА XII

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ И РАВНОВЕСИЯ МЕЖДУ ТВЕРДЫМИ СОСТОЯНИЯМИ В ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМАХ

Содержание

Таблица 1 — XII. Плавление и переходы твердое — твердое для химических элементов 173

» 2 — XII. Температура плавления A, H_2, He, N_2, Ne и O_2 175

» 3 — XII. Формулы для кривых плавления 176

» 4 — XII. Плавление и переходы для соединений . . . 177

» 5 — XII. Критические данные для состояния жидкость — газ 178

ВВЕДЕНИЕ

В однокомпонентных системах изменение температуры равновесия между двумя фазами ΔT, вызванное изменением гидростатического давления ΔP для двух фаз, дано уравнением Клапейрона, $\Delta T/\Delta P = T\Delta V/\Delta H$, где T — абсолютная температура, а ΔV и ΔH — соответственно изменение объема и поглощение тепла для данной массы вещества при переходе из одной фазы в другую. Одну фазу можно считать высокотемпературной, другую — низкотемпературной. При постоянном давлении переход из низкотемпературной фазы в высокотемпературную всегда сопровождается поглощением тепла (фактическое количество может быть ничтожно мало).

Подобным образом одну из фаз можно считать фазой низкого давления, другую — фазой высокого давления. При переходе из фазы низкого давления в фазу высокого давления при постоянной температуре плотность всегда увеличивается, то есть ΔV — величина отрицательная. Однако нельзя заранее предсказать, будет ли высокотемпературная фаза являться фазой высокого давления или фазой низкого давления. Нормально жидкая фаза является фазой высокотемпературной и низкого давления по отношению к твердым фазам; таким образом, при переходе из «нормально» твердой фазы в жидкую фазу ΔV и ΔH являются положительными и отношение $\Delta T/\Delta P$ также положительно (температура плавления увеличивается с давлением). Имеется несколько случаев «ненормального» плавления, когда жидкая фаза является фазой высокого давления и одновременно высокотемпературной по отношению к отдельным твердым фазам (висмут I, галлий I, лед I). Равновесие между двумя твердыми фазами обычно является равновесием этого типа с отрицательным отношением $\Delta T/\Delta P$. В этой главе ΔV и ΔH даны для перехода из низкотемпературной фазы в высокотемпературную, и сами фазы приводятся в этом порядке; таким образом, ΔH всегда положительно, в то время как ΔV может быть и положительным и отрицательным. В некоторых случаях вместо температуры перехода при данном давлении указано изменение температуры по сравнению с температурой перехода при 1 ат, обозначенное через ΔT.

Таблица 1—XII

Плавление и переходы твердое—твердое для химических элементов

(для A, H, He, N, Ne и O см. табл. 2—XII)

Элемент, переход	Давление, кг/см²	Температура (или изменение температуры), °C	Изменение объема, см³/г	Скрытая теплота, кал/г	Ссылка
Ba, твердое I — твердое II	17 500	0	—0,00163	0,115	5
	16 400	100	—0,00155	0,150	
	15 300	200	—0,00147	0,180	
Bi, твердое I—жидкое	1	271,0	—0,00345	12,87	7
	5 000	251,9	—0,00386	11,37	
	10 000	228,8	—0,00419	9,76	
	15 000	200	—0,00440	8,11	
(Тройная точка L—I — II)	17 300	183	—0,0045	7,27	
твердое I — твердое II	18 000	170	—0,00480	2,53	
	29 200	—50	—0,00455	1,20	
твердое II—твердое III (Тройная точка L—II—III)	22 400	185	—0,0029	1,05	
	30 300	—50	—0,00275	0,47	
(Тройная точка I—II—III)	32 300	—110			
твердое IV— твердое III....	43 000	—100	0,0003 (?)	0,0047 (?)	
	43 500	50			
Ca, твердое I—твердое II	30 000	75	—0,0008 (?)		5
Cd, твердое—жидкое	517	ΔT= 4,01	от т. пл. при 1 ат		11
	1 033	ΔT= 8,03			
	2 066	ΔT=16,05			
Cs, твердое I—жидкое	1	29,7	0,0136	3,86	1
	2 000	70,2	0,0088	4,22	
	4 000	98,5	0,0072	5,37	
твердое II—твердое I.....	22 070	30	0,0034		4,5
	22 420	75			
Ga, твердое I—жидкое	1	29,85	—0,00529	18,3	7
	4 000	21,5	—0,00585	18,8	
	8 000	12,6	—0,00665	19,0	
	12 000	2,5	—0,00740	17,7	
(Тройная точка L—I—II)	12 050	2,4			
твердое I—твердое II.....	12 230	0	—0,0098	7,4	
	16 800	—40	—0,0098	5,6	
(Фаза II′, также неустойчива; см. ссылку 7)	20 500	—80	—0,0098	3,4	
Hg, твердое I—жидкое	1	—38,8	0,002534		1
	4 000	—18,4	0,002512	2,951	
	8 000	1,8	0,002445	3,114	
	12 000	21,9	0,002290	3,165	
	7 640	0			
	22 570	75			4
твердое II—твердое I.....	10 000	—109	0,00104	0,518	7
	20 000	—43	0,00051	0,483	
	30 000	5	0,00036	0,586	
	35 000	23	0,00032	0,694	
K, твердое—жидкое	1	62,5	0,02680	12,91	1
	4 000	115,8	0,01676	14,57	
	8 000	152,5	0,01073	13,70	
	12 000	179,6	0,00642	11,32	

Продолжение табл. 1—XII

Элемент, переход	Давление, кг/см²	Температура (или изменение температуры), °С	Изменение объема, см³/г	Скрытая теплота, кал/г	Ссылка
Li, твердое—жидкое	1	178,4			1
	4 000	191,8			
	8 000	201,6			
Na, твердое—жидкое	1	97,62	0,02787	27,64	1
	4 000	128,8	0,02072	27,39	
	8 000	155,1	0,01711	28,60	
	12 000	177,5	0,01398	28,28	
P, твердое I (желтый)—жидкое	1	44,2	0,01927	4,90	1
	2 000	99,3	0,01667	5,65	
	4 000	148,2	0,01436	6,16	
	6 000	191,9	0,01218	6,51	
твердое II—твердое I	1	—76,9			
	6 000	— 2,4	0,00851	43,60	
	8 000	21,4	0,00799	47,42	
	10 000	43,7	0,00746	51,11	
	12 000	64,4	0,00694	54,56	
	(См. также ссылку 10)				
Pb, твердое—жидкое	517	$\Delta T = 4{,}01$	От т. пл. при 1 ат		11
	1 033	$\Delta T = 8{,}03$			
	2 066	$\Delta T = 16{,}05$			
Rb, твердое—жидкое	1	38,7	0,0185	6,47	1
	2 000	74,5	0,0119	6,25	
	3 500	95,9	0,0101	6,52	
S, моноклин.—жидкая	1	114,0			20
	186	120	0,041		
	528	130	0,040		
	890	140			
	1 280	150			
жидкая—ромбич. (Точка перехо	1 450	153,7			
	2 130	170			
	3 160	190			
ромбич.—монокл.	1	96,7	0,0138		
	631	120	0,0139		
	1 128	140	0,0140		
	1 363	150			
Sn, жидкое—твердое	517	$\Delta T = 1{,}64$	От т. пл. при 1 ат		11
	1 033	$\Delta T = 3{,}28$			
	2 066	$\Delta T = 6{,}55$			
Sr, твердое—твердое	26 000	125	—0,0034		5
	27 000	75	— 0,0034		
	28 000	25	—0,0034		
Te, твердое II—твердое I	20 000	105			7
	40 000	0			
твердое I—твердое III	41 500	150	—0,0058		
	42 500	100			
Tl, твердое II—твердое I	1	227	—0,000004		7
(Точка перехода)	39 000	153	—0,00024	0,98	
твердое II—твердое III	39 000	153	—0,00053	0,063	
	43 000	—100	—0,00039	0,026	
Zn, жидкое—твердое ($\Delta T/\Delta P = 0{,}0038$ °/кг·см$^{-2}$)			0,0066		25

Таблица 2—XII

Температуры плавления A, H_2, He, N_2, Ne и O_2

	Давление по манометру, кг/см²	Абсолютная температура	Изменение объема, см³/г	Скрытая теплота плавления, кал/г	Ссылка
A	0	83,9	0,0795	6,56	2
	1000	106,4	0,0555	6,56	
	2000	126,3	0,0425	6,54	
	3000	144,9	0,0340	6,49	
	4000	161,9	0,0280	6,44	
	5000	177,8	0,0240	6,47	
	6000	192,9	0,0210	6,49	
	0	83,8			18
	950	102,5			
	2085	126,2			
	3040	143,4			
H_2	0	13,9			18
	400	24,4			
	1050	35,5			
	1970	47,4			
	3050	58,9			
	4000	66,8			
	5000	75,4			
	0,1	13,95(точка перехода)			13
	62,1	15,85			
	203,8	19,47			
	336,2	22,38			
	449,4	24,66			
	513	25,94			
	610	27,65			
He	827	12,2			19
	2050	21,4			
	2960	27,9			
	3910	33,0			
	4910	38,4			
	5630	42,0			
	26,09	1,15			12
	30,85	1,75			
N_2	0	63,2	(0,072)	5,11	2
	1000	82,3	0,058	6,35	
	2000	98,6	0,047	7,08	
	3000	113,0	0,040	7,83	
	4000	125,8	0,033	7,85	
	5000	137,8	0,029	8,02	
	6000	149,2	0,026	8,11	
	0	63,2			18
	520	73,6			
	977	81,3			
	1945	96,7			
	2730	107,0			
	4120	121,2			
	5050	130,7			
	1994	98,1			21
	3795	123,1			
	5898	148,1			

(См. также табл. 3—XII)

Продолжение табл. 2—XII

	Давление по манометру, кг/см²	Абсолютная температура	Изменение объема, см³/г	Скрытая теплота плавления, кал/г	Ссылка
Ne	0	24,4			18
	1100	36,9			
	2000	46,8			
	3070	56,8			
	4010	63,5			
	4900	69,1			
O_2	(См. также табл. 3—XII)				
	48,2	54,90			17
	167,7	56,25	(См. табл. 3—XII)		

Таблица 3—XII

Формулы для кривых плавления

Установлено, что температура плавления ряда химических элементов удовлетворяет зависимости:

$$\log (P + a) = c \log T + b,$$

где P — давление в кг/см², T — абсолютная температура (в градусах Цельсия), a, b и c — константы. Следует иметь в виду, что константы, определенные различными исследователями для различных пределов давления, обычно бывают разными. Вероятно, формула не действительна для экстраполяции далеко за пределы измерений, при которых были найдены константы. Бенедикт [21] также дает альтернативную формулу для влияния давления на температуру плавления азота:

$$P(\text{кг/см}^2) = 21{,}306 + 155{,}12\, t + 0{,}25557\, t^2,$$

где t — температура в градусах Цельсия. Оба эти выражения довольно точно удовлетворяют хорошо согласующимся между собой данным Бенедикта и Бриджмена (ссылка 2).

	a	b	c	Пределы давления, кг/см²	Ссылка
A	3000	1,003	1,288	0—3040	18
H_2	220	0,191	1,879	0—5000	18
	245,3	0,28771	1,83435	0—610	13
He	17	1,236	1,5544	827—5630	19
N_2	1250	—0,870	2,203	0—5050	18
	1660	0,01189	1,78152	1000—6000	21
	933,4	—2,527384	3,05365	0—110	14
Ne	1200	0,875	1,579	0—4900	18
	728,8	—0,16875	2,18038	0—200	15
O_2	1081,8	—4,145465	4,13811	48—168	17

Таблица 4—XII

Плавление и переходы для соединений

Полиморфные переходы большого количества других неорганических солей даны в ссылках 1 и 3, органических соединений — в ссылке 6. Некоторые опыты с минералами описаны в ссылке 16. dT/dP дано в °С на кг/см²

	Давление, кг/см²	Температура, °С	Изменение объема, см³/г	Скрытая теплота плавления, кал/г	Ссылка
CO_2, твердое — жидкое	1	−56,6			
	4 000	+8,5	0,0979	48,66	1
	8 000	55,2	0,0697	51,16	
	12 000	93,5	0,0531	52,80	
CS_2, твердое — жидкое	13 100	25	0,0262		24
	15 900	50	0,0246		
	18 900	75	0,0232		
	21 800	100	0,0220		
	25 000	125	0,0209		
	28 300	150	0,0201		
	31 700	175	0,0193		
$SiCl_4$, твердое — жидкое	2 000	−10,0	0,0522	12,25	1
	8 000	139,4	0,0330	13,99	
	11 000	205,4	0,0297	15,63	
Ag_2S, твердое II — твердое I	15 300	100			3
	19 000	150	0,0005	0,4	
	22 700	200			
$CaCO_3$, твердое I (кальцит)—твердое II	13 000	200		0,149	8
	14 000	100	−0,00135	0,118	
	15 000	0		0,086	
твердое III — твердое II	16 700	0		3,50	
	22 440	100	0,00956	4,80	
	28 170	200		6,08	
SiO_2, α (низкотемпературный) кварц— —β (высокотемпературный) кварц ($T = 572{,}3$ °С)	224	$\Delta T = 4{,}6$	0,00325	3,1	9
	551	$\Delta T = 11{,}4$			
	960	$\Delta T = 20{,}8$			
	1380	$\Delta T = 28{,}6$	(от температуры перехода при 1 ат)		
	1795	$\Delta T = 39{,}6$			
	2254	$\Delta T = 50{,}9$			
	2693	$\Delta T = 61{,}4$			
KCl, твердое — твердое	19 900	30 ($dT/dP = 0{,}200$)	0,055	1,97	7
KBr, твердое — твердое	19 300	30 ($dT/dP = -0{,}188$)	0,0325	1,22	7
KI, твердое — твердое	17 850	30 ($dT/dP = 0{,}430$)	0,0265	0,42	7
$NaAlSi_3O_8$ (альбит), твердое — жидкое (сухой) (см. также табл. 3—XV и 4—XV)		1115 ($dT/dP = 0{,}026$)	(0,039)	48,5	22
H_2O, лед, см. гл. XIV					
$K_2Si_4O_9$, твердое II — твердое I	1	592 ($dT/dP = 0{,}028$)	0,003	2,3	23
твердое I — жидкое (плавится инконгруэнтно при $P > 140$)	1	765 ($dT/dP = -0{,}059$)	−0,009	35	
$K_2Si_2O_5$, твердое — жидкое		($dT/dP = 0{,}0034$)			23

(К ссылке следует обращаться для деталей системы $SiO_2 — K_2Si_2O_5 — K_2Si_4O_9$)

Таблица 5—XII

Критические данные для состояния жидкость—газ

Критические константы для большого количества соединений, не вошедших в таблицу, определены, и их можно найти в стандартных руководствах, таких, как: I. C. T., vol. III, p. 248.

	Критическая температура, °C	Критическое давление, кг/см²	Критическая плотность, г/см³	Ссылка
Элементы				
A	—122	49,7	0,531	27
Br_2	302		1,18	28
Cl_2	144,0	78,7	0,573	27
H_2	—239,9	13,2	0,0310	27
He	—267,9	2 34	0,0693	27
Hg	1460±20	1640±50	~5	26
I_2	553			28
Kr	—63?	56?	0,78?	27
N_2	—147,1	34,7	0,3110	27
Ne	—228,7	26,8	0,484	27
O_2	—118,8	51,4	0,430	27
Rn	104	64,1		28
S	1040			27
Xe	16,6	60,2	1,155	27
Соединения				
CO	—139	36,2	0,311	27
CO_2	13,1	75,5	0,46	27
CH_4	— 82,5	47,4	0,162	27
HCl	51,4	84,5	0,42	27
H_2O	374,0	224,9	0,4	28
H_2S	100,4	92		27
NH_3	132,4	115,5	0,235	27
SiH_4	— 3,5	49,7		28
SO_2	157.2	80,1	0,52?	27
SO_3	218,3	86,5	0,630	28

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ XII

1. Bridgman, The Physics of High Pressure Macmillan, New York, 1931.
2. Bridgman, Proc. Am. Acad. 70, 1, 1935.
3. Bridgman, Proc. Am. Acad. 72, 46, 1937.
4. Bridgman, Proc. Am. Acad. 72, 157, 1938.
5. Bridgman, Proc. Am. Acad. 72, 207, 1938.
6. Bridgman, Proc. Am. Acad. 72, 227, 1938.
7. Bridgman, Phys. Rev. 48, 893, 1935.
8. Bridgman, Am. Journ. Sci. 37, 7, 1939.
9. Gibson, Journ. Phys. Chem. 32, 1197, 1928.
10. Jacobs, Journ. Chem. Phys. 5, 945, 1937.
11. Johnston, Adams, Am. Journ. Sci. 31, 501, 1911.
12. Keesom, Keesom, Comm. Leiden. 224 d and e.
13. Keesom, Lisman, Comm. Leiden. 213e, 221a.
14. Keesom, Lisman, Comm. Leiden. 232b.
15. Keesom, Lisman, Comm. Leiden. 224b.
16. Larsen, Bridgman, Am. Journ. Sci. 36, 81, 1938.
17. Lisman, Keesom, Comm. Leiden. 239a.
18. Simon, Ruhemann, Edwards, Zeit. phys. Chem. B. 6, 331, 1930.
19. Simon, Ruhemann, Edwards, Zeit. phys. Chem. B. 2, 340, 1929; 6, 62, 1929.
20. Tammann, Aggregatzustande, Leipzig, Voss, 1922.
21. Benedict, Journ. Am. Chem. Soc. 59, 2233, 1937.
22. Goranson, Am. Journ. Sci. 35A, 71, 1938.
23. Goranson, Kracek, Journ. Phys. Chem. 36, 913, 1932.
24. Bridgman, не опубликовано.
25. Birch, Wilson, не опубликовано.
26. Birch, Phys. Rev. 41, 641, 1932.
27. Pickering, Bur. Stand. Sci. Paper, 21, no 541, 1926.
28. International Critical Tables, III, 248.

ГЛАВА XIII

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ В ДВОЙНЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Содержание

Таблица 1—XIII. Растворимость различных твердых веществ в воде при атмосферном давлении 181
» 2—XIII. Влияние высоких давлений на растворимость некоторых солей в воде при 25° С 183
» 3—XIII. Влияние давления на состав ликвидуса в системе диметиланилин в монометиланилине при 0° С 184
» 4—XIII. Влияние давления на температуру и состав эвтектики в различных системах 186

ВВЕДЕНИЕ

Хотя очень немногие данные о влиянии давления на двойные системы представляют непосредственный интерес для геологов, все же экспериментально были изучены различные химические системы для разных пределов давления и температуры, но эти системы настолько разнообразны, что нельзя дать общую картину типов влияния, какие могут иметь место. Настоящая сводка не является исчерпывающей, но была сделана попытка включить в нее все, какие только наблюдались, различные типы поведения систем под давлением и дополнить ее списком ссылок на цитируемые статьи.

I. ДВОЙНЫЕ КОНДЕНСИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ, СОДЕРЖАЩИЕ ВОДУ

а) Влияния сравнительно низких давлений на растворимость солей в воде при постоянной температуре. Результаты, собранные из разных источников, объединены на рис. 9, где для данной температуры отношение растворимости при любом давлении P к растворимости при атмосферном давлении нанесено по оси давления. Ордината выражает отношение r_2/r_2', где r_2 — масса твердого вещества на единицу массы воды в насыщенном растворе при давлении P, а r'_2 — та же величина при атмосферном давлении. Величины r_2' для солей, приведенных на рис. 9, даны в табл. 1—XIII. Следует отметить, что $(r_2/r_2')-1$ является фракционным изменением растворимости, вызванным данным повышением давления. Если нет других указаний, давление выражено в барах (1 бар $= 10^6$ дин/см^2=0,987 ат=1,0197 кг/см^2). Общие факторы, определяющие влияние давления на растворимость твердых тел в воде [10], например влияние поляризующей силы ионов и влияние гидратации твердых солей, отображены на рис. 9.

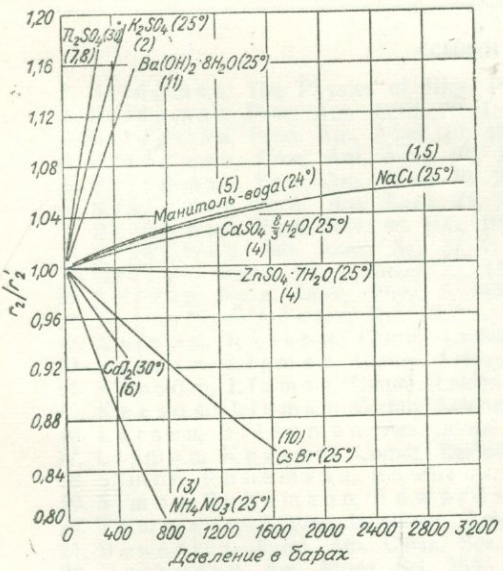


Рис. 9. Влияние давления на растворимость некоторых веществ в воде.

Ордината дает отношение растворимости при давлении P к растворимости при атмосферном давлении, причем растворимость выражена как масса раствора на единицу массы воды.

Таблица 1—XIII

Растворимости различных твердых веществ в воде при атмосферном давлении

(r_2' для рис. 9)

Твердая фаза	Температура, °C	100 r_2' (граммы безводной соли на 100 г H_2O)
Tl_2SO_4	30	6,16
K_2SO_4	25	12,06
$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	25	9,06
Маннитол	24	20,66
KI		148,1
NaCl	25	35,91
$CdSO_4 \cdot \frac{8}{3} H_2O$	25	76,80
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	25	57,95
CsBr	25	123,7
CdI_2	30	87,94
NH_4NO_3	25	208,9

(b) Влияния высоких давлений на растворимость твердых тел в воде. Диаграммы равновесий, показывающие 25° изотермы для равновесий твердая соль — раствор и лед VI — раствор в системах $NaCl — H_2O$[1], $K_2SO_4 — H_2O$[2] и $NH_4NO_3 — H_2O$[3], даны на рис. 10, 11 и 12. Весовые фракции (масса соли на единицу массы раствора) соли нанесены по оси абсцисс, а давление — по оси ординат. В табл. 2—XIII дано влияние давления на растворимости этих солей и иодистого калия [9]; (r_2/r_2') занесено в таблицу как функция давления.

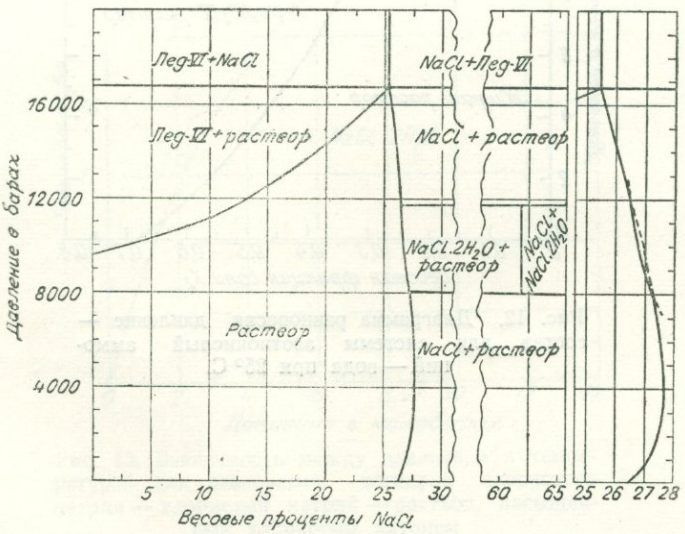


Рис 10. Диаграмма равновесия давление — состав для системы хлористый натрий — вода при 25° С.

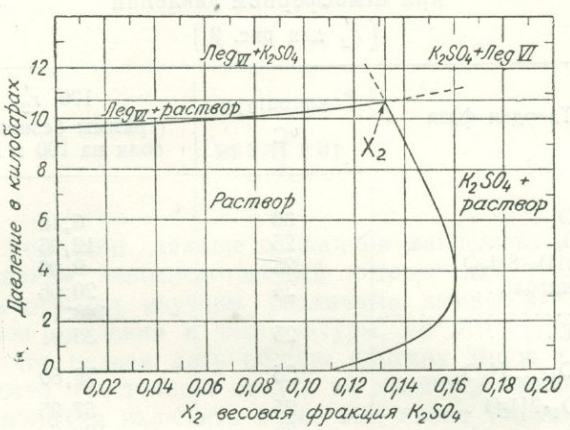


Рис. 11. Диаграмма равновесия давление — состав для системы сернокислый калий — вода при 25° С.

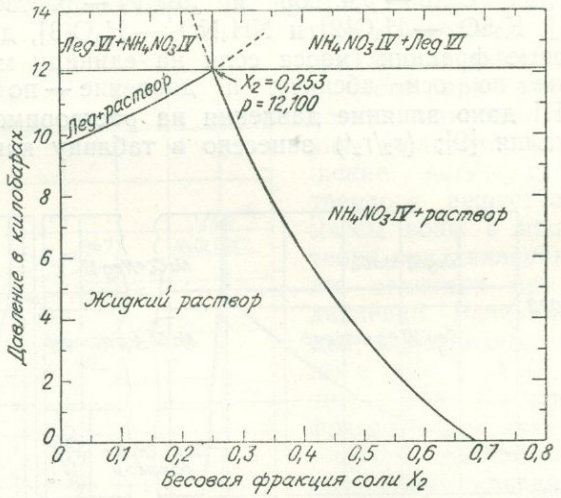


Рис. 12. Диаграмма равновесия давление — состав для системы азотнокислый аммоний — вода при 25° С.

Таблица 2—XIII

Влияние высоких давлений на растворимость некоторых солей в воде при 25°C

Давление, бары	r_2/r_2'			
	хлористый натрий [1] $100\,r_2'=35{,}91$	сернокислый калий [2] $100\,r_2'=12{,}06$	азотнокислый аммоний [3] $100\,r_2'=208{,}9$	иодистый калий [9] $100\,r_2'=148{,}1$
1	1,000	1,000	1,000	1,000
500	1,019			
1000	1,034	1,327	0,768	
1500	1,045			
2000	1,053	1,509	0,617	1,047
3000	1,062	1,592	0,510	
4000	1,064	1,617	0,439	1,083
5000	1,063	1,600	0,370	
6000	1,058	1,567	0,323	1,126
7000	1,052	1,509	0,285	
8000	1,044 *	1,451	0,252	1,165
9000	1,035 *	1,393	0,224	
10000	1,025 *	1,327	0,202	1,221
11000	1,015 *	1,260	0,182	
12000	1,004 *		0,163	

* Метаустойчивый $NaCl \cdot 2H_2O$ при этих условиях является устойчивой твердой фазой

(c) Влияние давления на температуру инконгруэнтного плавления гидратов. Дигидрат хлористого натрия. Рис. 13 показывает давления и температуры, при которых $NaCl_2 \cdot 2H_2O$ находится в равно-

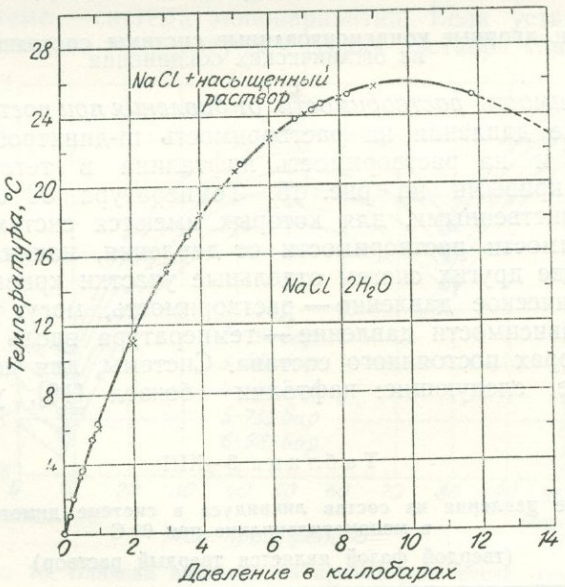


Рис. 13. Зависимость между давлением и температурой для равновесия: дигидрат хлористого натрия — хлористый натрий — раствор, насыщенный хлористым натрием

(Кривая инконгруэнтного плавления $NaCl \cdot 2H_2O$)

весии с NaCl и раствором, насыщенным NaCl [12]. Кривая может быть выражена уравнением: $t = 0{,}06 + 6{,}512p - 0{,}5529p^2 + 0{,}06056p^3$.

Десятиводный гидрат сернокислого натрия. Измерения давлений и температур, при которых $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ находится в равновесии с Na_2SO_4 и раствором, насыщенным Na_2SO_4, графически изображены на рис. 14.

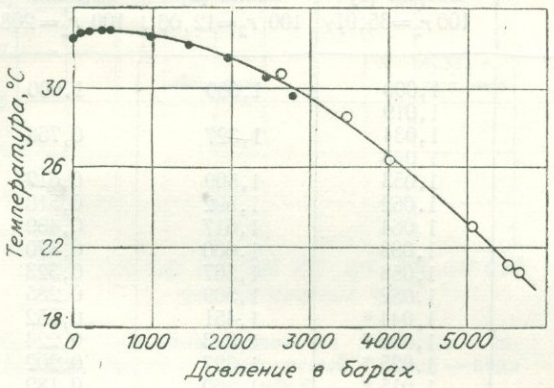


Рис. 14. Зависимость между давлением и температурой для равновесия: декагидрат сернокислого натрия — сернокислый натрий — раствор, насыщенный сернокислым натрием.

(Кривая инконгруэнтного плавления $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$). Точками обозначены данные Таммана [14, 15] и Блока [13], кружками — неопубликованные результаты, полученные Адамсом и Джибсоном).

II. ДВОЙНЫЕ КОНДЕНСИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ, СОСТОЯЩИЕ ИЗ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

(а) Зависимость растворимости от давления при постоянной температуре. Влияние давления на растворимость m-динитробензола в этилацетате [16] и на растворимость нафталина в тетрахлорэтане [17] изображено кривыми на рис. 15. Температура 30° С. Эти системы являются единственными, для которых имеются систематические данные о зависимости растворимости от давления, начиная с атмосферного, но в ряде других систем отдельные участки кривых, изображающих изотермическое давление — растворимость, могут быть получены из данных зависимости давление — температура вдоль кривых ликвидуса в растворах постоянного состава. Системы, для которых имеются такие данные, следующие: нафталин — бензол [18], уретан — бензол

Таблица 3—XIII

Влияние давления на состав ликвидуса в системе диметиланилин в монометиланилине при 0° С

(твердой фазой является твердый раствор)

Давление, бары	1	500	1000	1500	2000
Мол. % диметиланилина в растворе	94	71	56	44	35

[18, 20], фенол — анилин [19], m-крезол — о-крезол [19], монометиланилин — диметиланилин [24], уретан — дифениламин [23]. В этих системах растворимость твердых фаз очень быстро уменьшается с повышением давления. Табл. 3 — XIII вычислена из кривых давление — температура для ликвидуса в системе монометиланилин — диметиланилин [24].

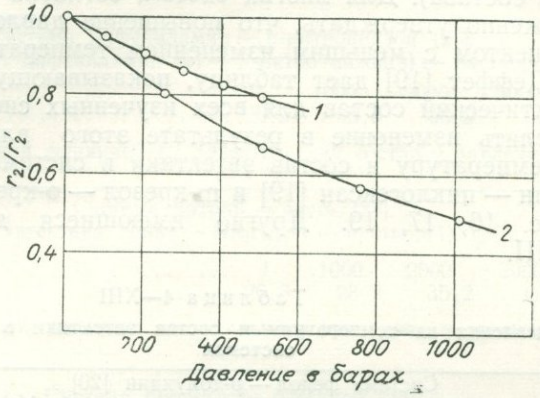


Рис. 15. Влияние давления на растворимость при 30°С:
(1) m-динитробензола в этилацетате [16];
(2) нафталина в тетрахлорэтане [17].

(b) Влияние давления на эвтектическую температуру и состав. Когда две твердые фазы и жидкий раствор сосуществуют в двойной системе — система моновариантна. Если установлено определенное давление, то температура и состав раствора также становятся

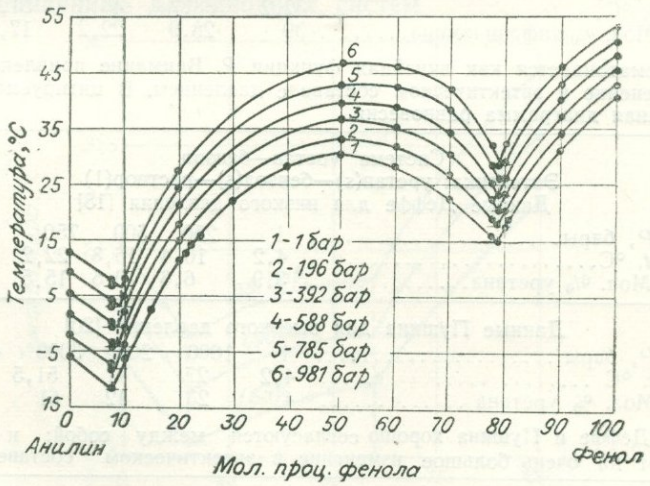


Рис. 16. Влияние давления на кривые равновесия: температура — состав в двойной системе анилин — фенол (где происходит образование соединения).

определенными, как это имеет место при эвтектике в обычной диаграмме температура — состав. Каждой величине давления соответствуют определенные величины температуры и состава раствора, так что

при изменении давления эвтектика передвигается вдоль линии давление — температура — состав. На строгую зависимость между изменением эвтектического состава с давлением указывает то, что повышение давления обогащает раствор компонентом с меньшим значением $\Delta V/\Delta S$ (причем ΔS и ΔV являются энтропией и изменением объема, когда единица массы твердого вещества растворяется в растворе эвтектического состава). Для многих систем, согласно этому закону, можно приближенно утверждать, что повышение давления обогащает раствор компонентом с меньшим изменением температуры плавления с давлением. Деффет [19] дает таблицу, показывающую влияние давления на эвтектический состав для всех изученных систем, и делает попытку вычислить изменение в результате этого влияния. Влияние давления на температуру и состав эвтектики в системах анилин — фенол [19], анилин — циклогексан [19] и m-крезол — о-крезол [19] изображено на рис. 16, 17, 19. Другие имеющиеся данные сведены в табл. 4 — XIII.

Таблица 4—XIII

Влияние давления на температуру и состав эвтектики в различных системах

Система фенол — p-толуидин [20]
Эвтектика: фенол(s)—соединение фенол толуидин, 1 : 1(s)-раствор (1)

P, бары	1	1000	2000	3000	3500
t, °C	9,1	22,6	35,7	49,0	55,7

Значительных изменений в составе с изменением давления нет. В данных пределах t является линейной функцией P.

Система уретан—дифениламин [23]
Эвтектика: уретан(s)—дифениламин(s)—раствор(1)

P, бары	1	500	1000	1500
t, °C	32,2	38,7	45,3	51,9
Мол, % дифениламина	39	28,9	22,2	17,6

t рассматривается как линейная функция P. Внимание привлекает большое изменение в эвтектическом составе с давлением. В цитируемой работе дана полная диаграмма равновесия.

Система уретан—бензол
Эвтектика: уретан(s)—бензол(s)—раствор(1)
Данные Деффе для низкого давления [18]

P, бары	1	250	500	750	1000
t, °C	4,2	10,4	16,3	22,2	27,9
Мол. % уретана	3,9	6,6	10,5	15,5	20,8

Данные Пушина для высокого давления [20]

P, бары	1	1000	2000	3000	4000
t, °C	4,2	27	41	51,5	60
Мол. % уретана	4	23	42	61	80

Данные Деффе и Пушина хорошо согласуются между собой; и те и другие указывают на очень большое изменение в эвтектическом составе с давлением.

Система бензол—нафталин [18]
Эвтектика: бензол(s)—нафталин(s)—раствор(1)

P, бары	1	250	500	750	1000
t, °C	−3,5	2,5	8,4	14,4	20,4

В пределах этого давления эвтектический состав меняется меньше чем на 1%.

Продолжение табл. 4—XIII

Система нафталин—m-динитробензол [22]
Эвтектика: нафталин(s)—m-динитробензол(s)—раствор(1)

P, бары	1	1500	1000	1500	2000	2500
t, °C	51	63,5	75,2	85 8	94,7	102,4

Об изменении в эвтектическом составе с давлением данных нет.

Система дифениламин — p-нитроанизол [21].
Эвтектика: дифениламин (s) — p-нитроанизол(s) — раствор(1).

P, бары	1	1000	2000	3000
t, °C	20,5	38,8	56,8	74,5

t является линейной функцией *P*. Эвтектический состав с давлением заметно не изменяется.

Система натрий — ртуть [23].
Эвтектика Na(s) — Na_3Hg(s) — раствор(1).

P, бары	1	1000	2000	3000
t, °C	20,8	28,2	35,2	41,0

Выше этих пределов давления значительного изменения в эвтектическом составе не происходит.

Система о-ксилен — p-ксилен [25].
Эвтектика: о-ксилен(s) — p-ксилен(s) — раствор(1).

P, бары	1	1000	2000
t, °C	(—35)	—14	+7,2

t рассматривается как линейная функция *P*. О влиянии давления на эвтектический состав данных нет.

(c) Разные примеры. Рис. 16, 17, 18 и 19, взятые из работы Деффе [19], иллюстрируют влияние давления на некоторые типы диаграмм равновесия, найденные для двойных систем.

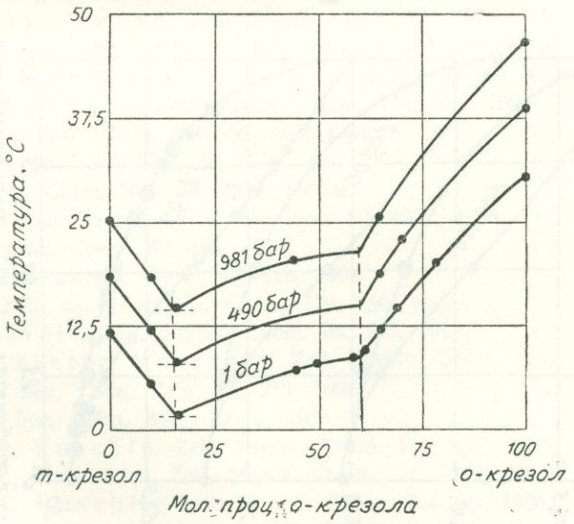


Рис. 17. Влияние давления на кривые равновесия: температура — состав в двойной системе m-крезол—о-крезол
(Дает соединение, которое плавится инконгруэнтно)

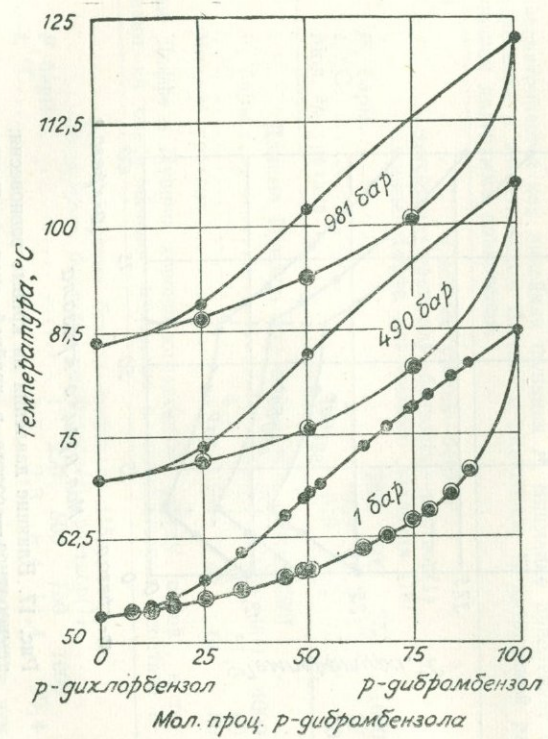


Рис. 18. Кривые солидуса и ликвидуса при разных давлениях в системе р-дихлорбензол—р-дибромбензол.

(Эти вещества образуют непрерывный ряд твердых растворов.)

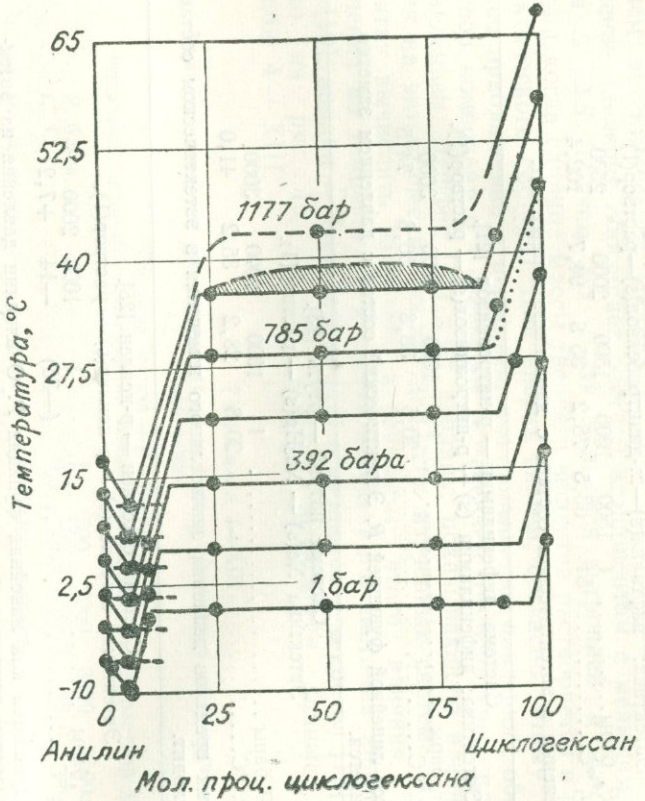


Рис. 19. Влияние давления на кривые температура — состав в системе анилин—циклогексан

(где несмешиваемость жидкости встречается в широких пределах состава).

Рис. 16 показывает влияние давления на кривые равновесия в системе, содержащей конгруэнтно плавящиеся соединения с двумя эвтектиками. Влияние давления сводится только к повышению температуры равновесия в этой системе. Рис. 17 показывает тот же тип влияния давления в системе, содержащей инконгруэнтно плавящееся соединение.

Влияние давления на кривые солидуса и ликвидуса в системе, которая дает непрерывный ряд твердых растворов, показано на рис. 18. Здесь опять-таки влияние повышения давления качественно соответствует тому, чего следует ожидать от влияния давления на точки плавления для чистых соединений.

Рис. 19 дает серию изобар для системы, в которой встречаются несмешивающиеся жидкости. Горизонтальные участки кривых представляют собой температуры равновесия и составы, при которых твердый циклогексан сосуществует с двумя жидкими растворами. Пределы концентраций, при которых сосуществуют все три фазы, уменьшаются с повышением давления и становятся равными нулю при давлении около 1200 кг/см^2 (1177 бар). Заштрихованный участок показывает область существования двух жидкостей при давлении в 1000 кг/см^2 (981 бар).

Эти примеры предназначены для иллюстрации влияний, которые могут иметь место, но которые в настоящее время не следует считать типичными.

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ XIII

1. Adams, Journ. Am. Chem. Soc. 53, 3769, 1931.
2. Adams, Journ. Am. Chem. Soc. 54, 2229, 1932.
3. Adams, Gibson, Journ. Am. Chem. Soc. 54, 4520, 1932.
4. Cohen, Sinnige, Zeit. physik. Chem. 67, 432, 1909; ibid. 69, 102, 1909.
5. Cohen, Inouye, Euwen, Zeit. physik. Chem. 75, 257, 1911.
6. Cohen, Hetterschij, Moesveld, Zeit. physik. Chem. 94, 210, 1920.
7. Cohen, Peereboom, Voller, Moesveld, Zeit. physik. Chem. 104, 323, 1923
8. Cohen, van den Bosch, Zeit. physik. Chem. 114, 453, 1925.
9. Gibson, Journ. Am. Chem. Soc. 56, 865, 1934.
10. Gibson, Journ. Am. Sci. 35A, 49, 1938.
11. Sill, Am. Journ. Chem. Soc. 38, 2632, 1916.
12. Adams, Gibson, Journ. Am. Chem. Soc. 52, 4252, 1930.
13. Block, Zeit. phys. Chem. 82, 403, 1913.
14. Tammann, Zeit. physik. Chem. 46, 818, 1903.
15. Tammann, Zeit. anorg. allgem. Chem. 179, 186, 1929.
16. Cohen, Moesveld, Zeit. physik. Chem. 93, 385, 1919.
17. Cohen, de Meester, Moesveld, Zeit. physik. Chem. 114, 321, 1925.
18. Deffet, Bull. Soc. Chim. Belg. 45, 213, 1936.
19. Deffet, Bull. Soc. Chim. Belg. 47, 1, 1938.
20. Пушин Н. А., Puschin, Zeit. physik. Chem. 118, 447, 1925.
21. Пушин Н. А., Puschin, Zeit. physik. Chem. 124, 217, 1926.
22. Пушин Н. А., Puschin, Zeit. Physik. Chem. 124, 16, 1926.
23. Пушин Н. А. и Гребенщиков И. В., Puschin, Grebenschtschikow, Zeit. physik. Chem. 118, 276, 1925.
24. Swallow, Gibson, Journ. Chem. Soc. 1934. 18.
25. Swallow, Gibson, Journ. Chem. Soc. 1934, 440.

ДОБАВОЧНЫЕ ССЫЛКИ

Denecke, Zeit. anorg. allgem. Chem. 108, 1, 1919 (Эвтектика в растворах при низких температурах, $NaCl - H_2O$; $KCl - H_2O$; $NH_4Cl - H_2O$, тростниковый сахар — H_2O, $MgBr_2 - H_2O$).

Favre, Comptes Rendus 51, 827, 1027, 1860 (Влияние низкого давления на растворимость Na_2SO_4, K_2SO_4, $ZnSO_4$, NaCl).

Hasselblatt, Zeit anorg. allgem. Chem. 119, 313, 1921 (Влияние давления на эвтектическую температуру и состав в системе $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O - Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$).

Култашов, Kultascheff, Schriften Naturf. — Gesell. Univ. Jurjew (Dorpat) № 22(1915), Thesis, Dorpat, 1915 (Системы нафталин — р-толуидин, нафталин — уретан). Moeller, Ann. der Physik 117; 386, 1862 (Влияние давления на растворимость NaCl, $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, K_2SO_4 в воде при температуре от 10 до 25°C).

Ролов, Roloff, Zeit. physik. Chem. 17, 325, 1895 (Система нафталин — дифениламин).

Sorby, Proc. Roy. Soc. (London) 12, 538, 1863, Phil. Mag. 27, 145, 1864 (Влияние давления на растворимость в воде NaCl, K_2SO_4, $CuSO_4$, NH_4Cl).

Stackerberg, Zeit. physik. Chem. 20, 337, 1896 (Влияние давлений до 500 ат на растворимость в воде NaCl, NH_4Cl и квасцов).

ГЛАВА XIV

ТЕМПЕРАТУРА — ДАВЛЕНИЕ — ОБЪЕМ И СООТНОШЕНИЕ ФАЗ ДЛЯ ВОДЫ

Содержание

Таблица 1 — XIV. Равновесие между двумя твердыми фазами . 194
» 2 — XIV. Кривые плавления 195
» 3 — XIV. Тройные точки 195
» 4 — XIV. Удельный объем жидкой воды при температуре от 0 до 350° С и давлении от 1 до 1000 бар 196
» 5 — XIV. Удельный объем жидкой воды при температуре от —20 до 100° С и давлении от 1 до 12000 бар 197
» 6 — XIV. Удельный объем жидкой воды при температуре 25° С и давлении от 1 до 12 000 бар . . 198
» 7 — XIV. Удельный объем жидкой воды при температуре от 25 до 85° С и давлении в 1, 500 и 1000 бар 198
» 8 — XIV. Кривая насыщения жидкость — пар; теплота испарения 198
» 9 — XIV. Удельный объем водяного пара при температуре от 100 до 650° С и давлении от 1 до 2000 бар 199
» 10 — XIV. Удельный объем водяного пара при температуре от 700 до 1200° С и давлении от 50 до 4000 бар 200
» 11 — XIV. Теплоемкость воды, освобожденной от воздуха 200

ВВЕДЕНИЕ

Данные для удельного объема представлены не в одной сборной, а в отдельных таблицах, так как не все они обладают одинаковой точностью. Для того чтобы отразить результаты в одной сборной таблице, потребовалось бы определить статистические возможности для каждой группы данных, что в настоящее время явилось бы произвольной и ненадежной процедурой. Кроме того, ни одна группа данных не может существовать сама по себе, т. е. обладать единообразной точностью, а изменение в ошибке опыта с изменением температуры и давления может иногда происходить незаметно. Поэтому поправочные коэфициенты, выработанные для небольшого отрезка кривой, не могут быть надежно экстраполированы на больших участках.

В этой главе температура выражена в градусах Цельсия, давление — в барах, а объемы или изменения объема — в кубических сантиметрах на грамм. Хотя как будто бы не существует полного единообразия в употреблении крупных единиц давления, в этой главе в качестве логической метрической единицы давления избран бар (10^6 дин $\cdot$ см$^{-2}$). Соотношения между различными единицами давления следующие:

Единицы давления	Бары	Нормальные атмосферы	кг/см^2
1 бар (10^6 дин/см^2)	1	0,986924	1,019716
1 нормальная атмосфера	1,013249	1	1,033226
1 кг/см^2	0,980665	0,967842	1

«Атмосфера» представляет собой не совсем ясную единицу: нормальная атмосфера, ат, относится к давлению 76 см ртути при 0° С и нормальной силе тяжести ($\delta = 13{,}59\,509$ г $\cdot$ см$^{-3}$; $g_{45} = 980{,}665$ см $\cdot$ сек$^{-2}$). Международная комиссия мер и весов приняла в 1927 г. условную константу для ат, которая больше, чем вышеприведенная единица, на 1 дину $\cdot$ см$^{-2}$.

ΔV обозначает изменение объема в см^3/г при температурах и давлениях, указанных для изменения фаз, приведенного в заголовке таблицы слева направо. Например, для перехода лед II — лед I ΔV положительно и поэтому выражает увеличение объема при превращении льда II в лед I на величину, установленную для соответствующих температур и давлений. С другой стороны, лед I плавится с уменьшением в объеме, и в таблице лед I — жикость даны отрицательные величины ΔV.

Данные для соотношения фаз: твердая — твердая и жидкая — твердая взяты у Бриджмена [2—6]; изменения вызваны исправлением типографских ошибок, которые, к сожалению, были внесены в I. C. T.

Удельные объемы жидкой воды при давлениях до 350 бар были вычислены из данных Смиса и Кейеса [11]. Данные для объема жидкой воды при давлении от 500 до 12 000 бар табл. 5 — XIV согласованы с данными Бриджмена 1912 г., а для табл. 6 — XIV — с пределами сжатия при 25° С по данным Адамса. Среднее отклонение этой таблицы от данных Бриджмена 1935 г. для пределов давления от 1500 до 3500 бар равно приблизительно 2 единицам в последней десятичной цифре. Для давлений более 3500 бар отклонение увеличивается до 1—3 единиц в третьей десятичной цифре, причем данные 1935 г. дают бо́льшие удельные объемы, т. е. меньшее сжатие при более высоких давлениях. Данные Бриджмена 1931 г. при 50° отклоняются в среднем приблизительно на 5 единиц в четвертой десятичной цифре, но здесь также имеется подобная тенденция; при 0° отклонение несколько варьирует. Измерения 1931 и 1935 гг. производились в сильфонных пьезометрах, которые возможно отчасти искажались под давлением.

Сжатия при низком давлении, $\Delta V/V_0$, табл. 5 — XIV слишком высоки, если судить по данным Геофизической лаборатории, приведенным в табл. 6 — XIV и 7 — XIV. Данные табл. 7 — XIV взяты из результатов, полученных Р. Э. Джибсоном и основанных на средней величине сжимаемости кварцевого стекла, равной $27{,}6 \times 10^{-7}$ на бар в интервале давлений от 1 до 1000 бар.

Соотношения $T — p — V$ вдоль кривой насыщения жидкость — пар и объемы пара при низком давлении и температуре взяты из данных M. I. T. [8, 9, 11]. Исходные данные для объема пара при более высоких давлениях и температурах обсуждаются в работе Горансона [7]. Величины табл. 10—XIV могут быть выражены уравнением

$$p = \frac{4{,}619\,(273{,}1 + t)}{V - 1{,}9} \exp \frac{-1{,}08 \cdot 10^5}{V\,(273{,}1 + t)^{3/2}},$$

где t — температура в градусах Цельсия, p — давление в барах, а V — удельный объем в см³/г.

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ XIV

1. Adams, Journ. Am. Chem. Soc. 53, 3780, 1931.
2. Bridgman, Proc. Am. Acad. 47, 441, 1912.
3. Bridgman, там же 48, 309, 1912.
4. Bridgman, Journ. Chem. Phys. 5, 964, 1937.
5. Bridgman, там же 3, 597, 1935.
6. Bridgman, Proc. Am. Acad. 66, 219, 1931.
7. Goranson, Am. Journ. Sc. 35-A, 71, 1938.
8. Keenan, Keyes, Thermodynamic Properties of Steam, New York, 1936.
9. Keyes, Smith, Gerry, Proc. Am. Acad. 70, 319, 1936.
10. Osborne, Stimson, Ginnings, Journ. Res. Nat. Bur. Stand. 28, 197, and 261, 1939.
11. Smith, Keyes, Proc. Am. Acad. 69, 285, 1934.

Таблица 1—XIV

Равновесие между двумя твердыми фазами [4]

Фазы	Температура, °С	Давление, бары	Изменение объема, см³/г
$Лед_{II}$—$лед_{I}$	—34,7	2129	0,2178
	—40	2080	0,2173
	—50	1990	0,2165
	—60	1898	0,2157
	—70	1805	0,2149
	—80	1715	0,2140
$Лед_{III}$—$лед_{I}$	—22	2116	0,1818
	—30	2115	0,1919
	—34,7	2129	0,1963
	(—40)	2137	(0,1992)
	(—50)	2119	(0,2023)
	(—60)	2077	(0,2049)
$Лед_{II}$—$лед_{III}$	—24,3	3443	0,0145
	—25	3306	0,0148
	—28	2855	0,0164
	—31	2482	0,0179
	—34,7	2129	0,0215
$Лед_{V}$—$лед_{II}$	—24,3	3443	0,0401
	—25	3502	0,0401
	—28	3727	0,0401
	—31	3933	0,0401
	—34	4120	0,0401
$Лед_{V}$—$лед_{III}$	—17	3463	0,0547
	—20	3455	0,0547
	—24,3	3443	0,0546
	(—30)	3428	(0,0545)
$Лед_{VI}$—$лед_{V}$	0,16	6057	0,0389
	— 5,0	6255	0,0387
	—10	6252	0,0385
	—20	6243	0,0381
$Лед^{*}_{VII}$—$лед_{VI}$	81,6	21970	0,0580
	60	21960	0,0576
	40	21920	0,0573
	20	21820	0,0570
	0	21580	0,0567
	—20	21130	—
	—40	20600	—
	—60	19980	—
	—80	19300	—

* При p=49 000 бар и комнатной температуре удельный объем $льда_{VII}$ около 0,60 см³/г.

Таблица 2—XIV

Кривые плавления (4)

Температура, °С	Давление, бары	Изменение объема, см³/г	Температура, °С	Давление, бары	Изменение объема, см³/г
$Лед_I$ — жидкость			$Лед_{VI}$ — жидкость		
0	1	—0,0900	81,6	21 968	0,0330
— 5	599	—0,1016	70	18 634	0,040
—10	1109	—0,1122	60	16 280	0,046
—15	1560	—0,1218	50	14 152	0,0522
—20	1933	—0,1313	40	12 150	0,0590
—22	2075	—0,1352	30	10 386	0,0663
			20	8 827	0,0751
			10	7 493	0,0844
			0,16	6 258	0,0916
			(—10)	5 179	(0,0960)
$Лед_{III}$ — жидкость			$Лед_{VII}$ — жидкость		
—17	3463	0,0241	192,3	39 230	0,0910
—18,5	2855	0,0301	182,5	37 270	0,0879
—20	2462	0,0371	172,1	35 300	0,0847
—22	2075	0,0466	161,1	33 340	0,0817
			149,5	31 380	0,0789
			137,1	29 420	0,0763
			124,1	27 460	0,0738
			110,3	25 500	0,0715
			95,3	23 540	0,0694
			81,6	21 968	0,0674
$Лед_V$ — жидкость					
0,16	6258	0,0527			
— 5	5336	0,0603			
—10	4424	0,0679			
—15	3727	0,0754			
—17	3463	0,0788			

Таблица 3—XIV

Тройные точки (4)

Температура, °С	Давление, бары	Фазы
—34,7	2129	$Лед_I$ — $лед_{II}$ — $лед_{III}$
—24,3	3443	$Лед_{II}$ — $лед_{III}$ — $лед_V$
—22,0	2075	Жидкая — $лед_I$ — $лед_{III}$
—17,0	3463	Жидкая — $лед_{III}$ — $лед_V$
0,0075	0,0061	Пар — Жидкая — $лед_I$
0,16	6258	Жидкая — $лед_V$ — $лед_{VI}$
81,6	21970	Жидкая — $лед_{VI}$ — $лед_{VII}$

Таблица 4—XIV

Удельный объем жидкой воды ($см^3/г$) при температуре от 0 до 350°С и давлении от 1 до 1000 бар

Давление, бары	Температура, °С										
	0	20	40	60	80	100	150	200	250	300	350
1	1,00018	1,00200	1,00787	1,01699	1,02890	1,04338	—	—	—	—	—
50	0,99797	0,99983	1,00569	1,01475	1,02655	1,04086	1,08759	1,15309	1,24933	—	—
100	0,99578	0,99767	1,00351	1,01251	1,02421	1,03836	1,08438	1,14830	1,24065	1,39705	—
150	0,99363	0,99555	1,00137	1,01031	1,02191	1,03591	1,08123	1,14368	1,23252	1,37713	—
200	0,99152	0,99347	0,99928	1,00816	1,01965	1,03350	1,07816	1,13921	1,22488	1,35992	1,66659
250	0,98946	0,99144	0,99722	1,00604	1,01743	1,03114	1,07517	1,13490	1,21770	1,34476	1,60116
300	0,98742	0,98944	0,99520	1,00397	1,01526	1,02883	1,07225	1,13073	1,21092	1,33126	1,55531
350	0,98546	0,98748	0,99323	1,00193	1,01313	1,02656	1,06939	1,12670	1,20451	1,31911	1,51936
500	—	—	0,98729	0,99639	1,00779	—	—	—	—	—	—
1000	—	—	0,96932	0,97841	0,98930	—	—	—	—	—	—

Таблица 5—XIV

Удельный объем жидкой воды ($см^3/г$) при температуре от —20 до 100 °С и давлении от 1 до 12 000 бар

Давление, бары	Температура, °С												
	—20	—15	—10	—5	0	10	20	30	40	50	60	80	100
1	—	—	1,0019	1,0008	1,0002	1,0003	1,0018	1,0043	1,0078	1,0120	1,0170	1,0289	1,0433
500	—	—	0,9793	0,9776	0,9769	0,9784	0,9807	0,9835	0,9872	0,9915	0,9964	1,0073	1,0194
1000	—	—	0,9595	0,9581	0,9576	0,9600	0,9628	0,9661	0,9698	0,9741	0,9789	0,9894	1,0005
1500	—	0,9396	0,9408	0,9400	0,9403	0,9432	0,9464	0,9499	0,9538	0,9579	0,9625	0,9725	0,9832
2000	0,9218	0,9225	0,9233	0,9243	0,9251	0,9284	0,9319	0,9355	0,9395	0,9437	0,9481	0,9576	0,9677
2500	0,9074	0,9083	0,9093	0,9187	0,9123	0,9157	0,9193	0,9210	0,9269	0,9310	0,9353	0,9447	0,9546
3000	0,8952	0,8961	0,8973	0,8986	0,9004	0,9039	0,9076	0,9094	0,9153	0,9194	0,9236	0,9323	0,9413
3500	—	0,8852	0,8864	0,8876	0,8895	0,8931	0,8967	0,8985	0,9044	0,9083	0,9125	0,9213	0,9302
4000	—	0,8754	0,8761	0,8773	0,8794	0,8830	0,8867	0,8884	0,8943	0,8983	0,9024	0,9110	0,9200
5000	—	—	0,8585	0,8596	0,8617	0,8652	0,8688	0,8705	0,8864	0,8803	0,8843	0,8925	0,9009
6000	—	—	—	0,8449	0,8465	0,8493	0,8530	0,8549	0,8608	0,8647	0,8686	0,8765	0,8845
7000	—	—	—	—	—	0,8352	0,8388	0,8409	0,8569	0,8508	0,8548	0,8624	0,8697
8000	—	—	—	—	—	—	0,8258	0,8283	0,8343	0,8382	0,8422	0,8496	0,8569
9000	—	—	—	—	—	—	0,8143	0,8183	0,8232	0,8272	0,8310	0,8384	0,8455
10 000	—	—	—	—	—	—	0,8042	0,8090	0,8132	0,8171	0,8209	0,8283	0,8354
11 000	—	—	—	—	—	—	—	—	0,8038	0,8077	0,8115	0,8188	0,8258
12 000	—	—	—	—	—	—	—	—	0,7947	0,7986	0,8024	0,8096	0,8163

Таблица 6—XIV

Удельный объем жидкой воды ($см^3/г$) при температуре 25°С и давлении от 1 до 12 000 бар [1]

Давление, бары	Удельный объем, $см^3/г$	Давление, бары	Удельный объем, $см^3/г$
1	1,0029	6000	0,8540
1000	0,9635	7000	0,8402
1500	0,9473	8000	0,8278
2000	0,9328	9000	0,8165
3000	0,9081	10000	0,8059
4000	0,8874	11000	(0,7934)
5000	0,8695	12000	(0,7876)

Таблица 7—XIV

Удельный объем жидкой воды ($см^3/г$) при температуре от 25 до 85°С и давлении в 1, 500 и 1000 бар

Температура, °С	Давление, бары		
	1	500	1000
25	1,00293	0,98185	0,96245
35	1,00598	0,98519	0,96705
45	1,00985	0,98914	0,97104
55	1,01448	0,99367	0,97547
65	1,01979	0,99868	0,98030
75	1,02576	(1,00427)	(0,98550)
85	1,03237	1,01020	0,99107

Таблица 8—XIV

Кривая насыщения жидкость—пар; теплота испарения

Температура, °С	Давление P, бары	Удельный объем, $см^3/г$		Теплота испарения [10], малые калории
		V жидкости	V пара	
0	0,0061	1,00023	206300,0	598,041
10	0,0123	1,00056	106410,0	592,436
20	0,0234	1,00204	57824,0	586,808
30	0,0424	1,00453	32922,0	581,153
40	0,0737	1,00791	19543,0	575,458
50	0,1233	1,01210	12045,0	569,710
60	0,1992	1,01702	7678,3	563,902
70	0,3116	1,02264	5046,3	558,015
80	0,4735	1,02892	3409,2	552,033
90	0,7011	1,03584	2361,5	545,939
100	1,0132	1,04338	1673,2	539,707
120	1,9855	1,06032	891,65	526,749
140	3,6141	1,07982	508,53	512,850
160	6,182	1,10209	306,76	498,078
180	10,028	1,12747	193,80	481,880
200	15,552	1,15652	127,18	463,067
220	23,197	1,19000	86,070	434,292
240	33,474	1,22908	59,684	422,217
260	46,94	1,27551	42,149	397,352
280	64,19	1,33208	30,122	368,959
300	85,92	1,40357	21,625	335,856
320	112,85	1,49924	15,438	295,948
340	146,04	1,64085	10,746	245,658
360	186,72	1,90662	6,984	172,085
374,11*	221,06		3,1975	0

*Критическая температура

Таблица 9—XIV

Удельный объем водяного пара ($см^3/г$) при температуре от 100 до 650°С и давлении от 1 до 2000 бар

Давление, бары	Температура, °С											
	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
1	1695,0	1936,2	2170	2406	2639	2871	3102	3333	3564	3794	4025	—
5	—	—	424,6	474,5	522,8	570,2	617,4	663,8	710,6	756,9	805	—
10	—	—	205,8	232,8	258,1	282,5	306,6	330,2	353,9	377,3	401	—
25	—	—	—	86,07	99,0	109,8	120,2	130,0	139,8	149,5	159,4	—
50	—	—	—	—	45,37	51,98	57,85	63,24	68,48	73,54	78,7	—
100	—	—	—	—	—	22,46	27,39	29,72	32,73	35,54	38,25	40,91
150	—	—	—	—	—	11,61	15,67	18,45	20,76	22,84	24,8	26,68
200	—	—	—	—	—	—	10,00	12,71	14,75	16,48	18,0	19,58
250	—	—	—	—	—	—	6,27	9,19	11,10	12,65	14,0	15,30
300	—	—	—	—	—	—	3,05	6,75	8,65	10,09	13,26	12,45
350	—	—	—	—	—	—	1,99	4,97	6,90	8,28	9,37	10,42
400	—	—	—	—	—	—	(1,90)	3,69	5,59	6,91	7,89	8,89
500	—	—	—	—	—	—	(1,70)	—	(3,63)	—	—	(6,25)
750	—	—	—	—	—	—	(1,60)	—	(2,48)	—	—	—
1000	—	—	—	—	—	—	(1,41)	—	(2,18)	—	—	—
1500	—	—	—	—	—	—	(1,36)	—	(1,87)	—	—	—
2000	—	—	—	—	—	—	(1,31)	—	(1,72)	—	—	—

Таблица 10—XIV

Удельный объем водяного пара ($см^3/г$) при температуре от 700 до 1200°С и давлении от 50 до 4000 бар [7]

Давление, бары	Температура, °С					
	700	800	900	1000	1100	1200
50	—	97,98	105,65	117,10	126,65	136,08
100	43,5	48,43	53,43	58,37	63,22	68,04
200	21,03	23,65	26,38	29,40	31,54	34,07
300	13,5	15,45	17,37	19,22	21,01	22,76
400	9,8	11,36	12,90	14,35	15,76	17,11
500	—	8,91	10,24	11,45	12,61	13,75
600	—	7,34	8,49	9,53	10,54	11,51
700	—	6,22	7,23	8,17	9,07	9,92
800	—	5,41	6,32	7,18	8,01	8,74
900	—	4,81	5,63	6,40	7,26	7,83
1000	—	4,34	5,09	5,80	6,57	7,10
1100	-	3,99	4,67	5,32	6,03	6,52
1200	—	3,70	4,32	4,92	5,57	6,03
1300	—	3,47	4,04	4,59	5,18	5,63
1400	—	3,29	3,81	4,32	4,85	5,28
1500	—	3,14	3,62	4,09	4,57	4,99
1600	—	3,02	3,45	3,90	4,33	4,74
1700	—	2,92	3,31	3,73	4,13	4,52
1800	—	2,83	3,20	3,59	3,96	4,34
1900	—	2,76	3,10	3,46	3,81	4,16
2000	—	2,69	3,01	3,35	3,68	4,02
2500	—	2,47	2,70	2,95	3,21	3,47
3000	—	2,34	2,52	2,72	2,92	3,14
3500	—	2,26	2,40	2,56	2,73	2,91
4000	—	2,21	2,33	2,46	2,60	2,75

Таблица 11—XIV

Теплоемкость воды, освобожденной от воздуха (1 ат, [10])

Температура, °С	Теплоемкость	Температура, °С	Теплоемкость
	мал. кал.$_{20}$ · градус$^{-1}$		мал. кал.$_{20}$ · градус$^{-1}$
0	1,00857	60	1,00061
10	1,00247	70	1,00185
20	1,00000	80	1,00348
30	0,99919	90	1,00556
40	0,99921	100	1,00817
50	0,99973		

ГЛАВА XV

ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕЙ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Содержание

Таблица 1 — XV. Состав и давление пара для насыщенных растворов 203
» 2 — XV. Свойства одного грамма насыщенного раствора ($KCl + H_2O$) 206
» 3 — XV. Кривые точек затвердевания для трехфазных систем силикат — вода 207
» 4 — XV. Растворимость воды в силикатных расплавах при высоких температурах и давлениях (двухфазное равновесие) 208

ВВЕДЕНИЕ

Эта глава содержит ограниченное количество сведений, частично еще не опубликованных, относительно растворимости и давления пара в водных растворах при температурах свыше 100° С. Многочисленные данные, существующие для температур ниже 100° С, не приводятся, так как они исчерпывающе собраны в таблицах других работ (Int. Crit. Tables, vol. IV; Handbook of chemistry and physics, Chemical Rubber Publishing Co).

Определения растворимости от криогидратной точки до тройной точки соли производились для азотнокислого натрия и азотнокислого калия (т. пл. соответственно 308 и 334° С) и для окиси бора (т. пл. 450° С), но для солей с более высокими температурами плавления были исследованы лишь части некоторых двойных систем с водой в качестве одного из компонентов.

Применялись следующие экспериментальные методы в порядке уменьшающейся точности:

1) нагревание воды и избытка соли в закрытой термостатной системе с приспособлением, позволяющим взять часть насыщенного раствора для анализа [18, 20];

2) нагревание определенных навесок соли и воды в закрытой стеклянной системе с наблюдением температуры, при которой последняя порция соли переходит в раствор [13, 14];

3) для стеклообразующих растворимых веществ закалка пробы стекла после обработки с избытком воды в закрытой бомбе [6, 16];

4) наблюдение прерывности наклона кривых давление — объем, связанной с появлением твердой фазы во время изотермического расширения системы известного общего состава [12];

5) наблюдение проводимости растворов слабо растворимых солей [15].

Экспериментальные методы, применявшиеся для определения давления пара при температурах, превышающих нормальную точку кипения, в порядке убывающей точности таковы:

1) определения давлений и температур кипения по изотермическим кривым давление — объем; объем изменялся при помощи ртутного компрессора; давление измерялось манометром со свободным поршнем [3, 12];

2) определение давления в системах определенного объема при помощи манометра Бурдона [20];

3) косвенное определение давления в опытах с закалкой; количество воды в парообразном состоянии вычислялось путем вычитания количества воды в закаленном образце из общего количества в бомбе или в запаянном образце известного объема; давление тогда может быть приблизительно вычислено при помощи уравнения состояния, или из таблиц удельного объема пара [16], или измерено непосредственно [6].

В таблицах этой главы даны опытные величины с добавлением в некоторых случаях приблизительных величин (обозначенных α), полученных экстраполяцией сглаженных кривых к точкам плавления (точнее, тройным точкам) солей. Эти, полученные интерполяцией, величины в большинстве случаев представляют собой среднее из данных, нанесенных несколькими методами.

В табл. 1 — XV и 3 — XV дан состав жидкости, находящейся при обозначенной температуре в равновесии со своим паром и с указанной твердой фазой, и давление этого пара. Для трехфазного равновесия с двумя компонентами (в данном случае — соль и вода) давление пара и состав расплава или раствора являются функциями только температуры; имеется лишь одна независимая переменная. Парообразная фаза для всех систем, вошедших в таблицы, весьма приближается к чистой воде. В табл. 1 — XV состав выражен при помощи количества соли в растворе. В табл. 3 — XV жидкая фаза является главным образом силикатным сплавом с определенным количеством воды. В табл. 4 — XV твердая фаза отсутствует; равновесие существует между водяным паром и жидкостью определенного состава; этот состав зависит как от давления, так и от температуры.

Скрытая теплота испарения ΔH одного грамма насыщенного раствора ($KCl + H_2O$), указанная в табл. 2—XV, вычислена из уравнения Клаузиуса — Клапейрона, $\Delta H = T\Delta V(dp/dT)$, где ΔV — изменение удельного объема, а dp/dT — измеренное изменение давления пара насыщенного раствора с изменением температуры. Процесс испарения сопровождается выпадением некоторого количества соли из раствора; для сильно концентрированных растворов (вблизи плавления или тройной точки соли) теплота, полученная при кристаллизации избытка соли, превышает теплоту, требуемую для испарения соответствующего количества воды; отсюда отрицательный знак для ΔH при 600° и при более высоких температурах.

Таблица 1—XV

Состав и давление пара для насыщенных растворов

(трехфазное равновесие)

Твердая фаза	Температура ликвидуса, °С	Количество соли в насыщенном растворе		Давление пара, ат	Ссылка
		молярная доля, %	весовая доля, %		
H_3BO_3	65,2	2,26 (B_2O_3)	8,20 (B_2O_3)		14
	107,8	5,28	17,72		
	151,5	12,24	35,03		
	170,1	24,58	55,75		
	159,6	37,25	69,65		
HBO_2 III	164	40,30 (B_2O_3)	72,30 (B_2O_3)		
	176,1	50,00	79,45		
	170	57,14	83,75		
	159,5	62,69	86,66		
HBO_2 II	172	29,98 (B_2O_3)	62,34 (B_2O_3)		
	192,5	39,13	71,31		
	200,9	50,00	79,45		
	194,8	59,89	85,23		
HBO_2 I	190	25,00 (B_2O_3)	56,30 (B_2O_3)		
	225	37,25	69,65		
	236	50,00	79,45		
	230	59,89	85,23		
B_2O_3	233	54,05	81,97		
	273	59,89	85,23		
	303	64,74	87,65		
	363	75,78	92,36		
	392	84,01	95,31		
	450(т. пл.)	100	100		

Твердая фаза	Температура ликвидуса, °С	Количество соли в насыщенном растворе		Давление пара, ат	Ссылка
		молярная доля, %	весовая доля, %		
$Ca(NO_3)_2$ (164,1)*	55	28,1	78,16		2,12
	100	28,45	78,43		
	300	α 36,6	α 84		
	329,4	α 46		18,9	
	451,3	α 63		34,0	
	500	α 72,5	α 96		
	560(т. пл.)	100	100		
KBr (119,02)	103	13,8	51,5		4
	167	17,0	57,5		
	208	19,1	61,1		
	251	22,2	65,2		
	301	23,8	67,7		
	359	26,8	70,7		
	398	28,4	72,4		
	421	29,4	73,3		
	500	α 39,9	α 81,5		
	600	α 56,4	α 89,6		
	700	α 85,5	α 97,5		
	748 (т. пл.)	100	100		
KCl (74,56)	60	10,0	31,41	1,00	4,12
	108	12,3	36,75	8,58	
	150	14,1	40,48		1,3
	190	α 16		8,58	
	230	17,9		14,5	
	250	18,75		24,42	
	300	20,9	52,24	48,65	
	350	α 25,4		83,07	
	400	α 29,5		125,59	
	450	α 34,6		168,84	
	500	α 40	α 73,1	204,86	
	550	α 47	σ 78	223,74	
	565			224,5 (макс.)	
	600	α 54	α 83	220	
	645			197 ± 5	
	700	α 80		α 133	
	770 (т. пл)	100		0	
KI (166,02)	0	12,18			4,12,13
	50	15,37			
	100	18,31			
	150	21,15			
	200	24,1			
	240	26,9			
	301	30,6	80,2		
	306,3			39,91	
	351	34,9	83,2		
	388			73,9	
	402	40,7	86,3		
	450	53,4	88,9		
	476,5			92,1 (макс.)	
	506,5			90,0	
	513			87,5	
	538			82,03	
	550	α 64			
	563			74,7	
	650	α 89			
	690 (т. пл.)	100			

* Цифры в скобках являются молекулярным весом растворенного вещества.

α отмечены величины, полученные интерполяцией.

Твердая фаза	Температура ликвидуса, °С	Количество соли в насыщенном растворе		Давление пара, ат	Ссылка
		молярная доля, %	весовая доля, %		
αKNO_3	120	α37,5		1,095	4,11
(101,11) инконгруэнтная точка	130	α42,6		1,41	
	140	α44,0		1,78	
	150	α46,2		2,20	
	180	α53,4		3,80	
	200	α59,0		5,02	
	220	α63,5		6,27	
	250	α71,0		7,80	
	260	α73		7,87	
	265	α81		7,88 (макс.)	
	270	α82,6		7,86	
	280	α85,7		7,56	
	300	α89,2		6,24	
	320	α95,2		3,518	
	334(т. пл.)	100			
NaBr	107	17,1	54,2		5,12
(102,91)	155	18,6	56,5		
	199		58,1		
	248		60,8		
	293			35,4	
	396			92,6	
	460			131,6	
	493,8			153,3	
	567,0			174,9	
	575			α 175 (макс.)	
	600	α62		α 170,5	
	678			109,7	
	700	α83		α84	
	755(т. пл.)	100			
Na_2CO_3	50	7,35	32,0		12,20
(106,0)	75,5	7,11	31,0		
	100,0	6,98	30,7		
	112	7,04	30,8	1,27	
	121	6,72	29,8	1,69	
	176,5	5,5	25,5	8,43	
	183,6			9,72	
	200	4,9	23,3		
	225,8	4,2	20,7	24,37	
	247,3			35,57	
	275	2,5	13,2		
	278,2			61,0	
	300	0,5	8,4		
	348	0,1	0,0		
	357			179	
	368,5			202,7	
NaCl.....	107,0		28,39	1,0	4,9,12
(58,45)	180	12,19			
	183,0			7,27	
	254,6			27,51	
	299,3			56,03	
	301	15,5	37,3		
	327,3			78,5	
	334	17,37	40,6		
	354,3			106,4	
	356	18,62	42,6		
	385,7			145,0	
	409	21,8	47,5		

Твердая фаза	Температура ликвидуса, °С	Количество соли в насыщенном растворе		Давление пара, ат	Ссылка
		молярная доля, %	весовая доля, %		
NaCl ..... (58,45)	410,0			178,9	
	442,5			230,1	
	455	24,5	51,3		
	467,5			269,0	
	550,5	α 33		370,1	
	600	α 41		388,7	
	604			α 389 (макс.)	
	646,2			368,5	
	700	α 65			
	750	α 81			
	804(т. пл.)	100			
NaI ..... (149,92)	80	26,2			12,19
	100	26,6			
	140	28,8			
	185,0			2,40	
	200	α 35			
	240,8			8,51	
	300,2	α 45,4		17,58	
	342			26,36	
	372			34,63	
	400	α 57		α 43	
	444,0			61,2	
	500	α 70,5		α 90	
	540			α 101 (макс.)	
	600	α 88,5		α 71	
	650(т. пл.)				
Na_2SO_4 ..... (142,05)	150	5,05	29,6	4,20	4,12,18
	200	5,4		13,74	10
	220	5,4		20,58	
	240	5,6	30,1	29,55	
	270	4,83	28,6	50,0	
	300	3,0	19,7	81,3	
	325	1,1	7,8	116,3	
	350	0,3		161,5	
	355,5			172,3	
	370			207,3	

Таблица 2—XV

Свойства одного грамма насыщенного раствора ($KCl + H_2O$) [3]

Температура, °С	Вес KCl на 1 г раствора, г	Удельный объем, $см^3/г$	Изменение объема при испарении, $см^3/г$	Скрытая теплота испарения, мал. калории
250	0,493	0,817	44,08	211
300	0,540	0,813	20,68	169
350	0,587	0,805	11,13	132
400	0,634	0,797	6,701	96
450	0,682	0,786	4,551	66
500	0,730	0,772	3,424	37
550	0,779	0,758	2,807	9
600	0,829		2,445	− 17
770,3	1,000			-74 ± 12

Таблица 3—XV

Кривые точек затвердевания для трехфазных систем силикат — вода

Твердая фаза	Температура, °C	Молярная доля H_2O, %	Давление, ат	Ссылка
$K_2SiO_3 \cdot H_2O$	200	72,7		
	285	64,8	4,3	16
	360	55,5	6,1	
$K_2SiO_3 \cdot 0{,}5H_2O$	380	53,7	7,4	
	420	51,2	10,7	
	520	42,0	10,8	
K_2SiO_3	942	14,2	1,0	
	976	0,0	0,0	
$K_2Si_2O_5 \cdot H_2O$	285	76,0	29,5	16
	380	65,0	39,0	
$K_2Si_2O_5$	420	61,9	37,7	
	500	56,1	66,1	
	600	52,0	73,9	
	1034	7,0	1,0	
	1041	0,0	0,0	
$Na_2Si_2O_5$	874	0	0	17
	800		44	
	750		112	
(Давления, интерполированные графически)		% H_2O в жидкости по весу		
$NaAlSi_3O_8$	1115	0	0	
(Альбит)	1100	0,5	67 (бар)	7
	1050	1,75	210	
	1000	3,1	350	
	950	4,5	570	
	900	6,1	920	
	850	7,9	1700	
	825	9,2	2660	
$KAlSi_3O_8$	950		2600 (бар)	7
(Ортоклаз)	940	7	3500	
При давлениях ниже 2600 бар ортоклаз плавится инконгруэнтно в лейцит и жидкость				
Гранит, Стон-Маунтен	1050	0	0 (бар)	8
(Температуры ликвидуса)	1035	1	140	
	1005	2	260	
	963	3	400	
	908	4	550	
	840	5	730	
	750	6	930	
	600	7	1100	

Таблица 4—XV

Растворимость воды в силикатных расплавах при высоких температурах и давлениях

(Двухфазное равновесие; температура в °С; [6,7,8])

Силикатный расплав	Давление, бары	Процент воды по весу при температурах				
		800°	900°	1000°	1100°	1200°
Альбит расплавленный.. ($NaAlSi_3O_8$)	500		4,03	3,61	3,21	2,78
	1000		6,01	5,49	4,98	4,44
	1500		7,19	6,64	6,10	5,54
	2000		7,97	7,42	6,88	6,32
	2500		8,52	7,99	7,45	6,91
	3000		8,94	8,42	7,88	7,36
	3500		9,26	8,75	8,22	7,73
Ортоклаз расплавленный..... ($KAlSi_3O_8$)	1500			5,1		
	2000			5,7		
	2500			6,2		
	3000			6,5		
	3500			6,8		
	4000			7,1		
Гранит, Стон-Маунтен, расплавленный	300		2,73			
	500		3,76			
	1000	6,06	5,76	5,46	5,15	4,85
	1500		7,20			
	2000		8,14			
	2500		8,58			
	3000		8,91			
	3500		9,15			
	4000		9,35			

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ XV

1. Акумов и Васильев, Журн. Хим. пром. СССР VI, 8, № 17, стр. 17—23, 1931.
2. Bassett, Taylor, Journ Chem. Soc. 101, I, C. T. IV., p. 230.
3. Benedict, Journ. Geol. 47, 252—276, 1939.
4. Benrath, Gjedebo, Schiffers, Wunderlich. Zeit. für anorg. und allgem. Chem. 231, 285—297, 1937.
5. Дистанов, Журн. общей химии, СССР, 1, 676—680, 1937.
6. Goranson, Am. Journ. Sci. 22, 481—502, 1931.
7. Goranson, Am. Journ. Sci. 35A, 71, 1938; Trans, Am. Geophys. Un on. p. 257, 1936.
8. Goranson, Am. Journ. Sci. 23, 227, 1932.
9. International Critical Tables, III, p. 105; I. C. T., IV., p. 235, 1928.
10. I. C. T., IV., p. 236, 1928.
11. I. C. T., III. p. 373, 1928.
12. Keevil, Неопубликованные данные.
13. Kracek, Journ. Phys. Chem. 35, 947, 1931 (включает обзор).
14. Kracek, Morey, Merwin, Am. Journ. Sci. 35A, 143—171, 1938.
15. Melcher, Journ. Am. Chem. Soc. 32, 50, 1910.
16. Morey, Fenner, Journ. Am. Chem. Soc. 39, 1173—1229, 1917.
17. Morey, Ingerson, Am. Journ. Sci. 35A, 217, 1928.
18. Schroeder, Gabriel, Partridge, Journ. Am. Chem. Soc. 57, 1539—1546, 1935.
19. Seidell, Solubilities, Van Nostrand, p. 654, 1919.
20. Waldeck, Lynn, Hall, Journ. Am. Chem. Soc. 54, 933, 1932 (включает обзор).

ГЛАВА XVI

ТЕПЛОЕМКОСТЬ; ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕНИЯ

Содержание

Таблица 1 — XVI. Теплоемкость минералов 214
» 2 — XVI. Теплоемкость горных пород 223
» 3 — XVI. Теплота превращения и теплота плавления . 225
» 4 — XVI. Теплоемкость газов 228

ВВЕДЕНИЕ

Теплоемкость минералов. В таблицах этой главы минералы классифицированы по первым элементам их химических формул; например, альбит ($NaAlSi_3O_8$) можно найти под натрием, а кальцит ($CaCO_3$) — под кальцием. Данные по теплоте выражены в абсолютных джоулях (1 джоуль = 0,23895 мал. кал., при 15° С). Истинные, или мгновенные, теплоемкости можно получить, измеряя количество тепла, необходимого для повышения температуры пробы на один градус или долю градуса.

Данные для многих веществ при низких температурах принадлежат главным образом к этому типу. При высоких температурах этот метод эксперимента труден вследствие больших потерь на излучение, так что в этом случае применяются другие приемы, а именно метод смесей. (См. *W. P. White*, The Modern Calorimeter, N. Y., 1928.) По этому методу данные получаются в виде средних теплоемкостей. Средняя теплоемкость обычно приводится для температурного интервала между 0° С (273,1° К) и комнатной (или некоторой более высокой) температурой. Однако измеренное количество тепла является разностью количества тепла в веществе при какой-либо повышенной температуре и при температуре калориметра. Для перевода этих количеств в истинные теплоемкости, значения средних теплоемкостей (при постоянном давлении) приводятся к уравнению вида

$$\bar{c}_p \Big|_{T_0}^{T} = a + b\,\frac{T_0 + T}{2} - \frac{c}{T_0 \cdot T}, \qquad (1)$$

где $\bar{c}_p$ — средняя теплоемкость при постоянном давлении в джоулях на грамм между T_0 и T по шкале Кельвина, а a, b и c — константы, которые следует определить для исследуемого материала. Так как $H(T) - H(T_0) = \bar{c}_p\,(T - T_0)$ и $\partial H/\partial T = c_p$, где H обозначает содержание тепла или энтальпию при указанной температуре, а c_p — истинную, или мгновенную, теплоемкость материала при T° К, то мы имеем

$$c_p = a + bT - cT^{-2}, \qquad (2)$$

так что после решения уравнения (1) значения констант a, b и c могут быть непосредственно подставлены в уравнение (2). Этот тип уравнения использован здесь вследствие простоты точно выраженной зависимости, на что указывают Майер и Келлей (Jour. Amer. Chem. Soc. 54. 3243, 1932). Оно удобно для применения его в качестве интерполяционной формулы при температурах выше 273° К (0° С).

Если нужно получить разность содержащихся количеств тепла, т. е. $H(T) - H(T_0)$, где $273° \text{ К} \leqslant T_0 < T$, — можно применить обратную процедуру, т. е. значения констант a, b и c, приведенные в таблицах, подставить в уравнение (1) и умножить его на $(T - T_0)$. Подобным же образом можно получить разность энтропий, $S(T) - S(T_0)$, подставляя те же значения констант в уравнение

$$S(T) - S(T_0) = a \ln(T/T_0) + b\,(T - T_0) - \frac{c}{2}\left[\frac{1}{T_0^2} - \frac{1}{T^2}\right]. \qquad (3)$$

В столбцах от 3 до 8-го включительно приведены истинные, или мгновенные, теплоемкости в джоулях на грамм для соответствующих температур (° С), указанных вверху столбцов. Столбцы 9, 10 и 11 содержат соответственно константы *a*, *b* и *c* уравнения (2). В столбце 12 даны отклонения уравнения от данных и диапазоны температур, для которых действительны уравнения. Последний столбец содержит ссылки.

Теплоемкость пород. Для средних теплоемкостей пород существуют некоторые экспериментальные данные, но они недостаточно надежны. Когда производятся такие определения, то вместе с тепловыми данными следует приводить как химический, так и минералогический состав породы, так как породы одинакового химического, но разного минералогического состава вообще будут обладать разными теплоемкостями. С другой стороны, когда минералогический состав известен, содержание теплоты и теплоемкость могут быть вычислены из содержания теплоты и теплоемкости слагающих породу минералов. Целесообразнее поэтому вместо накопления дальнейших данных для пород попытаться получить больше данных по теплоемкостям минералов. Конечно, имеются некоторые исключения из этого правила, как, например, для обсидианов и других стекловатых пород и аморфных веществ.

В таблице 2—XVI представлены некоторые данные по теплоемкости пород, вычисленные по теплоемкостям составляющих их минералов; они иллюстрируют колебания теплоемкости изверженных пород гораздо ярче, чем данные, полученные для самих пород.

Теплота превращения и теплота плавления. Метод определения истинных, или мгновенных, теплоемкостей, при возможности его применения, дает наилучшие данные по теплоте превращения и теплоте плавления. Такие данные имеются лишь для немногих случаев. Измерение разностей содержания тепла для получения средних теплоемкостей может также послужить для количественного определения теплоты превращения и теплоты плавления, при условии быстрого завершения этих процессов. Однако последний метод не так чувствителен, как первый.

Если обе исследуемые фазы могут существовать вместе при комнатной температуре, причем одна обязательно метастабильна, тогда диференциальные теплоты растворения дадут разницу в энтальпии при этой температуре, и если, кроме того, известна разность средних теплоемкостей обеих фаз между температурой растворения и температурой превращения, то можно вычислить теплоту превращения. Некоторые данные этого характера существуют для известных трудно кристаллизующихся силикатных соединений, но в этих случаях также нет уверенности в идентичности конечных продуктов в процессе растворения, из чего следует и ненадежность выведенных отсюда величин.

При известных условиях эти тепловые величины можно вычислить по другим данным. Например, по понижению точки замерзания в бинарном растворе мы имеем

$$\Delta h_1 = R \frac{\partial \ln \left(\frac{\gamma_1' \cdot N_1'}{\gamma_1'' \, N_1''} \right)}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)}, \qquad (4)$$

где Δh_1 обозначает теплоту в джоулях на граммолекулу (для $R = 8{,}315$), поглощенную компонентом 1 при переходе из начального

состояния (т. е. твердого) в бинарное состояние 1-го компонента (т. е. жидкое); γ_1 и N_1 являются соответственно коэфициентом активности и молярной долей компонента 1, причем состояние, к которому они применяются, обозначено штрихами (один штрих обозначает начальное состояние, два штриха — бинарное состояние этого компонента). T является абсолютной температурой. Если систему можно считать «идеальной», то $\gamma_1' = \gamma_1'' = 1$, и мы имеем

$$\Delta h_1 = \frac{R \ln \frac{N_1'}{N_1''}}{\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}} + \Delta \bar{c}_p (T_0 - T), \qquad (5)$$

где T_0 обозначает точку замерзания чистого компонента 1, а $\Delta \bar{c}_p = \bar{c}_p'' - \bar{c}_p'$ — разность средних теплоемкостей двух фаз, жидкой и твердой, компонента 1 между T_0 и T.

Если систему нельзя рассматривать как «идеальную» для любого определенного интервала температуры, тогда следует применять предельное значение, равное

$$\Delta h_1 = R \lim_{N_1' \to N_1'' \to 1} \frac{\partial \ln \frac{N_1'}{N_1''}}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)}. \qquad (6)$$

В этом последнем случае вычисленная теплота плавления будет в общем очень ненадежна вследствие неточности начальных значений производных.

Для систем, в которых не имеется твердого раствора, $N_1' = 1$.

Есть еще один источник неуверенности в этом последнем методе получения теплоты плавления. Приведенные выше уравнения предполагают известный подбор молярных весов компонентов для оценки их молярных долей (см. Adams, Chem. Rev., 19, 1, 1936, и Goranson, J. Chem. Phys., 5, 107, 1937). Если известно, что системы идеальны, тогда правильный выбор молярных весов даст для Δh уравнения (5) постоянную величину при изменении N_1'', если же этот выбор неправилен, то вычисляемые значения Δh будут меняться в зависимости от N_1''.

Системы, приближающиеся к идеальным, в общем являются исключениями, и поэтому нельзя делать таких априорных предположений. Однако изучение равновесных состояний силикатов показывает, что системы, смешивающиеся как в твердом, так и в жидком состоянии, приближаются к этим условиям идеальности и, если они смешиваются во всех пропорциях как в жидком, так и в твердом состоянии, их можно считать идеальными; примерами этого являются альбит — анортит и форстерит — фаялит.

Когда приходится пользоваться уравнением (6), т. е. в случаях неидеальности системы при любых определенных значениях N_1'', у нас вообще нет руководящих указаний для выбора молярных весов. Однако установлено, что эти молярные количества должны быть грубо сравнимы; например, для того чтобы вычислить величину Δh для карнегиита в системе карнегиит — анортит, сравнимую с величиной, вычисленной по системе карнегиит — калиофилит ($NaAlSiO_4 - KAlSiO_4$), молярные количества первой системы должны приниматься как $Na_2Al_2Si_2O_8 - CaAl_2Si_2O_8$. При этом условии, последняя система даст теплоту плавления карнегиита, согласующуюся с величиной, полученной из системы

карнегиит — калиофилит; кроме того, в этом случае теплота плавления, вычисленная для анортита, будет близка к величинам, вычисленным при использовании других систем.

В таблице 3 — XVI первый столбец содержит химический состав; второй и третий столбцы — происходящее изменение фазы; четвертый столбец — температуру изменения фазы в градусах Цельсия, а пятый — теплоту в джоулях на грамм, поглощенную при указанном изменении фазы. В шестом столбце указан метод вычисления этого изменения теплоты.

Теплоемкость газов и паров. В последние годы для вычисления теплоемкости по спектроскопическим данным были предложены методы, основанные на положениях статистической механики, и в настоящее время такого рода спектроскопические данные существуют для многих газов простого молекулярного состава. Эти методы обсуждались Джиауком (*Giauque*, J. Am. Chem. Soc. 52, 4808, 1930) и другими.

Теплоемкости (при постоянном давлении) газов и паров, приведенные в таблице 4 — XVI, по большей части вычислены по таким данным и поэтому применимы лишь к состояниям, приближающимся к состоянию идеального газа. Эти данные, вероятно, были бы применимы к горячим изверженным вулканическим газам.

Для идеальных газов теплоемкость не зависит от давления,

$$\frac{\partial c_p}{\partial p} = -T\left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2}\right)_p = 0,$$

так что данные действительны при всех давлениях, при которых вещества приближаются к определению идеального газа.

Во втором столбце таблицы приведены значения нормальной плотности газов, т. е. масса газа в граммах, приходящаяся на один нормальный литр (M/22,4141). Нормальным молекулярным объемом идеального газа является объем, занимаемый граммолекулой вещества в состоянии идеального газа при 0° C и нормальном атмосферном давлении. Если за нормальную атмосферу принять давление 760 мм ртутного столба при $g = 980{,}64$, то этот объем равен 22,4141 ± 0,0008 *л* (при $g = 980{,}665$ этот объем будет равен 22414,1 см^3).

В столбцах от 3 до 5 включительно представлены теплоемкости в джоулях на грамм для температур, выраженных в °C. В столбцах 6, 7 и 8 даны константы, входящие в уравнение. Для симметрии здесь приведено то же самое общее соотношение, с помощью которого выражались данные для минералов, хотя для газов и имеется несколько других, более подходящих выражений. Столбец 9 содержит диапазоны температур, охватываемые уравнением, а столбец 10 — ссылки.

Данные, выраженные таким образом (т. е. в джоулях на грамм), сильно меняются в зависимости от характера вещества, причем максимальная величина приблизительно в 200 раз больше минимальной. Однако эти отклонения станут гораздо меньшими, если данные, выраженные в джоулях на литр газа, привести к состоянию идеального газа при нормальном давлении и температуре T° K. Для этого нужно умножить данные теплоемкости на ρ_1, причем

$$\rho_1 = \frac{273{,}1 \cdot \rho_0}{T},$$

где ρ_0 обозначает величину, указанную в столбце 3, а T — температуру в градусах Кельвина. При составлении этой таблицы была использована таблица атомных весов 1935 г.

Таблица 1—XVI

Теплоемкость минералов

Соединение	Минерал	C_p (джоули на грамм) при температурах, °С						Константы для уравнения $Cp=a+bT-cT^{-2}$, дж/г; (T°К)			Ошибка, %; диапазон температур, °С	Ссылка
		—200°	0°	200°	400°	800°	1200°	a	10^3b	$10^{-5}c$		
2Ab·3An	Лабрадор		(0,82 при 60°)									
3Ab·2An	Андезин		0,70	0,97	1,07	1,18		0,991	0,20	0,255	±1; 0—900	18
	Стекло		0,70	0,99	1,09	1,21		1,016	0,206	0,278	1; 0—900	18
4Ab·1An*	Олигоклаз		(0,85 при 60°)									78*
Ag	Самородное серебро	0,146	0,233	0,244	0,256	0,279		0,217	0,058	0	1; 0—961	71
Ag	жидкое						0,32	0,318	0	0	3; 961—1300	71
AgCl	Кераргирит	0,251	0,354	0,408	0,462			0,280	0,271	0	2; 0—453	72
	жидкий							0,410	0	0	5; 453—533	72
Ag_3AsS_3	Прустит		(0,34 при 50°)									Основ.
Ag_2S	Акантит		0,32					0,317	0	0	5; 0—175	73
	Аргентит			0,37				0,368	0	0	5; 175—325	73
Ag_3SbS_3	Пираргирит		(0,32 при 50°)									Основ.
Al_2O_3	Корунд	0,069	0,72	1,00	1,10	1,19	1,26	1,067	0,140	0,289	4; 0—1700	1
	жидкий							1,53			2230	
Al_2SiO_5	Андалузит	0,152	0,77	1,03	1,11	1,165	1,20	1,136	0,050	0,281	3; 0—1300	2
	Кианит	0,077	0,70	1,00	1,10	1,20	1,27	$1,08_0$	$0,136_4$	0,313	2; 0—1400	3
	Силлиманит	0,133	0,743	1,00	1,08	1,16	1,22	1,054	0,123	0,257	3; 0—1200	4
$Al_6Si_2O_{13}$	Муллит		0,77	1,97	1,03	1,09	1,13	1,03	0,075	0,210	3; 0—1100	5
$Al_8Si_3O_{18}$	Каолинит		0,93	1,02				0,806	0,463	0,0	4; 0—300	6
$*Al_2Si_2O_7\cdot 2H_2O$	Каолин		0,99	1,17	1,35			0,641	0,904	0,0	3; 0—500	7
$Al_2Si_2O_7$	Метакаолин		0,71	1,00	1,10	1,20	1,27	1,062	0,151	0,289	2; 0—1300	7
$2(AlF)O\cdot SiO_2$	Топаз		(0,83 при 50°)									8
Au	Самородное золото		0,127	0,133	0,140	1,152		0,119	0,306	0	2; 0—1063	35
	жидкое						0,15				5; 1063—1300	35
$BaCO_3$	α - витерит	0,197	0,44	0,50	0,55	0,66		0,366	0,278	0	5; 0—810	10
	β - витерит					0,64		0,64	0	0	10; 810—980	10
$BaSO_4$	Барит	0,197	0,45	0,50	0,55	0,65		0,383	0,253	0	5; 0—1050	10,11

Продолжение табл. 1—XVI

Соединение	Минерал	C_p (джоули на грамм) при температурах, °C						Константы для уравнения $C_p = a + bT - cT^{-2}$ дж/г; (T°K)			Ошибка, %; диапазон температур, °C	Ссылка
		−200°	0°	200°	400°	800°	1200°	a	$10^3 b$	$10^{-5} c$		
$BeAl_2O_4$	Хризоберилл		(0,84 при 50°)									12
$Be_3Al_2Si_6O_{18}$	Берилл		(0,84 при 50°)									13
C	Алмаз		0,435	1,06	1,37	1,86		0,754	1,067	0,4544	4; 0—1040	25
	β-графит		0,635	1,18	$1,45_5$	1,88		0,932	0,913	$0,407_7$	3; 0—1040	26
$Ca_2Al_2H_2(SiO_4)_3$	Пренит		(0,84 при 50°)									
$Ca_2Al_2SiO_7$	Геленит		0,75	0,97	1,03	1,09	1,12	1,042	0,06	0,2284	2; 0—1300	19
$CaAl_2Si_2O_8$	Анортит		0,70	0,95	1,05	1,17	1,27	0,950	0,226	0,2313	1; 0—1400	18
	Стекло		0,68	0,96	1,06			1,014	0,158	0,282	1; 0—700	18
$CaCO_3$	Арагонит	0,26	0,78	1,00	1,13			0,823	0,497	0,1286	3; 0—750	16
	Кальцит	0,28	$0,79_3$	1,00	1,13			0,823	0,497	0,1286		
CaF_2	Флюорит	0,22	0,85	0,89	0,93	1,01	1,10	0,798	0,204	0	5; 0—1200	17
$CaMg(CO)_3$	Доломит		(0,93 при 60°)									15
$CaMgSi_2O_6$	Диопсид		0,69	0,98	1,06	1,15	1,20	1,053	0,111	0,290	1; 0—1300	20
	Стекло		0,71	0,98	1,07			0,999	0,188	0,253	1; 0—700	20
$CaSiO_3$	α-псевдоволластонит	0,174	0,73	0,92	0,99	1,07	1,14	0,926	$0,150_3$	$0,174_4$	2; 0—1400	21
	β-волластонит	1,172	0,67	0,92	1,00	1,06	1,10	1,007	0,074	0,269	2; 0—1300	21
	Стекло		0,69	0,92	1,03			$0,834_5$	0,348	$0,175_5$	2; 0—700	21
$CaSO_4$	Ангидрит		0,52	0,58	0,60	0,64		0,569	0,675	$0,048_2$	5; 0—1100	23
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Гипс	0,322	1,03									22
$CaWO_4$	Шеелит		(0,40 при 50°)									24
CdS	Гринокит		0,445	0,50	0,55	0,653		0,374	0,2605	0	0—1000	14
Cu	Самородная медь	0,161	0,384	0,40	0,42	0,46		0,358	0,096	0	2; 0—1084	27
	жидкая							0,493	0	0	3; 1084—1300	27
Cu_2O	Куприт		0,47	0,505	0,54	0,614		0,419	0,181	0	5; 0—950	28
CuO	Тенорит		0,52	0,63	0,68			0,572	0,188	0,079	2; 0—537	29
$2CuO \cdot CO_2 \cdot H_2O$	Малахит		(0,74 при 57°)									
$CuFeS_2$	Халькопирит		(0,54 при 50°)									30
$CuPbSbS_3$	Бурнонит		(0,31 при 50°)									
Cu_2Se	α-берцелианит		0,42					0,42	0	0	5; 0—100	31
	β-берцелианит			0,41				0,41	0	0	5; 100—200	31

Продолжение табл. 1—XVI

Соединение	Минерал	C_p (джоули на грамм) при температурах, °С						Константы для уравнения $C_p = a + bT - cT^{-2}$, дж/г; (T°К)			Ошибка, %; диапазон температур, °С	Ссылка
		—200°	0°	200°	400°	800°	1200°	a	$10^3\,b$	$10^{-5}\,c$		
Cu_2S	α-халькозин	0,255	0,470					0,247	0,82	0	3; 0—103	32
	β-халькозин			0,55	0,55	0,55		0,55	0	0	10; 103—900	32
CuS	Ковеллин	0,228	0,49	0,52	0,54	0,59		0,464	0,115	0	?; 0—1000	33
$CuSiO_3H_2O$	Диоптаз		(0,77 при 34°)									34
Fe	α-железо		0,44	0,52	0,60			0,33	0,40	0	3; 0—755	36
	β-железо					(0,73)		0,46	0,25	0	3; 755—903	36
	γ-железо						0,63	0,63	0	0	5; 903—1401	36
	δ-железо							0,75	0	0	5; 1401—1530	36
	жидкое							0,61	0	0	5; 1530—1600	36
FeAsS	Арсенопирит		(0,43 при 55°)									37
$FeCO_3$	Сидерит	0,234	$0,68_3$									38
Fe_2O_3	Гематит		0,61	0,79	0,90	1,08		0,640	0,420	0,111	3; 0—800	39
Fe_3O_4	α-магнетит		0,60	0,83	0,93			0,744	0,340	0,177	3; 0—576	40
	β-магнетит					1,03		0,640	0,362	0	5; 576—800	40
$2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$	Лимонит		(0,94 при 60°)									
Fe_2SiO_4	Фаялит		0,55	0,79	0,91	1,095		0,69	0,392	0,181	3; 0—900	41
$Fe_2Si_2O_6$	Гиперстен		(0,80 при 60°)									42
FeS	α-троилит	0,238	0,606					1,00	1,85	0	7; 0—138	43
	β-троилит			0,635	0,66	0,71		0,574	0,130	0	3; 138—1195	43
FeS_2	Пирит	0,075	0,500	0,594	69			0,373	0,466	0	7; 0—500	44
Fe_7S_8	Пирротин		0,594	0,77				0,406	2,81	$0,431_3$	3; 0—350	45
H_2O	Лед	0,653	2,06									
Hg	Самородная ртуть		0,138	0,138				0,138	0	0	1; 0—347	61
HgS	α-киноварь		0,214	0,227	0,240			0,196	0,066	0	2; 0—580	14
$KAlSi_2O_6$	Лейцит		($0,74_6$ при 60°)									67
	Стекло		($0,73_2$ при 60°)									67
$KAlSi_3O_8$	Адуляр		0,732	0,842	1,00							18
	Микроклин		0,680	0,950	1,04	1,43		0,988	0,166	0,263	1; 0—1100	18
	Ортоклаз		0,61	$0,94_4$	1,05	1,45		1,043	0,124	0,351	1; 0—1100	18
	Стекло		0,70	0,97	1,07	1,19		0,976	$0,216_5$	0,247	2; 0—1100	18
KCl	Сильвин	0,418	0,682	0,715	0,749			0,682	0,168	0	2; 0—770	65

Соединение	Минерал	C_p (джоули на грамм) при температурах, °C						Константы для уравнения $C_p = a + bT - cT^{-2}$, дж/г; (T°K)			Ошибка, %; диапазон температур, °C	Ссылка
		–200°	0°	200°	400°	800°	1200°	a	$10^3\,b$	$10^{-5}c$		
KNO_3	α-селитра	0,326						0,266	0,219	0	10; 0—128	66
	β-селитра		1,19					1,19	0	0	5; 128—338	66
	жидкая			1,22				1,22	0	0	10; 338—410	66
$LiAlSi_2O_5$	Петалит		(0,85 при 58°)									48
$LiAlSi_2O_6$	Сподумен		(0,90 при 60°)									49
	Стекло		(0,91 при 60°)									49
$Mg_3Al_2Si_3O_{12}$	Гранат		(0,74 при 58°)									55
$Mg_7B_{16}Cl_2O_{25}$	α-борацит		0,796	1,18				0,275	1,909	0	5; 0—265	54
	β-борацит				1,41			0,502	1,346	0	5; 265—400	54
$MgCl_2$	Хлормагнезит		0,805	0,84	0,87			0,760	0,166	0	?; 0—718	9
$MgCO_3$	Магнезит	0,161	0,864									50
MgF_2	Селлаит		0,906	1,08	1,206	1,43		0,857	0,542	0,736	3; 0—1000	51
$Mg(OH)_2$	Брусит		(1,30 при 35°)									52
MgO	Периклаз	0,066	0,870	1,09	1,16	1,24	1,30	1,127	0,124	0,217	2; 0—1800	53
$MgSiO_3$	Пироксен		0,752	1,03	1,15			0,973	0,336	0,233	1; 0—500	56
	Амфибол		0,740	1,03	1,13	1,24		1,067	1,183	0,281	1; 0—1100	56
	Стекло		0,756	1,02	1,14			0,971	0,322	0,226	1; 0—700	56
$MgSO_4 \cdot H_2O$	Кизерит		(1,00 при 9°)									57
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Эпсомит		(1,51 при 32°)									52
$Mg_2Fe_2SiO_4$	Оливин		(0,79 при 36°)									52
$Mg_3H_2Si_4O_{12}$	Тальк		(0,87 при 59°)									15
$MnCO_3$	Родохрозит	0,203	0,70	1,08	1,46			$0,283_5$	1,532	$0,33 \cdot 10^{-11}T^4$	4; 0—500	58
MnO_2	Пиролюзит		0,975	1,00	1,01			0,924	0,227	$0,14_3 \cdot 10^{-11}T^4$	?; 0—500	59
$Mn_2O_3 \cdot H_2O$	Манганит		(0,74 при 36°)									52
MnS	Алабандин	0,322*	0,569									60
MoS_2	Молибденит		0,537	0,554	0,570			0,515	0,082	0	5; 0—456	9
$NaAlSi_3O_8$	Альбит		0,709	0,986	1,085	1,196		1,018	0,187	0,268	1; 0—1100	18
	Стекло		0,724	1,00	1,114	1,26		0,978	0,282	0,247	1; 0—900	18

Продолжение табл. I—XVI

Соединение	Минерал	C_p (джоули на грамм) при температурах, °C						Константы для уравнения $C_p = a + bT - cT^{-2}$, дж/г; (T°K)			Ошибка, %; диапазон температур, °C	Ссылка
		−200°	0°	200°	400°	800°	1200°	a	$10^3 b$	$10^{-5} c$		
NaCl	Галит	0,466	0,855	0,915	0,975	1,095		0,773	0,300	0	2; 0—800	77
	жидкий					1,14		1,14	0	0	3; 800—950	77
NaF	Виллиомит		1,034	1,10	1,29			0,473	1,151	−0,184	2; 0—700	75
$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	Бура		(0,161 при 35°)									74
Na_3AlF_6	Криолит		0,909	1,18	1,39	1,78		0,770	0,949	0,0895	2; 0—1000	76
NiS	Миллерит		0,506	0,565				0,426	0,295	0	3; 0—324	62
$PbCO_3$	Церуссит	0,177	0,318									46
PbS	Галенит	0,142	0,207	0,221	0,235			0,188	0,007	0	5; 0—600	47
$PbSO_4$	Англезит		(0,364 при 60°)									
Pd	Палладий		0,232	0,246	0,260	0,289	0,318	0,212	0,072	0	2; 0—1549	63
Pt	Платина		0,134	0,139	0,144	0,154	0,164	0,127	0,0249	0	1; 0—1600	64
S_8	Ромбическая сера							0,482	0,835	0	3; 0— 956	80
	Моноклинная сера							0,572	0,576	0	3; 96,6—119	80
	жидкая							0,656	0,656	0	?; 119—160	80
	вязкая							1,22	0	0	?; 160—270	80
Sb_2S_3	Стибнит		0,342	0,375	0,407			0,298	0,163	0,0	опред.; 0—548	9
SiO_2	α-кварц	0,173	0,698	0,969	1,129			0,7574	0,607	0,168	1 0—575	68
	β-кварц					1,174	1,327	0,763	0,383	0	4; 575—1600	68
	α-кристобалит	0,186	0,69	1,01				0,254	1,6	0	4; 0—250	69
	β-кристобалит				1,074	1,171	1,21	1,191	0,032	0,0625	2; 250—1700	69
	Стекло	0,184	0,70	0,95	1,06	1,21	1,34	0,892	$0,311_5$	0,021	5; 0—1700	70
SnO_2	Касситерит		0,34	0,43	0,48	0,55		0,387	0,157	0,007	4; 0—1100	81
$SrCO_3$	Стронцианит	0,211	0,536									79
TiO_2	Рутил, брукит		0,70	0,80	0,88			0,619	0,395	0,022	3; 0—450	82
WO_3	Тунгстит		0,33	0,355	0,382	0,44	0,494	0,289	0,14	0	5; 0—1300	83
$ZnCO_3$	Смитсонит	0,238	0,632									84
ZnO	Цинкит		0,48	0,58	0,615	0,66	0,69	0,586	0,075	0,094	2; 0—1300	85
ZnS	{α-вурцит, β-сфалерит}	0,430	0,45	0,53	0,56	0,587		0,550	0,041	0,084	6; 0—900	86
$ZrSiO_4$	Циркон		(0,61 при 60°)									87

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 1—XVI

Основные: Landolt-Börnstein Tabellen, 1, 1242, 1923; 2, 1160, 1931; 3, 2230, 1936; Kelley, Bull. 371, 393, Bureau of Mines; Chem. Abstracts.

Теплоемкости минералов

1. Tilden, Journ. Chem. Soc., 559, 1905; Miehr, Immke, Kratzers, Tonind. Zeit, 50, 1671, 1791, 1926; Cohn, Journ. Am. Ceram. Soc. 7, 475, 1924; 10, 347, 1927; Roth, Bertram, Zeit. Electrochem. 35, 297, 1929; Колосовский Н. А. и Скульская И., Kolossowsky, Skoulski, Bull. Soc. Chim. France, 47, 136, 1930; Newman, Brown, Ind. Eng. Chem., 22, 995 1930; Wilkes, Journ. Am. Ceram. Soc., 15, 72, 1932; Esser, Averdieck, Grass, Arch. Eisenhüttenw., 6, 289, 1933; Gronow., Schwiete, Zeit. anorg. Chem., 216, 185, 1933; Treadwell, Terebesi, Helv. Chim. Acta, 16, 922, 1933; Chipman, Trans. Am. Soc. Metals, 22, 414, 1934; Terebesi, Helv. Chim. Acta (A) 804, 1934; Simon, Swain, Zeit. phys. Chem. 23, 189, 1935.
2. Neumann, Zeit. anorg. Chem., 145, 194, 1925.
3. Neumann, Zeit. anorg. Chem., 145, 194, 1925; Колосовский Н. А. и Скульская И. Kolossowsky, Skoulski, Bull. Soc. Chim., France, 47, 136, 1930.
4. Cohn, Journ. Am. Ceram. Soc. 7, 475, 1924; Neumann, Zeit anorg. Chem., 145, 194, 1925.
5. Колосовский, Н. А. Журн. общей химии, СССР, 1, 253, 1931; Bergeron, Journ. Soc. Glass Tech., 20, 680, 1936.
6. Колосовский Н. А. и Скульская, Kolossowsky, Skoulski (см. ссылку 3).
7. Schwiete, Gronow, Zement, 24, 197, 1935.
8. Joly, Proc. Roy. Soc., 41, 250, 1887; Lindner, Diss. Erlangen, 1903.
9. Regnault, Pogg., Ann. 53, 60, 1841.
10. Regnault, Pogg. Ann., 53, 60, 1841. Joly, Proc. Roy. Soc., 41, 250, 1886; Лащенко П. Н., Журн. Русск. Физ.-Хим. общ. 43, 1604, 1910; Anderson, Journ. Am. Chem., Soc. 56, 340, 1934.
11. Latimer, Hicks Jr., Schutz, Journ. Am. Chem. Soc., 56, 88, 1934.
12. Nilson, Pettersson, Ber. Deut. Chem. Ges., 13, 1459, 1880.
13. Oeberg, Öfs. Stockh., 42, 43, 1885; Joly, Proc. Roy. Soc., 41, 250, 1887.
14. Russel, Phys. Zeit. 13, 59, 1912.
15. Ulrich, Wollny Forsch. Geb. Agrikultur Phys., 17, I, 1894.
16. Regnault, Pogg. Ann., 53, 60, 1841; Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc., 155, 71, 1865; Thoulet, Lagarde, Comptes rendus, 94, 1512, 1882; Joly, Proc. Roy. Soc., 41, 250, 1886; Pierce, Wilson, Nature, 61, 367, 1900; Nernst, Koref, Lindemann, Sitzber. Berlin Akad., 12, 247, 1910; Лащенко П. Н., Журн. Русск. Физ-Хим. общ. 43, 793, 1911; Magnus, Phys. Zeit. 14, 5, 1913; Nernst, Schwers, Sitz., Berlin Akad., 355, 1914; Dannholm, Soc. Sci. Fennica, Commentationes Phys. Math., 1, 1922; Anderson, Journ. Am. Chem. Soc., 56, 340, 1934; Simon, Swain, Zeit. phys. Chem. 28, 189, 1935.
17. Regnault, Ann. chim. Phys., 1, 129, 1841; Neumann, Ann. Phys. 126, 123, 1865; Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc. 155, 1871; Joly, Proc. Roy. Soc., 41, 250, 1886; Eucken, Schwers, Phys. Gesell. Berlin, 15, 578, 1913; Kelley, Bull. 350, Bureau of Mines, 1932.
18. White, Am. Journ. Sci. 28, 334, 1909; 47, 17, 1919.
19. v. Gronow, Schwiete, Zeit. anorg. Chem. 216, 185, 1933.
20. White, Am. Journ. Sci. 47, 17, 1919; Wagner, Zeit. anorg. Chem. 208, 19, 1932; Cristescu, Simon, Zeit. phys. Chem., 25, 273, 1934.
21. White, Am. Journ. Sci., 47, 17, 1919; Roth, Bertram, Zeit. Electrochem. 35, 297, 1929; Huttig, Rosenkranz, Zeit. Electrochem. 35, 308, 1929; Parks, Kelley, Journ. Phys. Chem. 30, 1175, 1926; Wagner, Zeit. anorg. Chem. 208, 19, 1932; Cristescu, Simon, Zeit. physik, Chem., 25, 273, 1934.
22. Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc., 155, 71, 1865; Latimer, Hicks Jr, Schutz, Journ. Am. Chem. Soc. 56, 38, 1934.
23. Regnault, Pogg. Ann., 53, 60, 243, 1841; Kopp. Phil. Trans. Roy. Soc., 155, 71, 1865. Лащенко, П. Н. и Компанский Д. И., Журн. Русск. Физ.-Хим. общ. 60, 579, 1928.
24. Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc., 155, 71, 1865.

25. Regnault, Betendorf, Willner, Dewar (black diamond) (см. ссылку 18); Armstrong, Proc. Roy. Inst., 19, 393, 1908; Nernst, Lindemann, Sitzber. Berlin Akad., 404, 1911; Koref, Ann. phys. 36, 49, 1911; Ewald, Ann. phys. 36, 1213, 1914.

26. Regnault, Pogg. Ann. 53, 243, 1841; Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc., 155, 71, 1865; Bettendorf, Wüllner, Pogg. Ann., 133, 293, 1868; Dewar, Phil. Mag., 44, 461, 1862; Magnus, Ann. phys. 70, 303, 1923; Schläpfer, Debrunner, Helv. Chim. Acta, 7, 31, 1924.

27. Lorenz, Pogg. Ann., 13, 422, 1881; Bede, Fortschr. Phys. 11, 379, 1885; Naccari, Atti Torino, 23, 107, 1887—1888; Gaede, Phys. Zeit. 4, 105, 1902; Glaser, Metallurgie, 1, 103, 121, 1904; Magnus, Ann. Physik, 31, 597, 1910; Nernst, Lindemann, Sitzber. Berlin Akad., 4, 94, 1911; Griffiths, Griffiths, Proc. Roy. Soc., A89, 561, 1914; Keesom, Onnes, Proc. Acad. Sci. Amsterdam, 18, 484, 1915; Schübel, Zeit. anorg. Chem., 184, 193, 1929; Harper, U. S. Bur. Stand. Bull. 11, 259, 1915; Wüst, Meuthen, Durrer, Forsch. Arb. deut Ing., 204, 1918; Doerinckel, Werner, Zeit. anorg. Chem., 115, 1. 1921; Umino, Sci. Repts, Tôhoku Univ., 15, 597, 1926; Klinkhardt, Ann. Physic, 84, 167, 1927; Ruer, Kremero: Zeit anorg. Chem., 184, 193, 1929. Eucken, Werth, Zeit. anorg. allgem. Chem., 188, 152, 1930; Seekamp. Zeit. anorg. allgem., Chem., 195, 345, 1931; Bronson, Chisholm, Doherty, Can. Journ. Res., 8, 282, 1933; Maier, Anderson. Journ. Chem. Phys., 2, 513, 1934.

28. Magnus, Ann. Physik, 31, 597, 1910; Randall, Nielsen, West, Ind. Eng. Chem., 23, 388, 1931; Wöhler, Jochum, Schmitt, Zeit phys. Chem. 167, 169, 1933.

29. Regnault, Pogg. Ann., 98, 396, 1856; Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc., 155, 71, 1865; Magnus. Habiltationsschrift. Eberhard — Karls Univ. Tübingen, 1910; Russell, Physik. Zeit. 13, 59, 912.

30. Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc., 155, 71, 1865; Oeberg, Ofs. Stockh., 42, 43, 1885.

31. Bellati, Lussana, Atti ist. Veneto, 7, 1051, 1888.

32. Regnault, Pogg. Ann. 53, 60, 1841; Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc., 155, 71, 1865; Bellati, Lussana, Atti ist. Veneto 7, 1051, 1888; Bornemann, Hengstenberg, Metall u. Erz. 17, 313, 339; Randall, Nielsens, West, Ind. Eng. Chem., 23, 388, 1931; Anderson, Journ. Am. Chem. Soc., 54, 107, 1932; White, Journ. Am. Chem. Soc., 55, 1947, 1933.

33. Russel, Physik. Zeit, 13, 59, 1910; Bornemann, Hengstenberg, Metall u. Erz. 17, 313, 1920; Anderson, Journ. Am. Chem. Soc., 54, 107, 1932.

34. Kopp, Phil. Trans. Roy Soc., 155, 71, 1865.

35. Wüst, Meuthen, Durrer, Forschr. Arb. Ver. Deut. Ind., No. 204, 1918; Schläpfer, Debrunner, Helv. Chim. Acta, 7, 31, 1924; Umino, Sci. Repts., Tôhoku Univ., 15, 597, 1926.

36. Byström, Fortschr. Physik, 16, 369, 1860; Weinhold Pogg. Ann., 149, 186, 215, 1873; Lorenz, Pogg. Ann., 13, 422, 1881; Bede, Fortschr, Physik, 11, 379, 1885; Pionchon, Compt. rend., 102, 1454, 1886; Naccari, Atti Torino, 23, 107, 1887, Harker, Phil, Mag., 10, 430, 1905, Stücker, Sitzber. kgl. Akad. Wiss. Wien, 114, 657, 1905; Oberhoffer, Metallurgie, 4, 486, 1907; Weiss, Beck, Arch. sci. phys. nat., 42, 378, 1916; Pirani, Ber. deut. phys., Ges., 102, 1037, 1912; Griffiths, Griffiths, Proc. Roy. Soc., A88, 549, 1913; Levin, Schottky, Ferrum, 10, 193, 1913; Лащенко П. Н., Журн. Русск. Физ-Хим. общ., 46, 311, 1914; Schübel. Zeit anorg. Chem. 87, 81, 1914; Weiss, Piccard, Carrard, Arch. sci. Phys. nat. 42, 378, 1914; Wüst, Meuthen, Durrer, Forsch. Arb. Ver. deut. Ing., No 204, 1918; Kawakami, Sci. Repts. Tôhoku Univ., 15, 251, 1926; Klinkhardt, Zeit. Electrochem. 32, 534, 1926; Oberhoffer, Grosse, Stahl. u. Eisen. 47, 576, 1927; Umino, Sci. Repts. Tôhoku Univ., 16, 775, 1927; 18, 91, 1929; Zalesinski, Zulinski, Bull. int. acad. polonaise, pt. A, 479, 1928.

37. Sella, Nachr. kgl. Ges. Wiss. Götingen, 311, 1891.

38. Roth, Bertram, Zeit. Electrochem. 35, 297, 1929; Anderson, Journ. Am. Chem. Soc., 56, 849, 1934.

39. Brown, Furnas, Trans, Am. Inst. Chem. Eng., 18, 309, 1926; Russell, Physik. Zeit 13, 59, 1912; Roth, Bertram, Z. Electrochem. 35, 297, 1929; Колосовский Н. А. и Скульская И., Kolossowsky, Skoulski. Bull, Soc. Chim. France, 47, 136, 1930; Chipman, Murphy, Ind. Eng. Chem. 25, 319, 1933.

40. Weiss, Piccard, Carrard. Arch. sci. Phys. nat., 43, 113, 1917; Brown, Furnas, Trans. Am. Inst. Chem. Eng., 18, 309, 1926; Roth, Bertram, Z. Electrochem, 35, 297, 1929; Колосовский Н. А. и Скульская И. Kolossowski, Skoulski, Bull. Soc. Chim. France, 47, 136, 1930; Esser, Averdieck, Grass, Arch. Eisenhüttenw., 6, 289, 1932—1933; Chipman, Murphy, Ind. Eng. Chem., 24, 319, 1933.
41. Roth, Bertram, Zeit. Electrochem., 35, 297, 1929; Esser, Averdieck, Grass. Arch. Eisenhüttenw., 6, 289, 1933.
42. Ulrich (см. ссылку 15).
43. Regnault, Pogg. Ann., 53, 60, 1841; Bornemann, Hengstenberg, Metall. u. Erz. 17, 313, 319, 1920; Anderson, Journ. Am. Chem. Soc., 53, 476, 1931.
44. Joly, Proc. Roy. Soc., 41, 250, 1886; Eucken, Schwers, Ber. deut. phys. Ges., 15, 578, 1913; Hengstenberg, Diss. Breslau, 1920; Maier, Rept. Invest. Bur. Mines, 1934.
45. Lindner, Diss. Erlangen, 1903; Hengstenberg, Diss., Breslau, 1920.
46. Anderson, Journ. Am. Chem. Soc., 56., 849, 1934.
47. Regnault, Pogg. Ann., 53, 60, 1841; Kopp, Proc. Roy. Soc., 155, 71, 1865; Joly, Proc. Roy. Soc., 41, 250, 1896; Rolla, Nuovo cimento, 9, 197, 1915; Eastman, Rodebush, Journ. Am. Chem. Soc., 40, 40, 496, 1918; Anderson, Journ. Am. Chem. Soc., 54, 107, 1932.
48. International Critical Tables.
49. Schulz, Zentr. Mineral. Geol., 632, 1911.
50. Mitchell, Journ. Chem Soc., 123, 1055, 1923; Anderson, Journ. Am. Chem. Soc., 56, 849. 1934.
51. Landolt-Börnstein Tabellen.
52. Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc., 155. 71, 1865.
53. Russel, Physik. Zeit., 13, 59, 1912; Günther, Ann. phys., 51, 828, 1916; Magnus, Ann. Physik, 70, 303, 1923; Wilkes Journ. Am. Ceram. Soc., 15, 72, 1932.
54. Mallard, Bull. Soc. Min. France, 6, 122, 1883; Kroeker, Nachr. kgl. Wiss. Göttingen, 122, 1892.
55. Oeberg, Ofs. Stockh., 42, 43. 1885.
56. White, Am. Journ. Sci., 28, 334, 1909; Wagner, Zeit. anorg. Chem., 208, 19, 1932; Cristescu, Simon, Zeit. phys. Chem., 25, 273, 1934.
57. Rolla, Accame, Atti accad. Lincei, 22, 11, 109, 1913.
58. Anderson, Journ. Am. Chem. Soc., 56, 849, 1934.
59. Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc., 155, 71, 1865; Russell, Physik. Zeit., 13, 59, 1912; Maier, from Kelley.
60. Anderson, Journ. Am. Chem. Soc., 53, 476, 1931.
61. Milthaler, Wied. Ann. 36, 897, 1889; Naccari, Journ. Phys., 8, 612, 1889; Gaede, Physik. Zeit., 4, 105, 1902; Cohen, Kruisheer, Moesveld, Zeit phys. Chem., 96, 437, 1920: Marttinen, Tiihonen, Soc. Sci. Fennica, I, 11, 1922; Hirobe, Journ. Univ. Tokyo, 1, 155, 1926; Dixon, Rodebush, Journ. Am. Chem. Soc., 49, 1162, 1927.
62. Tilden, Phil. Trans. Roy. Soc., 203A, 139, 1904.
63. Jaeger, Dieselhorst. Wiss. Abhandl. Physik.-tech. Reichsanstalt, 3, 269, 1900; Jaeger, Rosenbohm, Proc. Acad. Sci. Amsterdam, 33, 457, 1930.
64. Byström, Fortschr. Physik, 16, 369, 1660; Tilden, Phil. Trans. Roy. Soc., 203A, 139, 1904; White, Am. Journ. Sci. 2, 334, 1909; Phys., Rev. 12, 436, 1918; Wüst, Meuthen, Durrer, Forsch, Arb. Ver., Deut. Ing., No. 204, 1918; Jaeger, Rosenbohm, Proc. Acad. Sci. Amsterdam, 33, 457, 1930.
65. Plato, Zeit. phys. Chem. 55, 721, 1906; Magnus, Physik. Zeit., 14, 5, 1913; Southard, Nelson, Journ. Am. Chem. Soc., 55, 4865, 1933; Marley, Proc. Phys. Soc., 45, 591, 1933; Keesom, Clark, Physica, 2, 702, 1935.
66. Regnault, Pogg. Ann., 53, 60, 1841; Person, Pogg. Ann. 70, 300, 1847; Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc., 155, 71, 1865; Neuman, Pogg. Ann., 126, 123, 1865; Goodwin, Kalmus, Phys. Rev., 28, 1, 1909; Ewald, Ann. Physik, 44, 1913, 1914.
67. Богоявленский, Bogajawlensky, Schr. Naturf. Ges. Dorpat, I, 1904.
68. Pionchon, Comptes. Rendus., 102, 1454, 1836; Лащенко П. Н., Журн. Русск. Физ.-Хим. общ., 42, 1604, 1910; Magnus, Physik. Zeit., 14, 5, 1913; White, Am. Journ. Sci., 23, 334, 1909; Nernst, Ann. Phys. 36, 395, 1911; Bornemann, Hegstenberg, Metall u. Erz., 17, 313, 339, 1920; Wietzel, Zeit. Anorg. Chem. 116, 71, 1921; Perrier, Roux, Mem. Soc. Vaud. sci. nat., 3, 110, 1923, Schläpfer, Debrunner, Helv. Chim. Acta, 7, 31, 1924;

Cohn, Journ. Am. Ceram. Soc., 7, 475, 1924; Ber. deut. keram, Ges., 9, 289, 1928; Miehr. Immke, Kratzers, Tonind. Zeit., 50, 1671, 1926; Roth, Bertram, Zeit. Electrochem., 35, 297, 1929; Kolossowsky, Skoulski, Bull. soc. chim. France, 47, 136, 1930; Esser, Averdieck, Grass, Arch. Eisenhüttenw., 6. 289, 1932; Schwiete, Gronow, Zement, 24, 198, 1935.

69. Wietzel, Zeit. anorg. Chem., 116, 71, 1921; White, Am. Journ. Sci. 28, 334, 1909; Simon, Ann. phys., 68, 241, 1922; Cohn, Journ. Am. Ceram. Soc., 7, 475, 1924.

70. Stierlin, Viertel. naturforsch. Ges. Zürich, 52, 382, 1908; Лащенко П. Н., Журн. Русск. Физ.-хим. общ., 42, 1604, 1910; Nernst, Ann. phys., 36, 395; 1911; Magnus, Physik. Zeit., 14, 5, 1913; Wüst, Meuthen, Durrer, Forsch. Arb. Ver. Deut. Ing., 204, 1918; White, Am. Journ. Sci., 28, 334, 1909; 47, 1, 1919; Iitaka, Sci. Repts, Tohoku Univ., 8, 99, 1019; Bornemann, Hengstenberg, Metall u. Erz., 17, 313, 1920; Wietzel, Zeit. anorg. Chem., 116, 71, 1921; Cohn, Journ. Am. Ceram. Soc., 7, 359, 475, 548, 1924; Miehr, Immke, Kratzers, Tonind. Zeit., 50, 1671, 1926; Roth, Bertram, Zeit. Electrochem. 35, 297, 1929; Fischer, Zeit. anorg. Chem. 200, 332, 1931.

71. Byström, Fortschr. Physik, 16, 369, 1860; Naccari, Atti Torino, 23, 107, 1888; Tilden, Proc. Roy. Soc., 71, 220, 1903; Magnus, Ann. Physik, 31, 597, 1910; Nernst. Ann. phys., 36, 395, 1911; Griffiths, Griffiths, Proc. Roy. Soc. A88, 549, 1913; Schübel, Zeit. anorg. Chem., 87, 81, 1914; Weiss, Piccard, Carrard, Arch. sci. Phys. nat., 42, 378, 1916; 43, 199, 1917; Wüst, Meuthen, Durrer, Forsch. Arb. ver deut. Ing., 204, 1918; Eastman, Williams, Young, Journ. Am. Chem. Soc., 46, 1178, 1924; Umino, Sci. Repts. Tohoku Univ., 15, 597, 1926; Magnus, Hodler, Ann. Physik, 80, 808, 1926; Jaeger, Rosenbohm, Veenstra, Proc. Acad. Sci. Amsterdam, 36, 291, 1933.

72. Ehrhardt, Wied. Ann. 24, 215, 1885; Goodwin, Kalmus, Phys. Rev., 28, I, 1909; Magnus, Habilitationsschrift, Eberhard—Karls Univ. Tübingen, 1910; Eastman, Milner, Journ. Chem. Phys. 444, 1933.

73. Regnault, Pogg. Ann., 53, 60, 1841; Bellati, Lussana, Atti. ist. Veneto, 7, 1051, 1888; Sella, Nachr. kgl. Ges. Wiss., Göttingen, 311, 1891; Tilden, Phil. Trans. Roy. Soc., 203A, 139, 1904; Rolla, Proc. Acad. Sci. Amsterdams, 34, 808, 1931.

74. Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc. 155, 71, 1865.

75. Крестовников А. Н. и Каретников Г. А., журн. «Легкие металлы», № 4, 29, 1934.

76. Roth, Bertram, Zeit. Electrochem., 35, 297, 1929; Крестовников А. Н. и Каретников Г. А., журн. «Легкие металлы», № 4, 29, 1934.

77. Plato, Zeit. Phys. Chem., 55, 721, 1906; Magnus, Physik, Zeit., 14, 5, 1913; Roth, Bertram, Zeit. Electrochem., 35, 297, 1929; McGraw Jr., Landolt-Börnstein Tabellen.

78. Joly, Proc. Roy. Soc., 41, 250, 1886; Ulrich, Wollny Forsch. Geb. Agrikultur Phys., 17, 1, 1894.

79. Anderson, Journ. Am. Chem. Soc., 56, 340, 1934.

80. Person. Pogg. Ann. 70, 300, 1846; Dussy, Comptes. rendus., 123, 305, 1896; Wigand, Ann. Physik, 22, 64, 1097; Richards, Jackson, Zeit. Phys. Chem., 70, 414, 1910; Nernst, Koref, Lindemann, Sitzber. Berlin Akad. 247, 1910; Nernst, Ann. Phys., 36, 395, 1911; Lewis, Randall, Journ. Am. Chem. Soc., 33, 476, 1911; Dewar, Proc. Roy. Soc., 89, 158, 1913; Iitaka, Sci. Repts. Tohoku Univ., 8, 99, 1919; Monval, Bull. soc. chim., 39, 1349, 1926.

81. Hütting, Margierkiewicz, Fichman, Z. phys. Chem., 141A, 8, 1929.

82. Regnault, Ann. chim. Phys., 1, 129, 1841; Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc., 155, 71, 1865; Nilson, Petterson, Zeit. phys. chem. 1, 27, 1887.

83. Regnault, Pogg. Ann., 53, 60, 1841; Russell, Physik. Zeit., 13, 59, 1912.

84. Anderson, Journ. Am. Chem. Soc., 56, 849, 1934.

85. Regnault, Pogg. Ann., 53, 60, 1841; Magnus, Physik. Zeit., 14, 5, 1913; White, Day, in Journ. Am. Chem. Soc., 48, 364, 1926.

86. Bornemann, Hengstenberg, Metall u. Erz. 17, 313, 339, 1920.

87. Kopp, Phil. Trans. Roy. Soc., 155, 71, 1865; Regnault, Pogg. Ann., 53, 60, 1841.

Таблица 2—XVI

Теплоемкость горных пород
(см. также табл. 4—XVII)

Породы	C_p (джоули на грамм) при температурах, °С					Константы для уравнения $C_p=a+bT-cT^{-2}$, дж./г; (T°K)			Ошибка, %; диапазон температур, °С	Ссылка
	0°	200°	400°	800°	1200°	a	10^3b	$10^{-5}c$		
Изверженные										
Гранит ..... 65% ортоклаза 25% кварца 9% альбита 1% магнетита	0,65	0,95	1,07	1,13		0,965 0,966	0,254 0,199	0,296 0,252	Вычисл.* 0—575 Вычисл. 575—1000	
Гранит, Япония (среднее из 6 проб)...	0,80	0,95	1,09	1,39		0,60	0,74	0	±20;0—800	1 2
	(0,77 при 50°)									
Гранодиорит... 20% кварца 60% андезина 9% амфибола 10% пироксена 1% магнетита	0,70	0,97	$1,08_5$	$1,17_5$		0,940	0,289	0,235	Вычисл. 0—900	
Диорит, Япония (среднее из 8 проб)	(0,81 при 65°)									
Диорит..... 50% андезина 40% амфибола 9% ортоклаза 1% магнетита	0,71	0,99	1,09	1,18		1,024	0,187	0,273	Вычисл. 0 - 900	2
Базальт ..... Сиракузы Этна Килауэа	0,85	1,04	$1,14_5$	1,32	1,49	0,902	0,402	0,122	±5;0—1200	1,3
Диабаз.....	0,70	0,87	0,98	1,19	1,36	0,665	0,50	0,075	±5;0—1200	4
Габбро..... 45% лабрадора 45% пироксена, оливина 5% амфибола 5% магнетита	0,72	0,99	1,10	1,18		0,975 0,969	0,267 0,268	0,242 0,234	Вычисл. 0—585 Вычисл. 585—900	
Метаморфические										
Гнейс	0,74	1,01				0,38	1,33	0	±10;0—200	5
Гранито-гнейс (см. гранит), Япония.....	(0,79 при 65°)								Определ.**	2
Сланец.....	0,71	1,00	1,10	1,20	1,27	1,06	0,151	0,29	0—1200	

* Вычисл. обозначает: вычислено по содержащимся минералам.

** Определ. обозначает: вычислено по аналогии.

Продолжение табл. 2—XVI

Породы	C_q, (джоули на грамм) при температурах, °С,					Константы для уравнения $C_p = a + bT - cT^{-2}$, дж./г; (T°K)			Ошибка, %; диапазон температур, °С	Ссылка
	0°	200°	400°	800°	1200°	a	$10^3 b$	$10^{-5} c$		
Кварцит.....	0,70	0,97	1,13	1,17	1,33	0,757 0,763	0,607 0,383	0,168 0	Вычисл. 0—575 Вычисл. 575—1600	
Япония (среднее из 9 проб)	(0,77 при 65°)									2
Мрамор ..... (среднее из 6 проб)	0,79	1,00	1,13			0,823	0,497	0,129	Вычисл. 0—750	6
Осадочные										
Песчаник.....	(0,93 при 59°)									7
слюдистый	(0,73 при 50°)									7
Япония (среднее из 4 проб)	(0,81 при 65°)									2
Англия (среднее из 8 проб)	(0,81 при 50°)									6
(см. кварцит)										
Глина, аморф-	0,75	0,94	1,13	1,51		0,489	0,953	0	±5; 0—1000	8
(Глинистый сланец).....	(0,77 при 65°)									2
Глина {фарфоровая ..	0,80	0,94	1,08	1,78	1,78	0,607	0,707	0	±5; 0—500	8
Глина {каолин						1,78	0	0	±7; 600—1200	6
Известняк	(1,00 при 58°)									
Англия (среднее из 3 проб)	(0,68 при 50°)									
Япония (среднее из 10 проб)...	(0,83 при 65°)									2
(см. мрамор)										

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 2—XVI

1. Bartoli, Bull. mens. dell acc. Gionenia, 3, 61, 1891, Poole, Phil. Mag. 27, 58, 1914.
2. Tadokoro, Sci. Reports. Tohoku Imp. Univ. 10, 339, 1921.
3. Roberts, Ricker, Phil. Mag. 32, 1891.
4. Barus, Phil. Mag. 32, 353, 1891.
5. Weber, Diss. Zürich. 1878.
6. Baldwin, Wiseman, Griffith, Proc. Inst. Civil. Eng. 179, 290, 1909.
7. Hecht, Diss. Königsberg, 1903.
8. Cohn, Journ. Am. Ceram. Soc. 7, 475, 1924.

Таблица 3—XVI

Теплота превращения и теплота плавления

Соединение	Минерал	Изменение фазы	Температура, °С	Δh, джоули на грамм	Метод*	Ссылка, примечание
Ag_2S	Акантит →	Аргентит	175	17,6±0,2	Теплосодерж.	Теплоемк.
	Аргентит →	жидкая фаза	842	57	Пониж. т. затверд.	38
Al_2O_3	Корунд	$\gamma \rightarrow \alpha$	20	0,41	Теплосодерж.	1
		Твердая → жидкая	2045	1070	Пониж. т. затверд.	2
Au	Золото	Твердая → жидкая	1063	65±4	Теплосодерж.	18
$BaCO_3$	Витерит	$\alpha \rightarrow \beta$	810	97,5±	„	Теплоемк.
$BaSO_4$	Барит	Твердая → жидкая	1350	174	Пониж. т. затверд.	4
$CaAl_2Si_2O_8$	Анортит	Твердая → жидкая	1550	440	„ „ „	6
				440±65	Теплосодерж.	7
$CaCO_3$	Кальцит →	Арагонит		−21		
CaF_2	Флюорит	Твердая → жидкая	1392	220	Пониж. т. затверд.	5
$(CaMg)_4Si_3O_{10}$	Акерманит	Твердая → жидкая	1458	380±65	Теплосодерж.	7
$CaMg(SiO_3)_2$	Диопсид	Твердая → жидкая	1391,5	(445±65)	„	8
				430	Пониж. т. затверд.	9
$CaSiO_3$	Псевдоволластонит →	Волластонит	17	−45,5	Теплосодерж.	10
	Псевдоволластонит →	жидкая	1512	483	Пониж. т. затверд.	11
Ca_2SiO_4	Ларнит	$\beta \rightarrow \gamma$	20	26,8	Теплосодерж.	12
$CaSO_4$	Ангидрит	Твердая → жидкая	1297	201	Пониж. т. затверд.	13
Cu	Медь	Твердая → жидкая	1084	200	Теплосодерж.	Теплоемк.
CuO	Тенорит	Твердая → жидкая	1447 ±	148	Пониж. т. затверд.	14
Cu_2O	Куприт	Твердая → жидкая	1230	391±	„ „ „	15
Cu_2Se	Берцелианит	$\alpha \rightarrow \beta$	110	23±1	Теплосодерж.	16
Cu_2S	Халькозин	$\alpha \rightarrow \beta$	103	35,2	„	16
				Точно неизвестно		
Fe	Железо (точка Кюри)	$\alpha \rightarrow \beta$	755		„	20
		$\beta \rightarrow \gamma$	903	16,36	„	20
		$\gamma \rightarrow \delta$	1401	78,6	„	20
		Твердая → жидкая	1530	279	Пониж. т. затверд.	21
Fe_3O_4	Магнетит	Точка Кюри	576	Невелико	Теплосодерж.	Теплоемк.
Fe_2O_3	Гематит	Аморфн. → α	33	341		22
Fe_2SiO_4	Фаялит	Твердая → жидкая	1205	295	Пониж. т. затверд.	23
FeS	Троилит	α → β	138	50	Теплосодерж.	Теплоемк.
		Твердая → жидкая	1195	240±25	Теплосодерж. + пониж. т. затверд.	24
H_2O	$Лед_I$	Твердая → жидкая	0	332	Теплосодерж.	19
KCl	Сильвин	Твердая → жидкая	770	360	„	33
KNO_3	Селитра	$\alpha \rightarrow \beta$	128	58,5	„	Теплоемк.
		Твердая → жидкая	338	117,5	„	„
$KAlSi_2O_6$	Лейцит	Твердая → жидкая	1686±5	130	Пониж. т. затверд.	34
$KAlSi_3O_8$	Микроклин →	Стекло	20	348	+ диф. тепл. раств.	
	(Адуляр) Ортоклаз →	Стекло	20	418	Диф. тепл. раств.	35
$K_2Si_4O_9$		$\alpha \rightarrow \beta$	592	9,6±1	Теплосодерж.	36
		Твердая → жидкая	765	147±30	„	36
Li_2SiO_3		Твердая → жидкая	1177	336	„	27
Li_4SiO_4		Твердая → жидкая	1249	260	„	27
$MgCl_2$	Хлормагнезит	Твердая → жидкая	712	356	Пониж. т. затверд.	28
MgF_2	Селлаит	Твердая → жидкая	1221	396	„ „ „	29
$6MgO \cdot MgCl_2 \cdot 8B_2O_3$	Борацит	$\alpha \rightarrow \beta$	265	12,4	Теплосодерж.	Теплоемк.
$MgSiO_3$	Энстатит	Твердая → жидкая	1524	616	Пониж. т. затверд.	30

Продолжение табл. 3—XVI

Соединение	Минерал	Изменение фазы	Температура, °С	Δh, джоули на грамм	Метод*	Ссылка, примечание
Mg_2SiO_4.....	Форстерит	Твердая→жидкая	1890	455	Пониж. т. затверд.	31
$MnSiO_3$		Твердая→жидкая	1274	270	Пониж. т. затверд. + диф. тепл. раств.	32
NaCl.....	Галит	Твердая→жидкая	800	530	Теплосодерж.	39
Na_3AlF_6	Криолит	Твердая→жидкая	1000±	330	»	40
$NaNO_3$		Твердая→жидкая	310	185	»	Теплоемк
$NaAlSi_3O_8$	Альбит	Твердая→жидкая	1105	203	Пониж. т. затверд.	41
$NaAlSiO_4$.....	Карнегиит	(β-нефелин)→жидкая	1526	340	» » »	42
Na_2SiO_3		Твердая→жидкая	1087	343	» » »	43
$Na_2Si_2O_5$		Твердая→жидкая	884	193	» » »	43
PbS.....	Галенит	Твердая→жидкая	1114	73	» » »	25
$PbSO_4$	Англезит	Твердая→жидкая	1090±	133	» » »	26
S	Сера	Ромбическая → моноклин.	95,6	11±1	Теплосодерж.	44a
		Моноклин.→жидкая	119	38,5	»	44d
		Жидкая→вязкая	160	11,5	»	44
Sb_2S_3.....	Стибнит	Твердая→жидкая	546	123	Пониж. т. затверд.	3
SiO_2	α-кварц→β-кварц		575	14,6	Теплосодерж.	37a
	α- кристобалит → β - кристобалит		250	13,2	»	37b
	β-кристобалит→α-кварц		77	—117	Диф. тепл. раств.	37c
	Кварц→ жидкая		1470	244	» » »	37d
	Кристобалит →Жидкая фаза		1713	142	Терм. анал.	37e
TiO_2	Рутил	Твердая→жидкая	1825	597±	Пониж. т. затверд.	2
Zn_2SiO_4	Виллемит	Твердая→жидкая	1509	170	Теплосодерж.	35
ZnS	Сфалерит	Твердая→жидкая	(1645)±	391±	Пониж. т. затверд.	45

* Метод: Теплосодерж. — по данным теплосодержания. Диф. тепл. раств.—по данным о дифференциальных теплотах растворения. Пониж. т. затверд. —по понижению точки затвердевания. Теплоемк. — данные получены здесь из литературы по промежуточным теплоемкостям; ссылки можно найти в разделе: Теплоемкости. Терм. анал. — термический анализ.

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 2—XVI

1. Roth, Troitzsch, Zeit. ang. Chem., 40, 198, 1936.
2. Вычислено (К. К.) из системы Al_2O_3—TiO_2 (Bunting, Bur. Standards Journ. Research, 11, 719, 1933).
3. Вычислено (К. К.) из системы Sb_2S_3—SnS (Parravan, de Cesario, Gazz. Chem. 81, 257, 1912).
4. Вычислено (К. К.) из системы $BaSO_4$—Na_2SO_4 (Calcagni, Atti accad. Linei, 21, 483, 1912) и $BaSO_4$—K_2SO_4 (Calcagni, op. cit.; Grahmann, Zeit. anorg. hem. 81, 257, 1912).
5. Вычислено (К. К.) из системы CaF_2—AlF_3 (Федотов Г. П. и Ильинский В. А., Fedotoff, Iljinsky, Zeit. anorg. Chem., 80, 113, 1913) и CaF_2—$Ca_3(PO_4)_2$ (Nacken, Zentr. Mineral. Geol., 530, 1912).
6. Среднее вычислено (R.W.G.) из диаграммы альбит—анортит (Bowen, Am. J. Sci., 35, 577, 1913, приводит ту же самую величину). Начальное понижение т. затвердевания, дает 407 дж./г. Система диопсид—анортит дает 370 дж./г; система лейцит—анортит 392 дж./г. и система карнегиит—анортит 373 дж./г.
7. Vogt, Silikatschmelze, 1904.
8. White, Am. Journ. Sci., 28, 486, 1909 (Vogt, Silikatschmelze, 1904, дает 427 ± ± 65 дж./г. как теплоту плавления).
9. Вычисление (R.W.G.) из системы диопсид—анортит (Bowen, Zeit. anorg. Chem., 94, 23, 1916) дает 450 дж/г; из системы диопсид—лейцит (Bowen, Schairer, Am. Journ. Sci., 18, 301, 1929)—407 дж./г. За среднюю величину принял 430 дж./г. Наклоны кривых для систем диопсид—форстерит и диопсид—кремнезем недостаточно ясны для вычисления.
10. Wagner, Zeit. anorg. Chem., 208, 19, 1932. Температура превращения волластонита в псевдоволластонит равна 1190 ± 10° С, для которой приводимая величина 45,5 дж/г является приближенной.

11. Вычислено из системы $CaSiO_3 — MgSiO_3$ (Allen, White, Am Journ. Sci., 27, I, 1909).
12. Johannson, Thorvaldson, Journ. Am. Chem. Soc., 56, 2327, 1934.
13. Вычислено (К. К.) из системы $CaSO_4—K_2SO_4$ (Müller, Neues Jahrb. Mineral. Geol., Beilage Bd., 30, I, 1910; Grahmann, Zeit. anorg. Chem. 81, 257, 1912).
14. Вычислено (К. К.) из системы $CuO—Cu_2O$ (Roberts, Smyth, Journ. Am. Chem. Soc., 43, 1061, 1921).
15. Вычислено (К. К.) из системы $Cu_2O—CuCl$ (Truthe, Zeit. anorg. Chem., 76, 161, 1912).
16. Bellati, Lussana (см. Теплоемкость).
17. Вычислено (К. К.) из систем $Cu_2S—CuCl$ (Truthe, Zeit. anorg. Chem., 76, 161, 1912), $Cu_2S—Ni_2S_3$ и $Cu_2S—Ni_2S$ (Friedrich, Metall u. Erz, 11, 160, 1914).
18. Для теплосодержания см. Теплоемкость. Теплота плавления, вычисленная по средним наклонам кривых затвердевания, равна 63 дж./г.
19. Barnes, Maass, Can. Journ. Research, 3, 205, 1930.
20. Umino, Sci. Repts. Tohoku Univ., 18, 104, 1929; Tammann, Bandel, Arch. Eisenhüttenw., 7, 571, 1934; Steinwehr, Schulze, Zeit Metallkde, 27, 129, 1935; Awbery, Griffiths, Proc. Roy. Soc., A174, I, 1940. Превращение точки Кюри распространяется на температурный интервал с высшей точкой у 755°. Данные недостаточно хорошие и не могут дать точных указаний о том, является ли снижение при этой температуре бесконечным или нет. Одно интегрирование дает величину 20 дж./г для теплоты превращения.
21. Средняя величина (К. К.) вычислена из системы Fe—Au (Isaac, Tammann, Zeit. anorg. Chem., 55, 63, 1907) и Fe—P (Константинов Н. С., Konstantinow, Zeit. anorg. Chem., 66, 209, 1910) и Fe—Sb (Курнаков Н. С. и Константинов Н. С., Kurnakow, Konstantinow, Zeit. anorg. Chem. 58, I, 1908).
22. Fricke, Klenk, Zeit. Electrochem., 41, 617, 1935.
23. Вычислено (R. W. G.) из системы форстерит — фаялит (Bowen, Schairer, Am. Journ. Sci., 29, 151, 1935). Vogt (Silikatschmelz, 1904) дает 356±? дж./г для фаялитового шлака.
24. По различным измерениям содержание рассеянного тепла равно $\Delta h'' = 222$ дж./г. Средняя величина вычислена из систем $FeS—Cu_2S$ (Bornemann, Schreyer, Metallurgie, 6, 619, 1909), $FeS—Ag_2S$ (Schoen, Metallurgie, 8, 737, 1905), FeS—Fe (Friedrich, Metallurgie, 7, 257, 1910) и FeS—PbS (Friedrich, Metallurgie, 4, 671, 1907). Среднее дано как 240 дж./г.
25. Вычислено Maier, Rept. Invest. Bur. Mines., 1934.
26. Средняя величина вычислена (К. К.) из систем $PbSO_4—Li_2SO_4$ (Calcagni, Marotta, Atti accad. Lincei, 21, II, 93, 1921) и $PbSO_4—PbMoO_4$ (Jaeger, Germs, Zeit. anorg. Chem., 119, 145, 1921).
27. Schwarz, Sturm, Ber. deut. Chem. Ges., 47, 1730, 1914.
28. Среднее вычислено (К. К.) из систем $MgCl_2—AgCl$,—$CaCl_2$,—$CdCl_2$,—CuCl,—KCl,—$PbCl_2$,—$SnCl_2$,—$ZnCl_2$ (Menge, Zeit. anorg. Chem., 72, 162, 1911) и $MgCl_2—BaCl_2$,—$SrCl_2$ (Sandonnini, Atti accad. Lincei, 21, II, 634, 1912).
29. Вычислено (К. К.) из системы $MgF_2—Mg_3(PO_4)_2$ (Winter, Diss. Leipzig, 1913).
30. Вычислено из системы $MgSiO_3—CaSiO_3$ (Allen, White, Am. Journ. Sci., 27, I, 1909). Vogt (Silikatschmelze, 1904) дает 524 дж./г.
31. Вычислено (R. W. G.) из системы форстерит—фаялит (Bowen, Schairer, Am. J. Sci., 29, 151, 1935). Vogt (Silikatschmelze, 1904) дает 544±? дж/г.
32. Из диференц. теплот растворения Mulert (Diss. Göttingen, 1912) получено 271 дж./г. Средняя величина вычислена (К. К.) из систем $MnSiO_3—MgSiO_3$ (Лебедев П., Lebedew, Zeit. anorg. Chem., 70, 301, 1911) и $MnSiO_3—MnTiO_3$ (Смоленский С., Smolensky, Zeit. anorg. Chem., 73, 293, 1911). равна 262 дж./г.
33. Plato, Zeit. phys. Chem., 55, 721, 1906.
34. Величина, вычисленная (R. W. G.) из системы диопсид—лейцит (Bowen, Schairer, Am. Journ. Sci. 18, 301, 1929), равна 130 дж./г. Mulert (Diss. Göttingen, 1912) дает 109 дж./г как диференц. теплоту растворения стекла и кристаллов при комнатной температуре.
35. Mulert, Diss. Göttingen, 1912.
36. Goranson, Kracek, Journ. Phys. Chem. 36, 913, 1932.
37. (*a*) и (*b*) Данные о теплосодержании см. Теплоемкость. (*c*) Troitzsch, Diss. Braunschweig, 1936. (*d*) Roth, Chall (Z. Electrochem. 34, 185, 1928) получили 239 дж./г при 1470° С, Roth, Troitzsch (Arch. Eisenhüttenw., 6, 82, 1932—33) получили 244±7 дж./г из диференц. теплот растворения, Mulert (Diss. Göttingen, 1912) получил 154 дж./г в качестве диференц. теплоты растворения аморфного SiO_2 и кварца при комнатной температуре (е). Эта вели-

чина вычислена из (*d*) и (*c*). Она по существу согласовывается с величиной 159 дж./г, вычисленной из системы SiO_2—TiO_2 (Bunting, Bur. Standarts Journ. Research, 11, 719, 1933) и средней 131 дж./г, полученной Kracek (J. Am. Chem. Soc., 52, 1441, 1930) из изученных им систем.

38. Средняя величина вычислена из систем Ag_2S—AgCl (Sandonnini, Atti accad. Lincei, 21, I, 479, 1912), Ag_2S—FeS (Schoen, Metallurgie, 8, 737, 1905) и Ag_2S—ZnS (Friedrich, Metallurgie, 5, 114, 1908).
39. Roth, Bertram (Zeit. Electrochem., 35, 305, 1929) и Plato (Zeit. phys. Chem. 55, 721, 1906) дают величину в 517 дж./г.
40. Roth, Bertram (Zeit. Electrochem., 35, 305, 1929) дают 331,4 дж./г; некоторые другие данные показывают величину несколько более низкую.
41. Вычислено из системы альбит — анортит (Bowen, Am. Journ. Sci., 35, 577, 1913).
42. Вычислено (R. W. G.) из систем карнегиит — анортит (Bowen, Am. Journ. Sci., 33, 551, 1912) и карнегиит — калиофилит (Bowen, Am. Journ. Sci., 43, 121, 1917).
43. Вычислено из Na_2SiO_3 — $N_2Si_2O_5$ — $NaAlSiO_4$ (Tilley, Mineralog. petrog. Mitt., 43, 406, 1933).
44. См. ссылки для теплоемкости: (*a*) Neumann, Zeit. phys. Chem., 171A, 416, 1934, (*b*) Monval.
45. Вычислено (K. K.) из системы ZnS—Ag_2S (Friedrich, Metallurgie, 5, 114, 1908).

Таблица 4—XVI

Теплоемкость газов

Газ	Плотность, в г/л (нормальная)	Теплоемкость C_p (джоули на грамм) при температурах, °C			Константы для уравнения $C_p=a+bT-cT^{-2}$; дж./г; (T°K)			Диапазон температур, °C	Ссылка
		0	400	1200	a	10^3b	$10^{-5}c$		
Воздух	1,2920	1,004	1,057	1,16	0,968	0,132	0	0–2000	1
Ar	1,782	0,521	0,521	0,521	0,521	0	0	0—	2
Br_2	7,1308	0,225	0,232	0,236	0,223	0,01	0	0—1400	3
CH_4	0,7152	2,16	3,50		1,886	2,5	0,304	0—1000	6
Cl_2	3,1638	0,497	0,511	0,537	0,488	0,033	0	0—1700	7
CO	1,2492	1,04	1,103	1,245	0,980	0,18	0	0—2000	4
CO_2	1,9630	0,82	1,12	1,32	0,894	0,7	0,197	0—2000	5
F_2	1,6954	0,774	0,818	0,906	0,744	0,11	0	0—2700	3
H	0,045	20,6	20,6	20,6	20,6	0	0	0—	2
H_2	0,899	14,23	14,87	16,14	13,796	1,59	0	0–2000	8
HBr	3,6104	0,363	0,381	0,416	0,352	0,434	0	0—1700	9
HCl	1,6269	0,795	0,834	0,911	0,769	0,096	0	0—1700	10
He	0,1785	5,2	5,2	5,2	5,2	0	0	0—	2
HF	0,8926	1,431	1,50	1,634	1,384	0,169	0	0—1700	3
Hg	8,9501	0,104	0,104	0,104	0,104	0	0	0—	2
Hg_2	17,9003	0,094	0,094	0,094	0,094	0	0	0—	
HI	5,7075	0,234	0,245	0,266	0,227	0,027	0	0–1700	9
H_2O		1,847	2,052	2,478	1,69	0,535	—0,008	0—2000	11
H_2S	1,5203	1,025	1,21	1,527	0,962	0,385	0,0314	0—1500	12
I_2	11,3250	0,15	0,15	0,15	0,15	0	0	0—	
K	1,7444	0,532	0,532	0,532	0,532	0	0	0—	2
K_2	3,4889	0,482	0,482	0,482	0,482	0	0	0—1700	
Kr	3,7365	0,25	0,25	0,25	0,25	0	0	0—	2
N_2	1,2499	1,037	1,08	1,21	0,962	0,167	—0,021	0–1500	13
Na	1,026	0,904	0,904	0,904	0,904	0	0	0—	2
Na_2	2,052	0,82	0,82	0,82	0,82	0	0	0—	
Ne	0,9005	1,03	1,03	1,03	1,03	0	0	0—	2
NH_3	0,7598	2,06	2,74	3,86	1,822	1,395	0,1102	0—1500	14
NO	1,3388	1,00	1,047	1,142	0,968	0,118	0	0—2000	15
N_2O	1,9638	0,85	0,954	1,162	0,779	0,26	0	0—2000	16
O_2	1,4277	0,916	1,025	1,143	0,944	0,136	0,0486	0—2000	17
OH	0,7588	1,76	1,59	1,93					18
P_2O_5	6,3371		1,084	1,084	1,084	0	0	360—1100	19
S_2	2,8607	0,565	0,573	0,589	0,56	0,0196	0	30—2000	3
SO_2	2,858	0,61	0,79	0,875	0,762	0,082	0,132	0—2000	20
Xe	5,8579	0,158	0,158	0,158	0,158	0	0	0—	2

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 4—XVI

1. Bradley, Hales, Phys. Rev., 29, 258, 1909; Noell, Forschg. Ing.-Wes., 184, 1916; Jakob, Zeit. techn. Phys. 4, 460, 1923; Hansen, Forschg. Ing.-Wes., 274, 1926; Roebuck, Proc. Am. Acad., 60, 537, 1925; 64, 237, 1930.
2. Теплоемкость идеального одноатомного газа (при постоянном давлении) равна (5/2) R.
3. Eastman, Tech. Paper 445, Bureau Mines, 1929.
4. Gordon, Barnes, Joyrn. Phys. Chem. 36, 1143, 1932; Giauque, Overstreet, Journ. Am. Chem. Soc., 54, 1731, 1932; Sherrat, Griffiths, Proc. Roy. Soc., A 147, 292, 1934; Johnston, Davis, Journ. Am. Chem. Soc., 56, 271, 1934; Pauling, Journ. Am. Chem. Soc., 57, 2680, 1935.
5. Eucken, Lüde, Zeit. phys. Chem. 5B, 413, 1929; Chopin, C. R., 188, 1660, 1929; Henry, Proc. Roy. Soc., A 133, 492, 1931; Gordon, Barnes, Journ. Phys. Chem., 36, 1143, 1932; Kassel, Journ. Am. Chem. Soc., 56, 1838, 1934; Eucken, Bertram, Zeit. phys. Chem., 31B, 361, 1936; Sherrat, Griffiths, Proc. Roy. Soc., 156, 504, 1936.
6. Dickinson, Dillon, Rasetti, Phys. Rev., 34, 582, 1929; Eucken, Lüde, Zeit phys. Chem., 5B, 413, 1929; Giauque, Blue, Overstreet, Phys. Rev., 38, 196, 1931; McDougall, Phys. Rev., 37, 2074, 1931; Gordon, Barnes, Journ. Phys. Chem., 36, 2601, 1932.
7. Partington, Physik. Zeit. 15, 601, 1914; Eucken, Hoffman, Zeit. phys. Chem., B5, 442, 1929; Giauque, Overstreet, Journ. Am. Chem. Soc., 54, 1731, 1932; Trautz, Ader, Zeit. Phys., 89, 15, 1934.
8. Giauque, Journ. Am. Chem. Soc., 32, 4816, 1930; Jeppesen, Phys. Rev. 44, 165, 1933; Davis, Johnston, Journ. Am. Chem. Soc., 56, 1045, 1934; Для D_2 см.: Johnston, Long, Journ. Chem. Phys. 2, 389, 1934; Clusius, Bartholomé, Zeit. phys. Chem. 30, 258, 1935.
9. Austin, Journ. Am. Chem. Soc., 54, 3459, 1932.
10. Giauque, Overstreet, Journ. Am. Chem. Soc., 54, 1731, 1932; Austin, Journ. Am. Chem. Soc. 54, 3459, 1932.
11. Gordon, Journ. Chem. Phys., 2, 65, 549, 1934; См. также Keenan, Keyes, Термодинамические свойства пара, New York, 1936; Koch. VDI — Wasserdampftafeln, Berlin, 1937.
12. Dennison, Wright, Phys. Rev., 38, 2077, 1931; Cross, Journ. Chem. Phys. 3, 825, 1935; Clusius, Frank, Zeit. phys. Chem., 34B, 420, 1936.
13. Chopin, C. R. 188, 1660, 1929; Henning, Justi, Zeit. techn. Phys., 11, 191, 1930; Giauque, Overstreet, Journ. Am. Chem. Soc., 54, 1731, 1932; Henry, Proc. Roy. Soc., A133, 492, 1932; Wohl, Magat, Zeit. phys. Chem., B19, 117, 1932; Johnston, Davis, Journ. Am. Chem. Soc., **56, 271, 1934,** Eucken, Bertram, Zeit. phys. Chem., B31, 361, 1936.
14. Eastman (см. [3]); Wright, Randall, Phys. Rev., 44, 391, 1933; Overstreet, Giauque, Journ. Am. Chem. Soc. 59, 254, 1937.
15. Heuse, Ann. Phys., 59, 86, 1919; Partington, Shilling, Phil. Mag., 45, 416, 1923; Eucken, L. d'Or, Götting. Nachr. 107, 1932; Johnston, Chapman, Journ. Am. Chem. Soc., 55, 153, 1933.
16. Eucken, Lüde, Zeit. phys. Chem., 5B, 413, 1929; Eucken, Mücke, Zeit. phys. Chem. 18B, 167, 1932, Kassel, Journ. Am. Chem. Soc., 56, 1838, 1934.
17. Holborn, Austin, Wiss. Abh. phys.-techn. Reichsanst., 4, 131, 1905; Birge, Sponer, Phys. Rev., 28, 259, 1926; Eucken, Lüde, Zeit. phys. Chem., B5, 413, 1929; Eucken, Mücke, Zeit. phys. Chem. 18B. 167, 1932; Johnston, Walker, Journ. Am. Chem. Soc., 55, 172, 1933; 57, 682, 1935; Henry, Proc. Roy. Soc., A 133, 492, 1932; Lewis, Elbe, Journ. Chem. Phys. 2, 890, 1934; Journ. Am. Chem. Soc., 57, 1399, 1935.
18. Bonhoeffer, Reichardt (Концентрац. OH в водяном паре при высокой температуре), Zeit. phys. Chem. 139, 75, 1928; Johnston, Dawson, Journ. Am. Chem. Soc., 55, 2744, 1933.
19. Frandsen, U. S. Bur. Standards Journ. Research, 10, 35, 1933.
20. Eastman (см. 3); Cross, Journ. Chem. Phys., 3, 825, 1935; Brown, Manov, Journ. Am. Chem. Soc., 59, 500, 1937.

ГЛАВА XVII

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ДИФФУЗИЯ

Содержание

Таблица 1—XVII. Теплопроводность отдельных кубических кристаллов 234

» 2—XVII. Теплопроводность отдельных некубических кристаллов 235

» 3—XVII. Теплопроводность кристаллических порошков, сцементированных сжатием до 8000 ат . . . 237

» 4—XVII. Теплопроводность горных пород 238

» 5—XVII. Влияние смачивания и простого сжатия на теплопроводность некоторых горных пород . 243

» 6—XVII. Теплопроводность почвы, снега, льда 243

» 7—XVII. Теплопроводность стекол 244

» 8—XVII. Теплопроводность некоторых обычных металлов 245

» 9—XVII. Теплопроводность разных материалов . . . 245

» 10—XVII. Теплопроводность некоторых обычных жидкостей в зависимости от давления и температуры 247

» 11—XVII. Влияние гидростатического давления на теплопроводность твердых тел 248

ВВЕДЕНИЕ

В изотропном однородном материале проводимость тепла зависит от одной «константы», известной как теплопроводность; эта «константа» является функцией температуры, давления и других переменных. Количество тепла dQ, протекающего в единицу времени через элемент поверхности dS, выражается основным уравнением $dQ = -K \frac{dT}{dn} dS$, где K — коэфициент теплопроводности, а dT/dn — градиент температуры в направлении, перпендикулярном к поверхности элемента dS. Обычно употребляются две единицы теплоты системы «c.g.s.»: калория (граммкалория) и джоуль; 1 кал. равна $4{,}18_5$ джоуля. Если в качестве основных единиц использовать сантиметр, секунду и градус Цельсия, то соответствующими единицами для теплопроводности будет: кал·сек.$^{-1}$··см$^{-1}$ град.$^{-1}$ и ватт·см$^{-1}$ град.$^{-1}$ (1 ватт равняется 1 джоулю/сек.).

$$1\ кал \cdot сек^{-1}\ см^{-1} \cdot град^{-1} = 4{,}18_5\ ватт \cdot см^{-1} \cdot град^{-1};$$

$$1\ ватт \cdot см^{-1} \cdot град^{-1} = 0{,}239\ кал \cdot сек^{-1} см^{-1} \cdot\ град^{-1}.$$

В инженерной практике иногда встречается британская единица теплоты на квадратный фут на час для температурного градиента в 1° Фаренгейта на дюйм; эта единица равна

$$3{,}45 \cdot 10^{-4}\ кал. \cdot сек.^{-1}\ см^{-1}\ град.\,(C)^{-1}.$$

Проблема скорости изменения температуры включает также вопрос о коэфициенте диффузии, обозначенном здесь через h^2. Он дан в значениях коэфициента K, плотности ρ и теплоемкости на единицу массы σ зависимостью: $h^2 = K/\sigma\rho$. Таким образом h^2 выражено в см^2 · сек$^{-1}$.

В кристаллах некубической системы коэфициент теплопроводности различен для различных направлений, и поток тепла в этих кристаллах определяется двумя или тремя коэфициентами теплопроводности по главным направлениям; они измерялись в сравнительно редких случаях, хотя их соотношения были приблизительно определены для значительного количества кристаллов, главным образом Джаннетазом. По теории теплопроводности в кристаллах можно обратиться или к книге *W. Voigt*, «Kristallphysik», или к книге *W. A. Wooster*, «Crystal physics».

В следующей сводке не приведены все измеренные соотношения коэфициентов теплопроводности по главным направлениям; добавочные

данные можно найти в Intern. Crit. Tables или в сводке *K. Schulz*, Fortschritte der Mineralogie, 9, 345—411, 1924.

Большинство материалов, представляющих геологический интерес, неоднородны, и кристаллы, из которых они состоят, являются преимущественно низкой симметрии. Основная зависимость, приведенная выше, в таких случаях недействительна для бесконечно малых элементов. Однако, если не имеется больших отклонений от изотропии, то для получения зависимости между средним тепловым потоком и средним градиентом температуры может быть достаточно только одной теплопроводности, определенной на достаточно крупном образце. В других случаях такие факторы, как слоистость, сланцеватость или спайность, могут привести к заметным различиям в теплопроводности по различным направлениям.

Таблицы этой главы дают более или менее показательные величины, отобранные из обширной литературы, причем предпочтение отдано изучению достаточно хорошо определенных материалов. Исчерпывающую сводку литературы, вплоть до 1924 г., опубликовал К. Шульц (см. выше). Составители не пытались охватить работы по металлам или чисто промышленным материалам, которые изложены в обычных сводках.

В таблице для отдельных кристаллов (табл. 1 — XVII) опущен ряд низкотемпературных определений на кристаллах металлов. Лишь немногим из исследователей теплопроводности горных пород удалось дать исчерпывающее описание (если вообще удалось это кому-либо) этих материалов; ряд факторов, влияющих на теплопроводность, изучен недостаточно. Поэтому казалось существенным включить значительно большее количество измерений, чем это потребовалось бы, если предмет был бы изучен более систематически. Величины могут скорее служить как показатели теплопроводности горных пород, чем как определенные цифры для некритического использования. Несмотря на широкий диапазон величин для некоторых типов, нет уверенности в том, что были наблюдены возможные крайние пределы; не следует забывать о возможности большой ошибки при эксперименте. Даже для сравнительно хорошо известных слабых проводников, как кварцевое стекло, измерения, произведенные опытными исследователями, различались на 30—50%. Неудивительно, что были получены такие широкие пределы величин для материалов, упоминаемых под обычными геологическими названиями, ибо эти материалы были подвержены случайностям геологической истории.

Величины теплопроводности, приведенные в скобках, определены косвенным путем; они зависят от сопровождающих их непосредственно измеренных коэфициентов диффузии h^2.

Там, где температура не указана, она обычно соответствует комнатной температуре.

Таблица 1—XVII

Теплопроводность отдельных кубических кристаллов

(Для перевода в кал·сек$^{-1}$·град.$^{-1}$ следует умножить на 0,239)

Кристалл	Температура, °С	Теплопроводность, $\frac{\text{ватт}}{\text{см·град.}} \cdot 10^{-3}$	Ссылка
Al	—190	2080	11
	30	2080	3
	76,4	2300	
	127,4	2310	10
	163,9	2330	
Au	—190	3320	11
Cu	—190	5570	11
	0	4100	19
	19,4	4140	13
C (алмаз)	—252	590—1260	
	—185	1050—1680?	7
	0	1210—1630	
	72	1340—1720	
	—184	14300?	5
W	—190	2320	11
	—185	2440	6
CaF_2 (флюорит)	—190	391	7
	—78	151	
	0	103	
	100	80	
	0	106	16
	100	78	
KBr	—193	140	5
KCl (сильвин)	—190	211	7
	0	69,6	
	100	49,2	
	—190	158	8
	0	75,3	
искусственный из расплава	—190	400	8
	0	92,4	
искусственный	—191	366	5
NaCl (галит)	—190	267	7
	— 78	104,5	
	0	69,7	
	100	48,5	
	30	57,8	15
	8	42	20
	30	36,8	2
	75	31,6	
	0	61,0	1
	100	42,0	
	200	31,2	
	300	24,9	
	400	20,8	
искуственный из расплава	—190	338	8
	0	89	
искуственный из раствора	—190	361	8
	0	95,5	
$NaClO_3$	0	11,1	8
$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O$ (анальцим)	0	34,2	8
FeS_2 (пирит)	0	379	8
ZnS (сфалерит)	0	266	8
Калиевые квасцы	0	19,9	8
Хромовокалиевые квасцы	0	18,3	8

Таблица 2—XVII

Теплопроводность отдельных некубических кристаллов

Абсолютные величины, необходимые и достаточные для определения теплопроводности в любом направлении, определялись только для кристаллов тригональной и гексагональной систем. Для этих систем требуется определение коэфициентов теплопроводности по двум главным направлениям: $K_{\parallel}$ и $K_{\perp}$; $K_{\parallel}$ — коэфициент теплопроводности в направлении, параллельном оптической оси или оси с; $K_{\perp}$ — коэфициент теплопроводности в направлении, перпендикулярном к этой оси. Коэфициент теплопроводности в некотором направлении, образующем угол φ с оптической осью, определяется по уравнению: $K\varphi = K_{\perp} \sin^2\varphi + K_{\parallel} \cos^2\varphi$.

(Для перевода в кал. · сек$^{-1}$ · см$^{-1}$ · град.$^{-1}$ следует умножить на 0,239)

Кристалл	Система	Температура, °С	$K_{\parallel}$	$K_{\perp}$	Ссылка
			$\frac{\text{ватт}}{\text{см}\cdot\text{град}} \cdot 10^{-3}$		
C (графит)	Гексагон.	30	887*	3550	14
Bi	Гексагон.	18	66,5	92,5	12
Cd.....	Гексагон.	20	831	1041	11
Hg.....	Тригон.	—187	1670	1210	18
		— 77	1430	1105	
Zn.....	Гексагон.	20	1242	1242	11
		57	1009	1068	4
$CaCO_3$ (кальцит)..	Тригон.	0	53,8	45,1	8
		—190		158	7
		— 78		57,7	
		0		42,9	
		100		35,7	
		~8	40,2	33,0	20
		~30	41,8	35,2	15
		0	40,9	34,8	1
		100	29,0	27,2	
		200	25,5	23,7	
		300	22,9	21,6	
		400	21,3	20,6	
Fe_2O_3 (гематит)...	Тригон.	30	121	147	14
SiO_2 (α-кварц)	Тригон.	~8	110	67	20
		—190	491	246	7
		— 78	196	101	
		0	136	72,5	
		100	90	55,6	
		0	102		9
		68,1	93		
		104,3	77,8		
		25		61,5	
		70,4		54,0	
		105,5		48,5	
		~30	125	66,1	15
		0	114,3	68,2	1
		100	79,5	49,4	
		200	63,2	40,6	
		300	51,5	35,2	
		400	43,1	31,0	

* Вычислено при $K_{\perp}/K_{\parallel} = 4{,}0$.

В некоторых случаях абсолютные значения коэфициентов теплопроводности некубических кристаллов были опубликованы без приведения сведений об ориентировке испытуемых образцов. Для некоторых из этих кристаллов известно, что отношения коэфициентов теплопроводности по главным направлениям приблизительно равны 1, так что указанные величины могут считаться приблизительно средними коэфициентами теплопроводности. *A*, *B* и *C* являются главными коэфициентами теплопроводности по трем взаимноперпендикулярным осям; для исчерпывающего описания теплопроводности требуется также знание ориентировки этих осей по отношению к кристаллографическим осям. Для кристаллов ромбической системы эти две группы осей совпадают.

Продолжение табл. 2—XVII

Кристалл, система	Температура, °C	K, $\frac{\text{ватт}}{\text{см}\cdot\text{град.}}\cdot 10^{-3}$ (ориентировка неизвестна)	Ссылка
$BaSO_4$ барит, ромбич. (A/C=1,13, B/C=1,05)	0	17,3	16
	100	15,1	
$SrSO_4$, целестин, ромбич.	0	18,8	16
	100	15,3	
$CuSO_4\cdot 5H_2O$, ромбич.	0	22,6	8
$MgSO_4\cdot 7H_2O$, ромбич.	0	24,1	8
$MgSO_4(NH_4)_2SO_4\cdot 6H_2O$, моноклин.			
парал.?	0	20,3	8
перпенд.?	0	21,2	
$MgSO_4K_2SO_4\cdot 6H_2O$, моноклин.	0	20,3	8
$K_2Cr_2O_7$, моноклин. или триклин,			
парал.?	0	17,9	8
перпенд.?	0	20,5	-
$K_4Fe(CN)_6\cdot 3H_2O$, моноклин.	0	17,7	8
Топаз $(AlF)_2SiO_4$, ромбич. (A/C=0,94, B/C=0,95)	0	234	8
Турмалин, тригон. (A/C=1,35=B/C)	0	45,2	8
Берилл, гексагон. (A/C=0,83=B/C)	0	83,8	8
Ортоклаз, моноклин. (A/C=0,63, B/C = = 0,90)	0	41,7	8
Андалузит ($Al_2O_3\cdot SiO_2$), ромбич.	0	110	8

Отношения теплопроводностей по главным направлениям определялись также и для других минералов, для которых, кажется, не имеется абсолютных величин. Приводим некоторые из этих отношений.

Материал	Система	A/C	B/C
Роговая обманка	Моноклин.	0,50	0,64
Рутил TiO_2	Тетрагон.	0,62	
Ильменит $FeTiO_3$	Тригон.	1,23	
Пирротин Fe_7S_8	Гексагон.	1,14	
Сидерит $FeCO_3$	Тригон.	1,12	
Корунд Al_2O_3	»	0,85	
Магнезит $MgCO_3$	»	1,10	
Ангидрит $CaSO_4$	Ромбич.	0,94	0,89
Гипс $CaSO_42H_2O$	Моноклин.	0,64	0,42
Апатит	Гексагон.	0,85	
Доломит $CaMg(CO_3)_2$	Тригон.	1,10	
Слюда (мусковит)	Моноклин.	5,84	6,30
Sb	Тригон.	2,53	
Te	Гексагон.	0,66	

* Для слюды C лежит между 0,008 и 0,0008 ватт · $см^{-1}$ · град. $^{-1}$, в зависимости от температуры и давления; ссылки 9, 17.

Таблица 3—XVII

Теплопроводность кристаллических порошков, сцементированных сжатием до 8000 ат

(Все измерения произведены при 0°С; [8])

Кристалл	Теплопроводность, $\frac{\text{ватт}}{\text{см}\cdot\text{град}}\cdot 10^{-3}$	Кристалл	Теплопроводность, $\frac{\text{ватт}}{\text{см}\cdot\text{град}}\cdot 10^{-3}$
KF	70,8	RbCl	19,8
KCl	98	RbBr	38,0
KBr	36,5	RbI	32,4
KI	30,6	NH_4Cl	24,4
NaF	100,5	NH_4Br	23,8
NaCl	78	$Ba(NO_3)_2$	14,3
NaBr	24,2	KNO_3	20,5

Примечание. Измерения, произведенные на порошках, обычно мало употребительны, за исключением специальных технических применений; они, как правило, не дают надежных сведений относительно теплопроводности цельного материала. Вышеприведенные измерения, произведенные на сильно сжатых кубических кристаллах, вероятно, достаточно показательны для отдельных кристаллов.

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦАМ 1—XVII—3—XVII

1. Birch, Clark, Am. Journ. Sci. 238, 529 and 613, 1940.
2. Bridgman, Am. Journ. Sci. 7, 81, 1924.
3. Calthrop, Proc. Phys. Soc. Lond. 38, 207, 1926.
4. Cinnamon, Phys. Rev. 46, 215, 1934.
5. DeHaas, Biermasz, Physica 2, 673, 1935; 4, 752, 1937; 5, 47, 1938.
6. DeHaas, de Nobel, Physica 5, 449, 1938.
7. Eucken, Ann. Phys. 34, 185, 1911; Verh. D. Phys. Ges. 13, 829, 1911.
8. Eucken, Kuhn, Zeit. f. phys. Chem. 134, 193, 1928.
9. Griffiths, Kaye, Proc. Roy. Soc. 104, 71, 1923; Kaye, Higgins, ibid. 113, 335, 1926.
10. Griffiths, Proc. Roy. Soc. 115, 236, 1927.
11. Gruneisen, Goens, Zeit. Phys. 44, 616, 1927; Ann. Phys. 14, 164, 1932.
12. Kaye, Roberts, Proc. Roy. Soc. 104, 113, 1923; Kaye, ibid. 170, 561, 1939.
13. Kannuluik, Laby, Proc. Roy. Soc. 121, 640, 1928.
14. Koenigsberger, Weiss, Ann. Phys. 35, 1, 1911.
15. Lees. Phil. Trans. Roy. Soc. London, 183, 481, 1892; 191; 899, 1898.
16. Muller, Phil. Diss. Univ. Jena, 1913.
17. Powell, Griffiths, Proc. Roy. Soc. 163, 189, 1937.
18. Reddemann, Ann. Phys. 14, 139, 1932.
19. Schott, Ber. D. phys. Ges. 18, 27, 1916.
20. Tuchschmid, Phil. Diss. Zurich, 1883.

Таблица 4—XVII

Теплопроводность горных пород

(при 1 ат)

Порода	Температура, °С	Коэфициент теплопроводности, K		Ссылка
		кал./сек.·см·град. $\cdot 10^{-3}$	ватт/см·град. $\cdot 10^{-3}$	
Гранит	100	5,69	23,8	39
	500	3,80	15,9	
	30	7,2—5,0	30—21	19
($h^2 = 0{,}027$—$0{,}015$)		(9,6—7,7)	(40—32)	44
Япония ($h^2 = 0{,}014$—$0{,}006$)	60	(6,0—2,9)	(25—12)	46
Абердиншайр	30	8,1	34	33
Барр, Вермонт	0	6,66	27,9	9
	50	6,25	26,2	
	100	5,90	24,7	
	200	5,50	23,0	
Вестерли, Рой-Айленд	0	5,80	24,3	
	50	5,60	23,4	9
	100	5,42	22,7	
	200	5,12	21,4	
Скважина Дуббелдевлей, Юж. Америка (среднее из 4 образцов)	25	6,8	28,4	11
Рокпорт, Массачусетс	0	8,4	35,1	9
(Эти величины, вероятно, слишком высоки; см. ссылку)	50	7,8	32,6	
	100	7,2	30,1	
	200	6,5	27,0	
	300	5,9	24,5	
Гранитогнейс		6,7—4,3	28—18	28
		5,1	22	19
Осогна Тессин ($h^2 = 0{,}0156$)		(8,2)	(34)	44
Пельхем, Массачусетс, параллельно листоватости	0	7,42	31	9
	100	6,58	27,5	
Перпендикулярно листоватости	0	5,17	21,6	
	100	4,82	20,1	
Гранит рассланцованный		6,5	27,2	28
Кварцевый монцонит, Калифорния	0	7,56	31,6	9
	50	6,98	29,2	
	100	6,55	27,4	
	200	5,91	24,7	
Кварцево-полевошпатовый порфир, скважина Якоба, Юж. Америка (среднее из 5 образцов)	25	8,0	33	11
Тоналит, Калифорния	0	6,42	26,9	9
	100	5,90	24,7	
	200	5,52	23,1	
Сиенит, Онтарио	50	5,25	22,0	9
	100	5,08	21,3	
	200	4,99	20,9	
Сиенит ($h^2 = 0{,}0089$)	20	(4,43)	(18,5)	44
Диорит, Япония ($h^2 = 0{,}0123$)	60?	(5,52)	(23,1)	46
Андезин, Япония	60?	(3,06)	(13)	46
($h^2 = 0{,}0124$)	20	(7,1)	(30)	44
Трахит	20	(6,0—4,1)	(25—17)	44
Трахит ($h^2 = 0{,}0096$—$0{,}0103$)	17—20	(5,5—6,0)	(23—25)	4

Продолжение табл. 4 — XVII

Порода	Температура, °С	Коэфициент теплопроводности, K		Ссылка
		кал. / сек.·см·град. $\cdot 10^{-3}$	ватт / см·град. $\cdot 10^{-3}$	
Лейцитит, гора Везувий		4,9—4,0	21—17	28
Альбитит, Пенсильвания	0	4,85	20,3	9
	100	4,80	20,1	
	200	4,70	19,7	
	300	4,55	19,0	
Анортозит, Трансвааль (битовнит)	0	4,43	18,5	9
	100	4,54	19,0	
	200	4,69	19,6	
Квебек (лабрадорит)	0	4,13	17,3	9
	100	4,20	17,6	
	200	4,34	18,2	
	300	4,50	18,8	
Монтана (битовнит)	0	4,02	16,8	9
	100	4,10	17,2	
	200	4,27	17,9	
Диабаз, Мэриленд	0	5,62	23,5	9
	100	5,35	22,4	
	200	5,37	22,5	
Диабаз, Вайнел-Хевн, Мэн	0	5,23	21,9	9
	100	5,10	21,3	
	200	5,03	21,1	
	300	4,99	20,9	
Диабаз, Вестфилд, Массачусетс	0	5,04	21,1	9
	100	5,01	21,0	
	200	5,01	21,0	
	300	5,03	21,1	
	400	5,06	21,2	
Диабазовый базальт	30	4,04	16,9	10
	75	4,14	17,3	
„**Трапп**", Калумета и Геклы	50	3,3	14	36
„**Трапп**", Калумета и Геклы ($h^2 = 0{,}0075$)				
„**Трапп**"		5,8—3,5	24—15	20
Амигдалоидная лава (Вентерсдорпская лава, скважина Якоба, Юж. Америка)	25			
(Среднее из 4 проб из интервала глубины от 93 до 359 м)		8,0	33,5	11
(Среднее из 5 проб из интервала глубины от 1068 до 2020 м)		6,9	28,9	11
Силицызированные жильные породы, скважина Герардминнебрун.	25	10,6—7,8	44—33	11
Базальт		5,3—4,3	22—18	39
($h^2 = 0{,}0083$)		(5,3)	(22)	18
Япония ($h^2 = 0{,}0068$)	60?	(3,44)	(14)	46
Средний Рейн ($h^2 = 0{,}0115$)	20	(6,8)	(28)	44
Уин-Силл		3,4	14,2	19
Габбро, Япония ($h^2 = 0{,}0132$—$0{,}0079$)	60?	(7,2—4,3)	(30—18)	46
Слигачан	30	6,1	25,5	33
Скай (Skye)	30	5,9	24,7	33
Френч-Крик, Пенсильвания	0	5,55	23,2	9
	100	5,25	22,0	
	200	5,13	21,5	

Продолжение табл. 4—XVII

Порода	Температура, °С	Коэфициент теплопроводности, K		Ссылка
		кал. / сек.·см·град. $\cdot 10^{-3}$	ватт / см·град. $\cdot 10^{-3}$	
Габбро *(продолжение)*				
Меллен, Висконсин	0	4,75	19,9	9
	100	4,75	19,9	
	200	4,76	19,9	
	300	4,78	20,0	
	400	4,81	20,1	
Бронзитит, Трансвааль	0	11,1	46,3	9
	50	9,2	38,5	
	100	8,5	35,6	
	200	7,8	32,8	
	300	7,3	30,6	
Гиперстенит, Монтана (бронзитит)	0	11,0	46	9
	100	9,3	39	
	200	8,7	36	
Дунит, Бальзам-Гэп, Нов. Каролина (среднее из 3 проб)	0	12,4	52	9
	50	10,5	44	
	100	9,4	39	
	200	8,1	34	
Известняк, Япония ($h^2 = 0{,}012—0{,}005$)		от 6 до 2	от 25 до 9	46
Золенгофен	30	5,24	21,9	10
	75	4,52	18,9	
Золенгофен	0	7,2	30,1	9
	100	5,5	23,1	
	200	4,8	20	
Пенсильвания (углистый):				
параллельно напластованию	0	8,2	34,5	9
	100	7,0	29,5	
	200	6,5	27,4	
перпендикулярно напластованию	0	6,1	25,5	9
	100	5,4	22,6	
	20	5,7	24	39
	350	3,2	13	
	0	5,4	23	13
	100	4,9	20	
„Компактный“		8,1—4,8	34—20	19
„Пористый“		5,3—2,6	22—11	19
Хенкхэм, „нечистый, из осыпи“	17	6,28	26,3	5
„Очень твердый, нечистый, из осыпи“	17	7,95	33,3	5
Известняк („Рама“), доломитизированный, Лонгфорд-Миллс, Онтарио	130	3,9	16	34
	181	3,8	16	
	268	3,7	15	
	377	3,2	13	
Известняк, доломитизированный, Квинстон, Онтарио	123	3,4	14	34
	177	3,4	14	
	254	3,3	14	
	332	3,2	13	
Мел		2,2	9,2	19
Мрамор (17 разновидностей)	30	7,7—5,0	32—21	37
Япония ($h^2 = 0{,}0107$)	60?	(5,5)	(23)	46

Продолжение табл. 4 — XVII

Порода	Температура, °С	Коэфициент теплопроводности, K кал./сек·см·град. $\cdot 10^{-3}$	Коэфициент теплопроводности, K ватт/см·град. $\cdot 10^{-3}$	Ссылка
Мрамор (17 разновидн.) *(продолж.)*				
Каррара ($h^2 = 0{,}0147$)		(8,2)	(34)	44
($h^2 = 0{,}0085$, 0,0099, 0,0103)		(5,5—4,8)	(23—20)	18
Проктор, Вермонт:				
параллельно напластованию	0	7,36	30,8	
	100	6,0	24,9	9
	200	5,2	21,7	
перпендикулярно напластованию	0	7,2	30,1	
	100	5,7	23,9	
	200	5,1	21,1	
	0	7,2	29,9	14
	0	8,9—8,4	37—35	15
	30	7,1	29,8	30
		8,6—4,8	36—20	19
Мрамор (черный), Сант-Альберт, Онтарио	124	3,7	16	34
	210	3,6	15	
	334	3,3	14	
Мрамор (белый), Филлипсбург, Квебек	125	3,4	14	34
	170	3,4	14	
	238	3,6	15	
	342	3,3	14	
Мрамор (коричневый), Сен Марк дэ Карриер, Квебек	118	4,0	17	34
	196	3,6	15	
	245	3,3	14	
	360	2,7	11	
Доломит	0	11,9	49,8	9
	100	9,3	38,9	
	200	8,0	33,3	
Япония ($h^2 = 0{,}0085$)	60?	(4,3)	(18)	46
Скважина Герхардминнебрун (среднее из 7 проб)	25	10,9	45,6	11
Кварцит, Япония ($h^2 = 0{,}031$—$0{,}012$)		(13—7)	(54—27)	46
Витватерсранд, из скважины Герхардминнебрун:				
„полевошпатовый" (4 пробы) 25°		10,7	43,8	11
„неполевошпатовый" (7 проб)		14,2	59,4	
„хлоритизированный" (6 проб)		15,6	65,4	
(среднее из 17 проб)		13,6	56,9	
Кварцитовый песчаник				
параллельно слоистости	0	13,6	56,9	9
	100	10,6	44,4	
	200	9,0	31,7	
перпендикулярно слоистости	0	13,1	54,8	
	100	10,3	43,1	
	200	8,7	36,2	
Кварцит	0	14,9	62,5	13
	100	12,5	52,3	

Продолжение табл. 4 — XVII

Порода	Температура, °С	Коэфициент теплопроводности, K		Ссылка
		кал. / сек.см·град. $\cdot 10^{-3}$	ватт / см·град. $\cdot 10^{-3}$	
Окварцованный сланец	30	9,7	40,6	33
„Перекристаллизованный песчаник"	30	11	46	33
„Твердые песчаники"		10,8—6,2	45—26	19
Песчаник, скважина Борленд	17	10	41,8	5
„Мягкие песчаники"		4	17	19
Песчаник ($h^2 = 0{,}0133$; 0,0046)		(5—2,4)	(21—10)	18
„Глауконитовый песок"		1,9	8	19
Мандельштейн, Калумет и Гекла	50	3,5	14,6	36
Конгломерат, Калумет и Гекла	50	5	21	36
Слюдистый песчаник-плитняк:				
вдоль слоистости		7	29	19
поперек слоистости		4,8	20	
Филлит		7	29	28
Серпентин		7—6	29—25	18
($h^2 = 0{,}0131$)		(7,2)	(30)	46
„Мыльный камень"		8,1	34	47
Сланец, Уэльс:				
параллельно сланцеватости		6,7	28	19
перпендикулярно сланцеватости		3,9	17	
	30	4,7	20	30
Сланец, Пенсильвания, перпендикулярно слоистости	0	4,6	19,4	9
	100	4,2	17,7	
	200	4,1	17,1	
	0	5,2	21,6	13
	100	4,7	19,8	
	60	5,4	22,6	31
Сланец, Медок, Онтарио	120	3,7	16	34
	188	3,9	16	
	304	3,5	15	
Глинистый сланец		4,1—2,4	17—10	19
„Очень мелкозернистый"	17	1,4	5,9	5
„С песком"	17	2,8	11,7	5
Скважина Герхардминнебрун:				
(с глубины 1935 м)	25	6,6	27,6	11
(с глубины 1257 м)	25	4,4	18,4	
Блес (глинистый сланец), скважина Борленд	17	1,4	5,9	5
Фекс (Fakes), скважина Борленд	17	3,25	13,5	5
Илистая глина	17	3,7	15,4	5
„Гольт" (Gault) ($h^2 = 0{,}0037$)		2,7	11,3	42
Ил, Хенкхем (буровая скважина)	17	4,4	18	5
„Нецементированный"	17	5,3	22	
Слюдистый, глинистый	17	2,5	11	
Туф, Япония ($h^2 = 0{,}005$—0,009)		(3,8—1,7)	(16—7)	46
Огнеупорная глина, скважина Борленд	17	4,4	18,3	5
Красный мергель, Хольфорд	17	5,25	22	5
Серый мергель, Хольфорд	17	2,2—3,5	9,3—14,5	5
Каменная соль, Хольфорд	17	17,2	72	5

Таблица 5—XVII

Влияние смачивания и простого сжатия на теплопроводность некоторых горных пород [12]

K_o — теплопроводность сухой, не подверженной сжатию породы при 45° С в $10^{-3} \cdot$кал$\cdot$см$^{-1}\cdot$сек.$^{-1}\cdot$ град.$^{-1}$

ΔK_w — увеличение теплопроводности после намачивания в воде.
ΔK_p — увеличение теплопроводности сухой породы после сжатия до 700 кг/см^2.
K_{wp} — увеличение теплопроводности мокрой породы после сжатия до 700 кг/см^2.
K_m — максимальная наблюденная теплопроводность для сжатой, смоченной породы.

Порода	Объемный вес	Пористость, %	K_o	$\frac{\Delta K_w}{K_o}$, %	$\frac{\Delta K_p}{K_o}$, %	$\frac{\Delta K_{wp}}{K_o}$, %	K_m
Мрамор, Денби, Вермонт ..	2,67	1,1	5,80	11	13	2	6,62
Известняк:							
Золенгофен	2,60	3,4	5,03	23	13		6,19
Бедфорд, Индиана.....	2,31	13,2	4,40	14	7	1	5,06
Бермуда	1,55	43	2,11		22		2,57
Песчаник:							
Даблинг-Гэп, Пенсильвания	2,64	0,5	9,20	13	18	4	10,9
Оул-Каньон, Колорадо ..	2,17	22	4.43	36	30	6	6,3
Глинистый сланец, Сандерленд, Массачусетс	2,67		3,8		10		4,25
Сланец, Пенсильвания	2,76		4,3		4		4,50
Анортозит.....	2,72		4,1		1		4,17
Габбро, Висконсин	2,87		4,5		2		4,60
Слюда, отдельный кристалл	2,83		1,6 7		4		1,74

Таблица 6—XVII

Теплопроводность почвы, снега, льда

Материал	Удельный объем, см^3/г	Влажность в весовых % мокрого образца	Теплопроводность, $\frac{\text{ватт}}{\text{см}\cdot\text{град.}}\cdot 10^{-3}$	Коэффициент диффузии, см^2/сек.	Ссылка
Песок реки Гудзон	0,738	0,2	2,7		35
	0,541	23	16,5		
Тонкий кварцевый порошок ..	1,130	—	1,67		
	0,549	21	22,2		
Грубый кварцевый порошок ..	0,611	—	3,8		
	0,535	24	11,3		
Мелкопесчаный суглинок, Подунк	0,698	0,3	3,3		
	0,525	21	23		
Илистый суглинок, Леонардтаун	0,828	0,8	3,7		
	1,017	15	8,8		
Илистая почва	0,895	4	1,46		
	1,407	40	3,6		
Гальвестонская глина.....	0,949	1,39	2,4		
	0,654	40,3	15	От 0,0072	9
Глина.....			16,9	до 0,0034	46
«Гольт»	0,50		11,3	0,0027	42
Пемза.....		Сухая	2,5		19
		Мокрая	5		
Кварцевый песок.....	0,606	—	(2,6) $\sigma = 0,8$	0,0020	21
	0,572	8,3	(5,9) $\sigma = 1$	0,0034	
Песчанистая глина	0,561	15	(9,2) $\sigma = 1,4$	0,0038	21
Известь насыщенная.....	0,60	43	(7,1) $\sigma = 2,2$	0,0019	21
Снег уплотненный.....	1,85		(4,6) $\sigma = 2,1$	0,0041	21
Лед: 0°С.....			22,3		24
—130°С.....			40,2		
4—6°С			22,2		3
Песчанистая почва				0,009	1

Таблица 7—XVII

Теплопроводность стекол

Стекло	Температура °С	К, $\frac{\text{ватт}}{\text{см}\cdot\text{град.}}\cdot 10^{-3}$	Ссылка
SiO_2 (расплавленный кварц, кварцевое стекло)	—190	6,6	14
	— 78	11,6	
	0	13,9	
	100	19,2?	
	60	13,8	26
	100	14,2	
	200	14,9	
	240	15.2	
	0	11 2	43
	100	12,8	
	300	16,0	
	500	19,2	
	700	22,4	
	900	25,7	
	0	13,6	9
	100	14,8	
	200	16,8	
	300	17,0	
	400	18,5	
	500	20,8	
	0	13,0	22
	100	14,7	
	200	16,5	
	300	18,3	
	400	20,0	
	500	21,8	
Пирекс	30	10,9	10
	75	10,9	
	25	9,8	45
	150	12,1	
	250	13,1	
Пирекс № 774, огнеупорное химическое стекло	0	12,1	9
	100	13,2	
	200	14,4	
	300	15,5	
	400	16,6	
	500	18,3	
„Стекло“, $\rho = 2{,}52$, $\sigma = 0{,}775$ дж./г, $h^2 = 0{,}0055$		(10,6)	18
		7,7	13
Зеркальное стекло	0	9,0	
	100	9,7	31
A	80	9,2	
B	80	11,7	14
Боросиликатовый кронглас	0	13,6	
	100	4,9	
	— 190	10,6	
	— 78	8,0?	28
Обсидиан, Липари	0	13,4	9
Обсидиан, Модок, Калифорния	100	14,6	
	200	15,7	
	300	16,7	
	400	17,8	
	500	18,9	
Диабазовое стекло (искусственное)	0	11,5	9
	100	12,6	
	200	13,7	
	300	14,8	

Таблица 8—XVII

Теплопроводность некоторых обычных металлов

Металл	Температура, °С	Теплопроводность, $\frac{\text{ватт}}{\text{см·град.}} \cdot 10^{-3}$	Ссылка
Алюминий (поликристаллический)	100	2050	2
	300	2680	
	600	4230	
Медь (поликристаллическая)	18	3840	23
	100	3800	
Железо (армко, поликристаллическое)	30	725	40
	100	683	
	200	615	
	400	485	
	600	389	
	800	297	
Сталь	18	460	
Цинк (поликристаллический) (величины получены по кривой)	0	1170	6
	100	1096	
	200	1046	
	300	1004	
	400	965	
Цинк (жидкий) (величины получены по кривой)	500	604	7
	600	586	
	700	565	

Таблица 9—XVII

Теплопроводность разных материалов

Материал	Температура, °С	Теплопроводность, $\frac{\text{ватт}}{\text{см·град.}} \cdot 10^{-3}$	Ссылка
Уголь ($h^2 = 0{,}0011$)		1,8	18
Ньюкасл		25,1	19
Кеннел, Блейдон		46	19
Антрацит			
(плотность 1,3)		2,1	17
(плотность 1,4)		2,8	
Кокс, газ (плотность 0,91—0,95)	30	7,2	17
(низкотемпературная перегонка)			
(плотность 0,655)		1,4	17
(плотность 0,700)		1,7	
Графит, Ачесон	0	1675	41
	500	920	
	1000	545	
	1500	293	
	2000	125	
	2500	125	

Продолжение табл. 9—XVII

Материал	Температура, °C	Теплопроводность, $\frac{\text{ватт}}{\text{см}\cdot\text{град.}}\cdot 10^{-3}$	Ссылка,
Гипс (плотность 2,13, $\sigma = 1{,}15$ дж/г)			
($h^2 = 0{,}0030$)		(7,4)	18
Плавиковый шпат, массивный		40	19
Гематит, массивный (Кирунавара, Луоссавара)		24,1	29
Кирпич из Кизельгура (плотность 0,40)	57	0,93	27
	312	1,24	
	505	1,53	
	707	1,89	
Магнезит белый, «аморфный», Генуя		18,4	19
Магнезитовая порода (плотность 2,95, $\sigma = 0{,}89$ дж/г) ($h^2 = 0{,}038$)		(99,5)?	46
Магнетит (Кирунавара, Луоссавара)		12 до 30	29
Фарфор, твердый (плотность 2,29)	55	14,3	27
	744	18,2	
Сера	—190	6,38	14
	0	2,92	
Агрегат ромбической серы	20	2,73	25
	80	2,34	
Агрегат моноклинной серы	100	1,53—1,65	
Жидкая	115	1,31	
	210	1,58	

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦАМ 4 — XVII—9—XVII

1. Andrews, Phil. Mag. 25, 1066, 1938.
2. Angell, Phys. Rev. 33, 421, 1911.
3. Арцыбышев С. А. и Южаков В. М., Arzybychew, Jushakow, Ann. Hydrograph. 213, 1929.
4. Ayrton, Perry, Phil. Mag. 5, 241, 1878.
5. Benfield, Proc. Roy. Soc. 173A, 428, 1939.
6. Bidwell, Lewis. Phys. Rev. 33, 249, 1929
7. Bidwell, Phys. Rev. 56, 594, 1939; Konno, Phil. Mag. 40, 542, 1920.
8. Bidwell, Phys. Rev. 58, 561, 1940.
9. Birch, Clark, Am. Journ. Sci. 238, 529 and 613, 1940.
10. Bridgman, Am. Journ. Sci. 7, 81, 1924.
11. Bullard, Proc. Roy. Soc. 173A, 474, 1939.
12. Clark, не опубликована.
13. Ensor, Proc. Phys. Soc. 43, 590, 1931.
14. Eucken, Ann. Phys. 34, 185, 1911.
15. Eucken, Kuhn, Zeit. Phys. Chem. 134, 193, 1928.
16. Friedlander, Ger. Beitr. Geophys. 11, 85, 1912.
17. Fritz, Diemke, Phys. Zeits. 40, 361, 1939.
18. Hecht, Ann. Phys. 14, 100, 1904.
19. Herschel и др., Rep., Brit. Ass. Adv. Sci. 1881.
20. Hotchkiss, Ingersoll, Physics, 2, 154, 1932.
21. Ingersoll, Koepp, Phys. Rev. 24, 92, 1924.
22. Ito, Mazda Res. Rep. 4, 188, 1929.
23. Jaeger, Diesselhorst, Abh. Phys. Tech. Reichsanstalt, 3, 269, 1900.
24. Jakob, Erk, Zeit. tech. Phys. 10, 623, 1929.
25. Kaye, Higgins, Proc. Roy. Soc. 122, 633, 1929.
26. Kaye, Higgins, Proc. Roy. Soc. 113, 335, 1926.
27. Koch, Phys. Zeits. 39, 431, 1938.
28. Koenigsberger, Muhlberg, Neu. Jahrb. f. Min. B. B. 31, 140, 1911.
29. Kruckenberg, Journ. Arkiv. f. Mat. Astr. och. Fys. 2, 1, 1905/06.

30. Lees, Proc. Roy. Soc. 50, 421, 1892.
31. Lees, Nancarrow, Phil. Mag. 14, 811, 1932.
32. Lehfeldt, Rep. S. Afr. Ass. Adv. Sci. 495, 1916.
33. Nancarow, Proc. Phys. Lond. 45, 447, 1933.
34. Niven, Can. Journ. Research, 18, 132, 1940.
35. Patten, U. S. Dept. Agriculture, Bur. Soils, Bull. No. 59, 1909.
36. Pierce, Proc. Am. Acad. 38, 651, 1903.
37. Pierce, Willson, Proc. Am. Acad. 34, 3, 1898.
38. Poensgen, Zeit. Ver. deutsch. Ing. 56, 1653, 1912.
39. Poole, Phil. Mag. 24, 45, 1912; 27, 58, 1914.
40. Powell, Proc. Phys. Soc. London, 51, 407, 1939.
41. Powell, Schofield, Proc. Phys. Soc. London, 51, 153, 1939.
42. Rep. Brit. Ass. Adv. Sci. 271, 1938.
43. Seemann, Phys. Rev. 31, 119, 1928.
44. Stadler, Winkelmann's Handbuch d. Phys. 3.
45. Stephens, Phil. Mag. 14, 897, 1932.
46. Tadokoro, Sci. Rep. 10, 339, 1921.
47. Taylor, Phys. Rev., 13, 150, 1919.
48. Weber, Wied. Ann. 10, 103, 1880.

Таблица 10—XVII

Теплопроводность некоторых обычных жидкостей в зависимости от давления и температуры

Жидкость	Температура, °С	Теплопроводность (1 ат), $\frac{\text{ватт}}{\text{см·град}} \cdot 10^{-3}$	Относительная теплопроводность при давлении (кг/см²)			
			0	4000	8000	12000
Нормальный пентан*	30	1,34$_7$	1	1,777	2,163	2,481
	75	1,28$_5$	1	1,855	2,335	2,740
Серный эфир*	30	1,37$_7$	1	1,800	2,177	2,451
	75	1,34$_7$	1	1,814	2,231	2,537
Ацетон*	30	1,79$_5$	1	1,511	1,786	Затверд.
	75	1,68$_7$	1	1,554	1,891	2,137
Сернистый углерод*	30	1,59$_9$	1	1,512	1,783	1,96$_2$
	75	1,51$_5$	1	1,607	1,935	2,15$_4$
Петролейный эфир*	30	1,30$_6$	1	1,752	2,143	2,379
	75	1,26$_4$	1	1,780	2,232	2,561
Керосин* (американский)	30	1,49$_4$	1			
	75	1,39$_4$	1	1,502	1,792	2,054
Вода*	30	6,02$_6$	1	1,210	1,366	Замерз.
	75	6,44$_5$	1	1,225	1,379	1,506
Вода**	0	5,524				
	10	5,692				
	20	5,859				
	30	6,026				
	40	6,194				
	50	6,361				
	60	6,529				
	70	6,696				
	80	6,863				

* Bridgman, Proc. Amer. Acad. 59, 141, 1923.
** Jakob, Ann. Phys., 63, 537, 1920; Kaye, Higgins, Proc. Roy. Soc. 117, 459, 1928.

Таблица 11—XVII

Влияние гидростатического давления на теплопроводность твердых тел

Теплопроводность при давлении P кг/см² в пределах давления от 1 до 12 000 кг/см² определяется как $K_0(1+\alpha P)$, где K_0 — теплопроводность при нормальном давлении, а α — коэфициент, числовые значения которого даются в таблице. Измерения для металлов производились при температуре 30° С.

Металлы	α	Ссылка
Свинец	$17{,}3\cdot10^{-6}$	1
Олово	$12{,}2\cdot10^{-6}$	1
Кадмий	$7{,}4\cdot10^{-6}$	1
Золото	$4{,}0\cdot10^{-6}$	3
Серебро	$4{,}5\cdot10^{-6}$	3
Медь	$3{,}0\cdot10^{-6}$	3
Висмут	$-31{,}0\cdot10^{-6}$	1
Сурьма	$-21{,}0\cdot10^{-6}$	1

Величины для цинка, железа, меди, серебра, никеля и платины приведены в ссылке 1; эти измерения подверглись критическому пересмотру [3].

Неметаллы	α	Ссылка
Пирексовое стекло: 30° и 75°С	$3{,}8\cdot10^{-6}$	2
Базальт: 30°С	$4{,}7\cdot10^{-6}$	2
75°С	$2{,}2\cdot10^{-6}$	2
Известняк, Золенгофен: 30°С	$1\cdot10^{-6}$	2
75°С	$6{,}7\cdot10^{-6}$	2
Тальк 30°С	$15{,}7\cdot10^{-6}$	2
Каменная соль: 30° и 75°С	$36\cdot10^{-6}$	2
Катлинит (Pipestone 30°С)	$30\cdot10^{-6}$	2

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 11—XVII

1. Bridgman, Proc. Amer. Acad. 57, 77, 1922.
2. Bridgman, Am. Journ. Sci. 7, 81, 1924.
3. Starr, Phys. Rev. 54, 210, 1938.

ГЛАВА XVIII

РАДИОАКТИВНОСТЬ, ТЕПЛО ЗЕМЛИ И ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗРАСТА

Содержание

Таблица 1—XVIII. Поток тепла к земной поверхности 251
» 2—XVIII. Содержание радиоактивных элементов и образование тепла в горных породах 251
» 3—XVIII. Конечные продукты природных процессов радиоактивного распада 252
» 4—XVIII. Изотопический состав радиоактивных элементов и их конечные продукты 253
» 5—XVIII. Колебания в изотопическом составе обычного свинца 254
» 6—XVIII. Возраст по свинцу некоторых радиоактивных минералов 255
» 7—XVIII. Возраст по изотопическому составу свинца . 255
» 8—XVIII. Возраст по гелию различных магнетитовых месторождений 257

ТЕПЛО ЗЕМЛИ

А. Потеря тепла. О потоке тепла, выносимого к поверхности из недр Земли, имеется только ограниченное количество сведений. Данные наблюдений суммированы в табл. 1 — XVIII и дают среднее значение в $1{,}3 \pm 0{,}1 \cdot 10^{-6}$ кал/см^2/сек., причем сделана необходимая поправка на влияние последнего ледникового периода. Если считать теплопроводность внешнего гранитного слоя в 0,006 кал/сек/см^2/°С/см, то соответствующий геотермический градиент у поверхности будет около $2{,}0 \cdot 10^{-4}$ °С/см или 20° С/км.

Это тепло частично выносится в атмосферу путем конвекции и излучения с последующим переизлучением атмосферой в межзвездное пространство. Остаток тепла излучается непосредственно через верхний слой атмосферы. Соотношение потерь тепла, приписываемых каждому из этих процессов, все еще является вопросом дискуссии.

В. Источники тепла. Кроме остатка тепла, присущего Земле со времени ее образования, основными источниками тепла в Земле являются радиоактивность, солнечная радиация и экзотермические химические реакции.

1. Радиоактивность. Так как в действительности все земные вещества содержат по меньшей мере следы радиоактивных элементов, тепло непрерывно образуется почти с постоянной скоростью вследствие поглощения энергии ядерных излучений, сопровождающих радиоактивный распад. Средние скорости образования тепла основными радиоактивными элементами могут быть вычислены [1] из измеренных энергий испускаемых альфа-, бета- и гамма-лучей, одновременно с экспериментально определенными константами распада. Эти скорости таковы:

$(UI + AcU)$ ряд $0{,}74 \pm 0{,}03$ кал/год/г U

Th ряд $0{,}20 \pm 0{,}01$ кал/год/г Th

Калий $5 \pm 2 \times 10^{-6}$ кал/год/г K

Эти величины вместе с содержанием радиоактивных элементов в веществах земной коры позволяют оценить скорость, с которой в настоящее время образуется тепло при радиоактивном распаде; данные измерений приведены в табл. 2—XVIII. Хотя большое число пород было проанализировано на их радиоактивность [14], сравнительно немногие из результатов надежны. Имеющиеся неточности в большой мере можно приписать доказанному несовершенству прежних методов и ненадежности эталонов [7, 9, 10]. К тому же опробывалась такая ограниченная часть земной коры, что при оценке наиболее вероятного среднего содержания радиоактивных веществ в различных типах горных пород следует считаться с возможностью больших ошибок.

Таблица 1—XVIII

Поток тепла к земной поверхности
(ссылки 3,5; см. также табл. 3—XIX и 4—XIX)

Местность	Поток тепла $\frac{кал}{см^2/сек} 10^{-6}$	
	„наблюденный"*	исправленный на влияние ледникового периода
Великобритания:		
Скважина Бальфур	0,68	1,16
Хольфорд	0,74	1,43
Скважина Блайсвуд	1,24	1,56
Скважина Южный Белгрей	1,53	1,85
Хенкхэм	0,71	1,12
Скважина Борленд	0,95	1,28
Дургам	1,47	1,82
Вейгэн (шахта Коллиери)	1,01	1,34
Среднее для Великобритании	1,04	1,445
Южная Африка:		
Якоба	0,95	
Дорнхоутриевиер	0,97	
Герхардминнебрун	1,28	
Дорнклоф	1,20	
Рэф-Нигель	1,03	
Дуббелдевлей	1,52	
Среднее для Южной Африки	1,16	

* „Наблюденные" величины теплового потока были получены комбинацией температур, измеренных в буровых скважинах или шахтах, с лабораторными измерениями теплопроводности большого числа образцов породы, взятых из этих или аналогичных скважин. По поводу деталей, касающихся вычислений и поправок на охлаждение поверхности Земли во время ледникового периода, следует обращаться к ссылкам.

Таблица 2—XVIII

Содержание радиоактивных элементов и образование тепла в горных породах

	Тип породы				
	кислые изверженные породы [7]	основные изверженные породы [7]	ультраосновные породы [7]	каменные метеориты [8]	железные метеориты [8]
Ra в 10^{-12} г/г					
Пределы	0,1—8,0	0—1,1	0—0,6	0,07—2,2	0—0,2
Среднее	1,4±0,6	0,4±0,2	0,2±0,1	0,12±0,06	0,03±0,015
UI в 10^{-6} г/г					
Пределы	0,3—23	0—3	0—1,7	0,2—6	0—0,6
Среднее	4,0±2,0	1,1±0,6	0,6±0,3	0,3±0,2	0,09±0,04
Th в 10^{-6} г/г					
Пределы	3—50	0—15	0—8	?	?
Среднее	13±6	4±2	2±1	0,5±0,25	0,04±0,02
Th/UI Отношение	4±2	4±1	3±1	1,5±0,7	0,5 ±0,25
K в 10^{-2} г/г	2,8±0,5	1,4±0,3	0,4±0,2	0,26±0,13	0±0,01
Образование тепла в 10^{-6} калорий на грамм в год:					
UI + AcU	3,0±1,5	0,8±0,4	0,44±0,2	0,22±0,15	0,67±0,03
Th	2,6±1,2	0,8±0,4	0,4±0,2	0,1 ±0,05	0,008 0,004
K	0,14±0,02	0,07±0,01	0,02±0,01	0,013±0,006	0
Общее	5,6±1,7	1,7±0,8	0,9±0,4	0,33±0,2	0,08±0,03

Примечание. Отбором проб была охвачена недостаточная площадь земной поверхности, чтобы можно было оценить истинную мировую среднюю радиоактивность различных типов пород. Данные для ограниченных участков земной коры, которые были исследованы, показывают значительные колебания, как это видно из широких пределов величин. Принятые вероятные ошибки означают, что истинная мировая средняя величина предположительно имеет 50% вероятности того, что она лежит вне указанных пределов.

2. Солнечная энергия. Лучистая солнечная энергия, получаемая извне земной атмосферы, на нормальной поверхности при среднегодовом расстоянии Земли от Солнца приблизительно равна 2 кал/мин. на квадратный сантиметр [1]. Небольшая часть этой энергии рассеивается и отражается обратно атмосферой и облаками, а в ночное время сама Земля отдает излучение в пространство, причем средняя годовая температура не показывает заметного увеличения или уменьшения. Если мы примем площадь большого круга Земли равным $1{,}3 \cdot 10^{18}$ см^2 и пренебрежем влиянием земной атмосферы, то количество солнечной энергии, получаемое Землей, составит около 10^{24} калорий в год. Этот тепловой поток на несколько порядков больше годового тепла, образованного радиоактивностью Земли, или тепла, теряемого путем проводимости через земную кору.

3. Химические процессы. В недрах Земли имеют место как экзотермические, так и эндотермические реакции, включающие химические реакции и физические изменения, как, например, перекристаллизацию. Точные размеры и прежде всего значение этих эффектов в настоящее время совершенно неясны.

Таблица 3—XVIII

Конечные продукты природных процессов радиоактивного распада

Период полураспада T радиоактивного элемента связан с константой распада λ выражением $T = 0{,}693 \cdot \frac{1}{\lambda}$.

Распадающийся атом*	Продукты*	Константа распада λ (сек.$^{-1}$)	Ссылка
UI^{238}	$8He^4 + Pb^{206}$	$4{,}82 \cdot 10^{-18}$	23
AcU^{235}	$7He^4 + Pb^{207}$	$3{,}1 \cdot 10^{-17}$	23
Th^{232}	$6He^4 + Pb^{208}$	$1{,}58 \cdot 10^{-18}$	19
K^{40}	$e^- + Ca^{40}$	$1{,}4 \cdot 10^{-17}$	24
Rb^{87}	$e^- + Sr^{87}$	$3 \cdot 10^{-19}$	11
Sm^{148}	$He^4 + Nd^{144}$	$2{,}5 \cdot 10^{-19}$	33
Nd^{144}?	$e^- + Il^{144}$	10^{-19}	20
Lu^{176}	$e^- + Hf^{176}$	$3 \cdot 10^{-19}$	21

* Написанные вверху цифры обозначают массы ядра; e— символизирует электрон, который испускается в виде бета-луча.

Таблица 4—XVIII

Изотопический состав радиоактивных элементов и их конечные продукты

Элемент	Изотопы	Относительное содержание	Ссылка
He	3	10^{-7}	2
	4	1,0	
K	39	8600±10	25
	40	1	
	41	613±4	
Ca	40	100±3	26
	42	0,66±0,02	
	43	0,15±0,05	
	44	2,13±0,07	
	46	0,0034±0,0005	
	48	0,191±0,006	
Rb	85	2,68±0,02	25
	87	1	
Sr	84	0,65±0,01	27
	86	11,8±0,1	
	87	8,8±0,1	
	88	100	
U	235	1	23
	238	139±1	
Th	232		
Sm	144	3	4
	147	17	
	148	14	
	149	15	
	150	5	
	152	26	
	154	20	
Nd	142	25,95	22
	143	13,0	
	144	22,6	
	145	9,2	
	146	16,5	
	148	6,8	
	150	5,95	
Pb — см. табл. 5—XVIII.			

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗРАСТА

А. Измерения радиоактивности. Скорость образования свинца и гелия может быть определена из данных для урана или тория, или любых других членов этих рядов (в равновесии), комбинированием с константами распада [19, 23]. Скорость образования гелия также может быть получена непосредственно путем подсчета альфа-лучей, испускаемых тонким слоем породы.

Оба метода могут быть сравнимы при помощи показателя активности I в альфа-частицах на миллиграмм в час:

$$I = 1{,}037Ra + 0{,}0886Th,$$

где Ra является концентрацией Ra в 10^{-12} граммов на грамм, а Th — концентрацией Th в 10^{-6} граммов на грамм. Хорошая согласованность, которая была достигнута [9, 10], позволяет в общих чертах проверить обоснованность принятых физических констант распада и указывает на отсутствие какого-либо другого важного альфа-излучателя в веществах земной коры.

Таблица 5—XVIII

Колебания в изотопическом составе обычного свинца

Источник свинца, местность	Геологический возраст	Относительное содержание изотопов			
		204	206	207	208
Галенит, Большое Медвежье озеро	Докембрий	1,000	15,93	15,30	35,3
Галенит, Брокен-Хилл, Новый Южный Уэльс	Докембрий	1,000	16,07	15,40	35,5
Церуссит, Брокен-Хилл, Новый Южный Уэльс	Докембрий	1,000	15,92	15,30	35,3
		1,000	15,93	15,28	35,2
Галенит, округ Енсей, Сев. Каролина	Верхний докембрий	1,000	18,43	15,61	38,2
Галенит, Нассау, Германия	Карбон	1,000	18,10	15,57	37,85
Церуссит, Эйфель, Германия	Карбон	1,000	18,20	15,46	37,7
Галенит I, Джоплин, Миссури	Верхний карбон	1,000	21,65	15,88	40,8
Галенит II, Джоплин, Миссури	Верхний карбон	1,000	21,60	15,73	40,3
		1,000	21,65	15,75	40,45
Галенит, Метэллайн-Фолс, Вашингтон	Верхний мел	1,000	19,30	15,73	39,5
Церуссит, Уоллес, Айдахо	Верхний мел	1,000	15,98	15,08	35,07
		1,000	16,10	15,13	35,45
Вульфенит и ванадинит, горы Туксон, Аризона	Миоцен	1,000	18,40	15,53	38,1
Галенит, Саксония, Германия		1,000	17,34	15,47	37,45
		1,000	17,38	15,44	37,3

Постоянство скоростей распада в течение прошедших времен было доказано точными фотометрическими измерениями [12] на плеохроических оболочках и экспериментальными испытаниями на влияние температуры в пределах от —180° С до 3000° С и давлений до 2000 ат [31].

В. Уравнения возраста. Все радиоактивные измерения возраста основаны на следующем соображении. Количество накопившихся продуктов распада равно количеству материнского радиоактивного вещества, остающегося в образцах, умноженному на $(e^{\lambda t} - 1)$, где λ — константа распада первоисточника, t — продолжительность периода накопления, а $e = 2{,}7183$. Если в результате распада одного атома материнского вещества возникает больше одного атома продуктов распада, как, например, для тория, дающего 6 атомов гелия на атом тория, то количество продуктов распада увеличивается пропорционально. В общем, все земные вещества содержат небольшие количества трех элементов первоисточников: уран 1, актиноуран и торий. Детальные решения [6, 17] уравнения возраста поэтому включают итог трех уравнений этой общей формы.

С. Требования для получения достаточно обоснованного определения возраста по свинцу. a) Минералы должны быть свежими и неизмененными, без признаков выщелачивания каких-либо радиоактивных веществ; b) изотопический состав свинца должен быть определен предпочтительно при помощи масс-спектрографа; c) все применяемые химикалии должны быть проверены на содержание свинца; d) все анализы следует производить на одном и том же образце; e) первичный радиогенный свинец должен отсутствовать.

Радиоактивный минерал, который отвечал бы всем этим требованиям, не найден. Наиболее надежные величины, доступные в настоящее время, даны в табл. 6—XVIII. Удовлетворение требованиям критерия а) трудно установить, а в отношении критерия е) не имеется надежных экспериментальных данных.

Таблица 6—XVIII

Возраст по свинцу некоторых радиоактивных минералов [10]*

Минерал	Местность	Геологический возраст	Возраст, млн. лет
Самарскит	Гластонбери, Коннектикут	Дотриассовый	270
Урановая смолка....	Яхимов, Богемия	Верхний палеозой	220
Торит.....	Бревиг, Норвегия	Пермь (?)	230
Кольм	Гюлльхеген, Швеция	Верхний кембрий	400
Брёггерит	Карлхюс, Роде, Норвегия	Докембрий	900
Клевеит.....	Ауст-Агдер, Арендаль, Норвегия	Докембрий	1000
Уранинит	Кейстон, Юж. Дакота	Докембрий	1500

* Геологические описания и литературу см. в ссылках 6, 9 и 29.

Таблица 7—XVIII

Возраст по изотопическому составу свинца (ссылка 29)

Минерал и источник	Возраст из RaG/U^{238}, млн. лет	Возраст из ThD/Th, млн. лет	Возраст из AcD/RaG, млн. лет
Иоахимсталь, урановая смолка	227		140
Черная Катанга I, урановая смолка.....	616		610
Желтая Катанга I, урановая смолка.....	973		635
Черная Катанга Ia, урановая смолка.....			610
Желтая Катанга Ia, урановая смолка.....			655
Черная Катанга II, урановая смолка.....	582		625
Желтая Катанга II, урановая смолка.....	676		655
Катанга, кюрит	995		625
Бивер-Лодж, урановая смолка..... ...	333		460
Большое Медвежье озеро, урановая смолка	1251		1420
Бедфорд, циртолит II.....	361		375
Бедфорд, циртолит I	341		300
Беснер, уранинит.....	765	787	825
Гурон-Клейм, уранинит	1570	1252	2200
Вильберфорс, уранинит.....	1077	983	1035
Цейлон, торианит	531	461	485
Морогоро, уранинит.....	803		595
Норвегия, клевеит	1085	840	1090
Пьемонт, клевеит	882		905
Норвегия, торит.....	243	238*	
Швеция, кольм..... ...	388		770

* Поправка А. О. Нира.

Изотопический анализ свинца, выделенного из радиоактивных минералов, служит для определения наличного количества примеси обычного свинца. Кроме того, сведения об относительном обогащении индивидуальными изотопами свинца дают три независимых метода определения геологического возраста минералов. Нир [29] применил эти три метода, как показано в табл. 7—XVIII. Образцы от 1 до 12 включительно содержат ничтожные количества *Th*, следовательно, метод *ThD/Th* не мог быть применен к этим минералам. Возрасты, полученные из отношения *AcD/RaG*, считаются более надежными, чем возрасты, вычисленные из отношения RaG/U^{238} или из отношения *ThD/Th*, так как изменение минерала за время его геологической истории гораздо меньше влияет на отношение *AcD/RaG*, чем на любое из двух других соотношений. Для этих образцов имеется мало сведений относительно критерия (a).

D. Требования для получения достаточно обоснованного определения возраста по гелию.

a) Гелий должен отсутствовать как первичная составная часть горной породы ко времени ее затвердевания;

b) за время существования породы не должно произойти ни добавления, ни убывания гелия или радиоактивных элементов.

Более ранние измерения возраста по гелию [32] были ошибочны вследствие ненадежных измерений радия и от них следует отказаться [9, 10]. Последующие опубликованные величины возраста по гелию [9, 10, 15], основанные на надежных измерениях радиоактивности, но произведенных на породах в целом, также подлежат пересмотру. Современные наблюдения показали [13, 16, 18], что различные минеральные компоненты породы могут показывать весьма различные возрастные соотношения по гелию. В частности, полевые шпаты как будто теряют значительную часть своего радиогенного гелия и, таким образом, не выполняют предъявляемого к ним требования (b). С другой стороны, некоторые из темных минералов, в частности пироксен и магнетит, обладают гораздо большей удерживающей силой и показывают возраст по гелию, приближающийся к величинам, которые следует ожидать от шкалы времени по свинцу и, следовательно, могут полностью удовлетворять требованию (b). Таким образом, все определения возраста по гелию, произведенные на породах, взятых в целом, представляют собой средние величины, зависящие от пропорции минералов, составляющих породу, и от их способности удерживать гелий.

Ряд измерений возраста по гелию был произведен на магнетитах различных возрастов, и результаты сведены в табл. 8—XVIII. Продолжаются дальнейшие исследования на магнетитах и других избранных минералах, и предвидится установление надежной шкалы времени по гелию, которая будет служить очень важным вспомогательным средством при геологических корреляциях.

E. Возраст метеоритов по гелию. Максимальный возраст по гелию железных метеоритов был получен из соотношения *He — Ra*, пренебрегая *Th* [30].

Эти максимальные возрасты почти равномерно распределены между значениями в 100 и 2800 млн. лет.

F. Метод плеохроических ореолов. Этим методом вряд ли можно получить очень точные возрастные определения. Метод проверяет порядок величины возрастов, определенных для очень древних пород (приблизительно 10^9 лет) другими радиоактивными методами. Отношение Pb^{207}/Pb^{206} получено путем измерения относительного числа альфа-

частиц *AcA* и *RaC'*, обнаруженных по интенсивности плеохроических колец.

G. Отношение калия к кальцию служит для установления верхней границы возраста, но имеет мало значения вследствие обилия нерадиогенного Ca^{40}.

H. Отношение рубидия к стронцию обещает большую возможность применения; был проанализирован только один минерал [11].

Таблица 8—XVIII

Возраст по гелию различных магнетитовых месторождений

Место взятия образца и геологический возраст	Гелий, 10^{-5} см³/г	Радий, 10^{-12} г/г	Торий, 10^{-6} г/г	Возраст, млн. лет
Среднетретичный				
Большой Западный рудник, Юта	0,85	0,62	4,0	26
Черный магнетитовый рудник, Юта .	0,98	0,67	1,4	37
Нижнетретичный				
Мэмэ, Гаити.....	0,72	0,33	0,31	60
Фиерро, Нью-Мексико	0,40	0,12	0,9	59
Нижнемеловой				
Остров принца Уэльского, Аляска ..	3,53	1,23	0,64	81
Линн Валлей, Брит. Колумбия	1,26	0,42	0,044	88
Верхнеюрский				
Остров Тексада, Брит. Колумбия	1,66	0,34	0,50	130
Образец Смитсонианского института.	2,35	0,51	0,22	131
Верхнетриасовый — нижнеюрский				
Корнуол, Пенсильвания	2,24	0,32	2,4	126
Гуз-Крик, Виргиния	1,57	0,15	2,2	137
Бойертоун, Пенсильвания	1,76	0,28	1,3	133
Френч-Крик, Пенсильвания	0,86	0,085	1,1	145
Герриш-Моунтэн, Новая Шотландия	0,78	0,049	1,54	128
Лейквил, Новая Шотландия	1,14	0,18	0,82	135
Каменноугольный				
г. Магнитная, Урал	4,73	0,44	0,27	300
г. Высокая, Урал.....	0,81	0,048	0,33	316
г. Благодать, Урал, ...	1,48	0,099	0,23	366
Образцы Смитсонианского института	2,60	0,158	0,42	396
Докембрийский				
Кируна, Швеция	64,9	0,300	16,2	1100
Онтарио	26,6	0,600	0,51	1100

* По новым данным возраст г. Высокой и г. Благодать — девонский. *(Прим. ред.)*

Примечание. Возрастные соотношения для двух докембрийских образцов включают поправку на распад урана и тория (см. рис. 6 в ссылке 10). Точное совпадение совершенно случайно.

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ XVIII

1. Abbot и другие, Smithsonian Misc. Pub. 77, No. 3, 31, 1925.
2. Alvarez, Cornog, Phys. Rev. 56, 613, 1939.
3. Anderson, Proc. Roy. Soc. Edinburgh 60, 192, 1939—1940.
4. Aston, Proc. Roy. Soc. London, 146A, 46, 1934.
5. Benfield, Proc. Roy. Soc. 173A, 428, 1939; Bullard, idem. 173A, 474, 1939; Krige, idem, 173A, 450, 1939.
6. Bull. 80, National Research Council, The Age of the Earth, 1931.
7. Evans, Goodman, Bull. Geol. Soc. Am. 52, 459, 1941.
8. Evans, Pop. Astronomy 46, No. 3, 1938.
9. Evans, Goodman, Keevil, Lane, Urry, Phys. Rev. 55, 931, 1939.
10. Goodman, Evans, Bull. Geol. Soc. Am. 52, 491, 1941.
11. Вычисленные из данных Hahn, Strassman, Walling, Naturwiss, 25, 189, 1937.
12. Henderson, и другие, Proc. Roy. Soc. London 145A, 563, 1934; 145A, 582, 1934; 158A, 199, 1937.
13. Hurley, Goodman, Bull. Geol. Soc. Am. 52, 545, 1941.
14. Jeffreys, Beitr. Zeit. Geophys. 47, 149, 1936.
15. Keevil, Trans. Roy. Soc. Canada, Sec. IV, 32, 123—150, 1938.
16. Keevil, Am. Journ. Sci. 36, 406, 1938; Piggot, Am. Journ. Sci. 35A, 227, 1938; Barth, Am. Journ. Sci, 35A, 231, 1938, Piggot, Merwin, Am. Journ. Sci. 23, 49, 1932.
17. Keevil, Am. Journ. Sci. 237, 195, 1939.
18. Keevil, Univ. of Toronto Studies, Geol. Series, No. 46, Contr. to Can. Min. 39, 1941.
19. Kovarik, Adams, Phys. Rev. 54, 413, 1938.
20. Libby, Phys. Rev. 45, 845L, 1934, and ibid., 46, 196, 1934.
21. Libby, Phys. Rev. 56, 21, 1939.
22. Mattaych, Hauk, Natyrwiss, 25, 780, 1937.
23. Nier, Phys. Rev. 55, 150, 1939.
24. Вычислено из данных Nier, Phys. Rev. 48, 238, 1935 and Muhlhoff, Ann. d. Physik. 399, 205, 1930.
25. Nier, Phys. Rev. 50, 1042, 1936; Brewer, Journ. Am. Chem. Soc. 58, 365, 1936, Brewer, Journ. Am. Chem. Soc. 60, 1691, 1938.
26. Nier, Phys. Rev. 53, 284, 1938.
27. Nier, Phys. Rev. 54, 276, 1938; Sampson, Bleakney, Phys. Rev. 50, 456, 1936.
28. Nier, Journ. Am. Chem. Soc. 60, 1571, 1938.
29. Nier, Phys. Rev. 55, 153, 1939.
30. Paneth, Urry, Koeck, Nature, March 29, 1930, Paneth, Natur Wiss, 19, 164, 1931; Paneth, Koeck, Zeit. f. Phys. Chem. Bod. Fest. 145, 1931.
31. Schuster, Nature 76, 269, 1907, Rutherford, Chadwick, Ellis Cambridge University Press, 1930.
32. Urry, Chem. Rev. 13, 315, 1933; Lane, Urry, Bull. Geol. Soc. Am. 46, 1101, 1935, Urry, Journ. Chem. Phys. 4, 34, 1936.
33. Вычисленные из данных Wilkins, Dempster, Phys. Rev. 54, 315A. 1933, и Libby, Phys. Rev. 46, 196, 1937.

ГЛАВА XIX

ТЕМПЕРАТУРЫ, НАБЛЮДЕННЫЕ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Содержание

Таблица 1—XIX. Температуры земной коры в Соединенных Штатах 261
» 2—XIX. Температуры в скважинах и рудниках различных стран 265
» 3—XIX. Геотермический градиент, теплопроводность горных пород и тепловой поток к земной поверхности в Южной Африке 268
» 4—XIX. Тепловой поток к земной поверхности в Великобритании 269
» 5—XIX. Максимальные наблюденные температуры лав у вулканических жерл 269

ВВЕДЕНИЕ

Таблицы этой главы основаны на данных таблиц Ван Орстранда [8]; данные, появившиеся после составления таблиц Ван Орстранда, включены, где это было возможно [2, 4; 10], или представлены в виде отдельных таблиц [3, 7]. Температуры, наблюденные в рудниках и глубоких скважинах и отобранные Ван Орстрандом, были приведены по методу наименьших квадратов к уравнениям вида

$$T = a + bx,$$

где T температура (°С) на глубине x километров. Для наблюдений, произведенных в Соединенных Штатах, это приведение было сделано для трех интервалов глубины: от 30,5 до 305 м, от 30,5 до наиболее глубокого наблюдения и от 610 м до наиболее глубокого наблюдения. Эти интервалы лишь случайно будут иметь какое-то отношение к геологической структуре или стратиграфии. Константа a является экстраполированной температурой поверхности почвы и обычно представляет собой с точностью в пределах нескольких градусов среднюю годовую температуру воздуха. Величины a, занесенные в таблицы, даны для интервала глубины от 30,5 до 305 м; величины a для других интервалов глубины, за исключением нескольких случаев, отличаются от этой величины в пределах, меньших чем 5°. Коэфициент b является средним геотермическим градиентом, внесенным в таблицу в единицах °С/км для трех интервалов глубины для скважин глубиной более 610 м.

Измерения по скважинам в других странах проводились таким же способом и приблизительно для таких же интервалов глубины. Наблюдения на малых глубинах, главным образом на глубинах, меньших чем 3 м, подитожены Фиттоном и Бруском [6]. Очень полную сводку температурных измерений в скважинах для Соединенных Штатов дал Ван Орстранд [9]. Настоящие величины были выбраны из этого полного списка с учетом глубины измерения, состояния скважины ко времени испытания, метода измерения и регулярности наблюдений.

Подсчет теплового потока по наблюденным градиентам температуры требует знания средней теплопроводности горных пород, для которых измерялся градиент. Эта сторона проблемы лишь только начала разрабатываться [3, 7]. Табл. 3—XIX и 4—XIX дают современные результаты измерений теплового потока по скважинам для Англии и Южной Африки. Эти результаты показывают большое значение корреляции стратиграфического разреза скважины с теплопроводностью пород для истолкования температурных измерений.

Таблица 1—XIX

Температура земной коры в Соединенных Штатах

Город, нефтяной промысел или рудник	Наибольшая глубина наблюдения, м	Экстраполированная поверхностная температура почвы (*a*), °С	Средний геотермический градиент (*b*), °С/км		
			от 30,5 м до 305 м	от 30,5 м до наиболее глубокого наблюдения	от 610 м до наиболее глубокого наблюдения
Алабама					
Олбани	610	16,47	4,72	7,25	
Этвуд	762	14,97	19,25	17,97	
Бирмингем	610	15,66	16,66	17,41	
Файетт	381	15,83	14,22	15,16	
Вернон	1067	16,42	16,73	17,35	17,83
Арканзас					
Эльдорадо	658	17,10	34,30	42,12	
Смэковер	610	16,38	32,88	41,05	
Калифорния					
Высоты Аламитос	1372	21,78	40,28	38,48	38,04
Бейкерсфильд	1295	23,59	21,84	28,60	
Бейкерсфильд	2743	24,88	30,82	34,39	35,18
Коалинга	1317	21,52	37,24	35,80	36,13
Фуллертон	1301	22,10	36,62	34,98	34,74
Грес-Валлей	1132	11,39	10,44	9,62	9,10
Хантингтон-Бич	1219	20,16	44,27	49,30	51,87
Кеттлмен-Хиллс	802	21,39	35,05	32,83	
Лонг-Бич	2743	20,96	34,34	36,18	36,84
Санта фе Спрингс	1379	21,90	34,67	35,07	33,70
Сил-Бич	1067	17,13	53,75	41,12	40,17
Вентура	1067	19,96	27,30	29,80	29,71
Виттьер	1143	23,47	30,44	34,16	33,26
Колорадо					
Келхен	1219	10,87	28,71	31,20	35,07
Флоренс	1067	12,99	35,65	39,21	43,71
Форт-Коллинс	1219	11,45	30,38	35,65	39,11
Лонгмонт	1981	13,32	32,35	43,73	46,41
Джорджия					
Гриффин (докембрийский гнейс)	213	16,39		13,87	
Лагранж (докембрийский гнейс)	188	16,71		14,62	
Иллинойс					
Бриджпорт	549	12,43	33,30	31,44	
Кэзей	686	14,12	18,88	20,92	
Робинсон	305	12,42		35,89	
Айова					
Эймс	640	9,81	12,67	12,94	
Канзас					
Огюста	686	14,27	36,96	34,78	
Эльдорадо	686	12,93	35,62	35,43	
Флоренс	655	13,53	31,55	30,02	
Хеверхилл	686	13,98	35,85	35,29	
Сиракузы	1402	13,85	22,22	26,03	30,17
Кентукки					
Претер-Крик	457	13,83	14,95	11,61	
Роккестл-Крик	457	12,59	15,38	13,93	
Луизиана					
Блю-Лейк	610	20,02	32,81	41,01	
Озеро Каддо	610	18,21	48,36	44,16	

Продолжение табл. I—XIX

Город, нефтяной промысел или рудник	Наибольшая глубина наблюдения, м	Экстраполированная поверхностная температура почвы (a), °С	Средний геотермический градиент (b), °С/км		
			от 30,5 до 305 м	от 30,5 м до наиболее глубокого наблюдения	от 610 м до наиболее глубокого наблюдения
Луизиана (*продолжение*)					
Вблизи озера Каддо...	686	18,22	48,74	43,58	
Хейнесвилл	838	18,41	37,82	40,92	36,65
Гомер.....	610	18,31	49,23	54,26	
Мэни.....	762	18,23	35,14	41,45	
Монроэ	686	19,12	37,38	40,17	
Пайн-Айленд	1067	18,57	51,86	40,43	35,65
Слайго	503	18,38	47,17	42,25	
Цволле.....	1030	20,93	36,09	39,94	37,60
Мичиган					
Хутон.....	504	5,27	14,05	14,29	
Хутон, Белтик № 16 .	1905	(измерения ниже 1468 м)			16,81
Кивинау-Пойнт.....	1636	5,82	18,39	15,53	16,09
Лейк-Линден.....	437	6,53	11,37	13,80	
Саррей.....	1128	7,52	21,62	34,39	42,61
Миссисипи					
Эмори	762	16,82	11,23	15,95	
Округ Монроэ	533	17,51	9,88	13,80	
Джексон	686	19,13	52,38	52,26	
Монтана					
Анаконда	488	4,38	48,03	38,48	
Конрад	610	7,64	22,58	22,27	
Кевин-Санбарст	1247	8,51	16,57	17,59	18,63
Невада					
Виргиния-Сити	701	9,50	61,90	56,59	
Нью-Джерсей					
Франклин-Фарнес	762	9,66	6,60	10,66	
Нью-Мексико					
Артезия.....	881	20,03	10,21	8,00	7,27
Карлсбад.....	1829	18,87	9,93	13,83	15,38
Ловингтон.....	1372	16,99	22,82	10,10	6,03
Розуэлл	914	18,58	11,36	10,63	11,48
Нью-Йорк					
Гринвуд.....	1295	8,06	28,43	29,31	32,41
Тайрон	533	8,77	33,05	34,76	
Виллинг.....	1433	7,67	22,71	30,93	35,58
Сев. Дакота					
Лонтри	1143	6,51	28,76	36,42	43,73
Оклахома					
Ардмор	914	17,64	15,15	17,83	23,15
Ардмор-Хелдтон.....	838	17,14	16,93	16,66	16,91
Бесси	457	17,46	12,89	15,09	
Биллингс	1067	15,73	34,47	34,83	34,92
Блекуэлл	610	13,56	39,41	36,95	
Бремен	719	16,39	35,38	33,12	
Барбенк.....	869	15,07	34,50	29,88	44,22
Кромвелл	914	15,38	35,65	40,15	44,40
Девенпорт.....	1029	15,91	16,08	21,18	25,97
Дилуорс.....	1029	15,10	33,45	36,23	36,69
Драмрайт	701	17,12	24,95	32,79	
Гленн-Пул	509	15,16	49,01	50,00	
Холденвилл	1585	17,17	34,47	36,49	38,29
Хабберд.....	875	15,87	37,66	38,33	42,18

Продолжение табл. I—XIX

Город, нефтяной промысел или рудник	Наибольшая глубина наблюдения, м	Экстраполированная поверхностная температура почвы (*a*), °С	Средний геотермический градиент (*b*), °С/км		
			от 30,5 до 305 м	от 30,5 м до наиболее глубокого наблюдения	от 610 м до наиболее глубокого наблюдения
Оклахома (*продолжение*)					
Моррис	491	16,03	46,50	44,73	
Ньюкирк	914	15,25	41,27	40,54	44,84
Окмэ	838	15,67	43,16	42,16	43.53
Оклахома-Сити	1829	15,78	13,12	20,58	22,31
Оклахома-Сити	1829	14,11	15,13	21,16	22,51
Пепуз	914	15,83	35,91	39,77	44,47
Перри	914	14,83	33,17	31,30	33.36
Сасакуа	1067	16,44	30,00	34,23	36,53
Семиноль	1219	16,66	20,01	30,60	37,44
Тонкауа	1219	15,85	34,18	36,76	40,17
Уолтерс	655	17,49	13.67	15,75	
Вивока	914	15,79	36,71	39,28	40,61
Орегон					
Астория	1152	11,07	27,39	30,44	30,89
Бонанца	1180	8,87	104,31	(30—114 м)	148,26
Лейквью	533	9,61	61,95	103,69	
Медфорд	274	14,80		24,06	
Вейл	395	14,33	93,14	83,39	
Пенсильвания					
Гейнс-Джанкшин	1676	9,61	19,32	29,51	33,77
Дженеси	1524	6,97	24,62	29,86	34,12
Хеброн	1600	5,07	28,43	30,99	33.46
Джонстоун	1981	8,18	16,75	23.93	25,90
Лонг-Бридж	2077	9,58	25,34	28,53	29,75
Мак-Дональд	2126	13,60	13,93	26,32	
Нью-Касл	1372	9,42	21,25	29,55	35,07
Техас					
Бестроп	610	23,69	37,78	38,46	
Биг-Лейк	968	17,89	18,23	12,74	31,22
Блю-Ридж	884	21,53	31,30	32,81	36,14
Боджи-Крик	1129	19,77	45,55	52,26	56,83
Бонхем	347	18,86	41,48	39,84	
Броунвуд	381	20,39	29,89	29,60	19,34
Келлисбург	1122	18,05	17,70	17,90	20,82
Кенейдиен	1450	17,06	14,47	18,25	
Дейл	686	20,69	39,08	41,90	32,81
Демон	1219	23,16	26,14	29,51	20,40
Дел-Рио	1123	23,27	23,00	23,90	
Диккенс	732	18,11	18,66	15,98	34,45
Истленд	914	19,24	32,08	34,36	37,13
Эдвардс	2012	20,94	22,80	30,37	
Электра	558	18,83	21,12	22,31	
Эннис	404	21,56	31,28	33,83	
Феррис	381	19,17	37,07	36,89	
Графорд	914	20,19	31,64	33,83	37,37
Грехэм	1321	19,21	32,88	31,57	34,07
Гринвилл	533	19,29	35,58	33,81	
Гатри	899	18,67	19,47	16,37	23,53
Хамбл	743	21,44	42,58	46,33	
Леонард	762	19,13	32.79	27,10	
Лонг-Пойнт	1006	21,80	32,61	32,17	30,66
Лалинг	686	21,77	42,01	41,87	
Литтон-Спрингс	507	21,39	45,79	42,78	

Продолжение табл. 1—XIX

Город, нефтяной промысел или рудник	Наибольшая глубина наблюдения, м	Экстраполированная поверхностная температура почвы (*a*), °С	Средний геотермический градиент (*b*), °С/км		
			от 30,5 до 305 м	от 30,5 м до наиболее глубокого наблюдения	от 610 м до наиболее глубокого наблюдения
Техас—(*продолжение*)					
Мексия	914	19,22	39,86	41,85	40,83
Одесса	605	20,02	12,63	13,07	
Озона	1676	18,73	18,77	29,60	32,55
Пампа	1524	15,72	19,69	15,44	15,57
Пенхэндл (окр. Керсон)	602	17,14	19,39	19,50	
Пенхэндл (окр. Грей)	1044	15,50	15,31	12,28	13,56
Пенхэндл (окр. Липскомб)	1277	16,64	14,75	15,18	16,64
Пирс-Джанкшин	1006	22,53	30,84	31,95	30,40
Ренджер	914	18,91	37,15	38,51	42,83
Розвуд	457	21,08	35,54	36,95	
Шермен	442	18,38	26,61	25,30	
Смис-Ренч	600	22,11	31,95	34,67	
Сант-Джо	527	16,28	21,14	21,69	
Уако	607	22,86	35,80	31,61	
Вольф-Сити	610	17,53	34,89	36,82	
Юта					
Окр. Грэнд	1463	15,14	13,56	18,39	20,05
Вашингтон					
Бентон-Сити	671	14,71	41,28	37,62	
Моклипс	1067	8,09	17,95	25,12	27,78
Ситтл	762	9,43	16,93	17,30	
Западная Виргиния					
Бриджпорт	2228	12.34	21,27	25,54	28,65
Фейрмонт	2286	11,85	22,66	27,72	30,95
Грентсвилл	1372	11,99	21,00	21,95	25,35
Меннингтон	983	11,16	24,99	19,98	
Спенсер	991	11,57	22,56	21,49	22,60
Волкэно	1341	12,19	15,68	26,90	32,23
Вест-Юнион	1981	11,58	19,39	25,24	28,78
Вайэтт	610	11,83	19,78	18,55	
Вайоминг					
Биг-Мадди	991	10,13	34,38	34,34	36,44
Коди	1295	10,90	29,29	30,95	28,93
Гресс-Крик	332	8,38	36,44	35,60	
Ленс-Крик	1067	10,24	45,00	49,58	49,03
Лост-Солджер	1036	7,36	57,89	46,82	41,59
Пайн-Моунтен	683	7,91	46,57	37,49	
Раулинс	914	7,09	26,32	31,92	39,01
Рок-Ривер	914	8,28	24,48	26,08	30,80
Солт-Крик	808	10,24	29,27	37,89	43,71
Типот	834	9,70	40,68	50 01	53,22
Термополис	274	10,53		76,66	
Окр. Хот-Спрингс	429	11,02	32,30	35,45	
Литтл-Сенд-Дроу	914	9,11	26,56	29,38	33,03

Таблица 2—XIX

Температуры в скважинах и рудниках различных стран

Место	Пределы глубины, м	Экстраполированная поверхностная температура почвы (*a*), °С	Средний термический градиент (*b*), °С/км
Южная Африка			
Карнарвон	30—306	21,08	53,31
	30—1525	26,49	30,88
	610—1525	34,94	23,20
(Глинистый сланец, известняк, песчаник)	0—793		41,3
(Гранит и гнейс)	793—1525		22,1
Иоганнесбург (ссылка 10)	30—305	17,67	14,09
	30—1436	17,99	10,77
	610—1436	14,57	13,74
Витватерсранд	151—305	15,56	15,06
	151—1194	16,43	9,42
	610—1194	12,69	13,41
	305—610	17,18	10,94
	305—892	18,32	8,17
	1804—2143	18,48	8,24
	610—2143	20,17	5,80
Борнео, Самаринда	233—387	22,46	63,63
	290—471	33,39	39,01
	420—574	22,91	53,30
Япония, Эчиго	43—304	11,34	41,21
	43—607	11,26	42,10
	113—343	15,47	28,80
	113—726	11,13	43,64
	32—328	13,01	42,41
	32—611	11,98	50,14
Австралия			
Грейт-Бесин	219—544	21,62	37,35
	219—914	24,52	28,27
	610—914	16,76	38,66
Новый Южный Уэльс	185—320	18,74	11,79
	185—442	15,91	23,44
Северо-западная	155—277	17,53	94,09
	155—770	31,14	34,96
Южная	415—649	14,59	76,22
	415—1433	30,23	50,12
	610—1433	42,63	39,44
	94—344	16,57	109,02
	94—479	24,17	56,10
Юго-западная	93—450	20,59	43,91
	93—563	22,83	28,51
Англия			
Бристоль	123—539	9,32	26,54
Инс	147—614	14,34	24,00
	147—745	13,23	27,41
Кентиш-Таун	30—335	10,23	32,12
Франция			
Мартенкур	600—1200	16,61	25,99
Па-де-Калэ	130—1364	11,01	17,95
Рушан	300—600	10,97	33,63
	300—1009	8,86	37,84
	610—1009	5,82	41,23

Продолжение табл. 2—XIX

Место	Пределы глубины, м	Экстраполированная поверхностная температура почвы (*a*), °С	Средний термический градиент (*b*), °С/км
Германия			
Пехельбронн	36—305	15,33	47,90
	36—516	13,04	63,81
Шладебах	36—306	10,16	27,25
	36—1716	9,53	28,01
	610—1716	8,29	29,00
Зенневитц	451—634	8,16	23,60
	451—1084	9,42	21,29
	610—1084	9,23	21,45
Шперенберг	220—596	15,28	29,60
	220—1269	16,74	26,41
	610—1269	20,32	22,93
Уэльс			
Флинт-Коунти	142—317	9,02	23,82
Глеморганшайр	166—388	8,98	26,37
Нидерланды			
Опло	198—643	11,98	29,55
	198—1000	11,77	30,04
	610—1000	9,72	32,35
Севенум	100—400	12,64	32,84
	100—1000	13,06	29,49
	610—1000	6,81	36,91
Витватерингс	300—700	6,69	34,21
	300—1245	6,42	34,34
	610—1245	5,53	35,23
Военсдрехт	230—670	13,18	27,47
	230—1200	9,06	38,06
	610—1200	5,07	42,36
Утрехт	35—365	10,52	19,23
Польша			
Битков	50—300	7,58	16,42
	50—950	6,74	20,52
	610—950	4,49	23,44
Парушовиц	37—316	12,37	23,11
	37—1959	10,49	26,16
	610—1959	9,11	30,15
Кросно	50—300	8,68	22,64
	50—600	8,49	23,57
Чехословакия			
Пршибрам	74—360	8,63	16,64
	74—889	8,98	14,89
	610—889	10,74	12,58
	21—369	7,91	18,79
	21—579	8,47	15,20
СССР			
Тустановичи	50—300	10,41	16,70
	50—1200	7,73	25,74
	610—1200	3,16	30,68

Продолжение табл. 2—XIX

Место	Пределы глубины, м	Экстраполированная поверхностная температура почвы (*a*), °С	Средний термический градиент (*b*), °С/км
СССР *(продолжение)*			
Борислав (ссылка 2)	52—300	8,81	18,61
	52—1500	7,41	26,67
	610—1500	7,56	26,59
	50—300	8,74	18,92
	50—1275	7,12	26,87
	610—1275	6,09	27,98
	100—300	9,18	18,61
	100—1350	8,04	21,47
	610—1350	5,29	24,02
	50—300	7,53	13,78
	50—1650	3,97	28,14
	610—1650	0,28	28,14
Биби-Эйбат	267—617	19,57	31,10
	267—986	19,41	31,70
	610—986	22,39	27,52
	181—459	12,33	46,99
Сураханы	181—600	15,19	38,80
	95—295	11,55	23,90
Донецкий бассейн	95—1200	9,94	28,91
	610—1200	8,56	30,68
	85—306	9,73	27,05
	85—540	9,72	27,32
Харьков	50—350	10,69	26,47
	50—565	12,13	17,06
	50—450	12,44	14,78
Мэнче-Тундра (ссылка 4)	18—319	2,27	6,54
	18—449	2,15	7,25
Москва	100—300	7,44	16,95
	100—700	6,68	20,09
Бразилия			
Минас-Жераес	1228—1780	17,98	14,93
	1228—1871	17,13	15,51
Канада			
Онтарио	76—345	1,10	18,74
	76—934	2,68	11,12
	610—934	4,09	9,00
	72—411	4,98	8,13
	72—1186	4,95	8,17
	610—1186	5,05	8,04
	55—374	5,01	9,19
	55—1178	5,28	7,82
	610—1178	4,92	8,17
	335—792	3,23	13,63
	335—1288	3,43	13,21
	610—1288	3,62	13,03
	119—607	5,45	10,46
	119—1090	5,28	10,92
	610—1090	5,15	11,08
	179—611	3,34	14,00
	179—915	2,37	15,40
	610—915	5,24	10,75

Продолжение табл. 2—XIX

Место	Пределы глубины, м	Экстраполированная поверхностная температура почвы (*a*), °С	Средний термический градиент (*b*), °С/км
Онтарио—(*продолжение*)	151—604	3,53	12,67
	151—912	3,50	12,81
	610—912	3,78	12,47
	122—305	7,04	15,18
	122—945	7,69	11,74
	610—945	9,30	9,88
Альберта	76—457	4,39	25,63
	76—305	3,75	43,74
	76—386	4,22	40,65
Колумбия, Пуэрто-Вилхес	30—305	26,30	15,13
	30—945	25,96	15,31
	610—945	25,73	15,98
Мексика, Туспан	30—818	23,39	55,70
	23—297	27,36	39,19
	23—1244	24,43	45,22
	610—1244	18,73	51,22

Таблица 3—XIX

Геотермический градиент, теплопроводность горных пород и тепловой поток к земной поверхности в Южной Африке [7]

Буровая скважина	Глубина, м	Порода	Теплопроводность, $\frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}} \cdot 10^{-3}$	Геотермический градиент, °С/км	Тепловой поток, $\frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}} \cdot 10^{-6}$
Джекоба № 3	48—389	Лава	8,0	12,10	0,97
	389—846	Порфир	8,0	12,10	0,97
	846—2143	Лава	6,9	14,07	0,97
Дорнхоутривиер	304—1724	Лава	7,4	13,08	0,97
Герхардминнеброн	0—1271	Доломит	11,1	8,55	0,95*
	1291—2880	Кварцит	13,2	9,67	1,28
Дрифонтейн	30—587	Доломит и кремнистый сланец	10,7	7,05	0,75*
Дорнклоф	27—1250	Доломит	11,0	6,33	0,70*
	1250—1931	Кварцит и дайки		9,45	1,15
Дуббельдевлей	853—1497	Гранит	6,8	22,3	1,52
Рэф-Нигель	91—427	Лава	7,	13,85	1,02
	427—930	Кварцит	13,6	8,07	1,08
	930—1387	Кварцит и долерит		9,22	0,98

* Для доломита градиенты считаются слишком низкими, что является результатом циркуляции в нем воды.

Таблица 4—XIX

Тепловой поток к земной поверхности в Великобритании [1,3]

Для ознакомления с методом вычисления, измерениями теплопроводности и поправками на влияние оледенения следует обращаться к ссылкам.

Буровая скважина	Глубина, м	Тепловой поток, $\frac{\text{кал.}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек.}} \cdot 10^{-6}$	
		у поверхности без поправки	с поправкой на влияние ледникового периода
Бальфур	543—1205	0,68	1,16
Хольфорд	61—396	0,74	1,43
Блайтвуд	18—106	1,24	1,56
Южный Белгрей	18—160	1,53	1,85
Хенкхэм	—236	0,71	1,12
Дюрхэм	0—530	1,47	1,82
Вейган	0—745	1,01	1,34
Борленд	0—1006	0,95	1,28

Таблица 5—XIX

Максимальные наблюденные температуры лав у вулканических жерл [5]

Местность	Температура, °C	Источник
Килауэа	1185	Day and Shepherd
Килауэа	1200	Jaggar
Везувий (1904, лава)	1100	Brun
Везувий (1913, лава)	1200	Perret
Стромболи (1901, лава)	1150	Brun
Этна (1892, лава)	1060	Bartoli
Этна (1892, лава)	1300	Philipp
Сакура-Има (1914, лава)	1048	Koto
Ошима	1200—1300	Tsuboi

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ XIX

1. Anderson, Proc. Roy. Soc. Edinburgh, 60, 192, 1939—1940.
2. Arctowski, Inst. de géophysique de l'université de Leopul (Lwow); Comm. 7, 1, 1924; Geogr. Journ. 66, 422, 1925.
3. Benfield, Proc. Roy. Soc. 173A, 428, 1939.
4. Владимиров, Красковский и Семенов, ДАН СССР, 23, 355, 1939.
5. Дэли, Изверженные породы и глубины Земли, ОНТИ НКТП СССР, 1936.
6. Fitton, Brooks, Mo. Weather Rev. 59, 1, 1931.
7. Krige, Proc. Roy. Soc. 173A, 450, 1939; Bullard, idem. 173A, 474, 1939.
8. Van Orstrand, Температуры, наблюденные в земной коре, в сборнике «Внутреннее строение Земли», под редакцией Gutenberg, McGraw-Hill, New York, 1939. В этой работе содержатся подробные ссылки на оригинальные статьи.
9. Van Orstrand, «Problems of petroleum geology», под редакцией Wrather, Lahee, Am. Assoc. Petr. Geol. Tulsa, Okla., 1934.
10. Weiss, Chem. Met. and Min. Soc. South Africa, Journ. 39, 149, 1938.

ГЛАВА XX

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Содержание

Таблица 1—XX. Магнитная восприимчивость магнетита 273
» 2—XX. Восприимчивость магнитных минералов 274
» 3—XX. Пределы магнитной восприимчивости для главных типов горных пород 274
» 4—XX. Магнитная восприимчивость и остаточное намагничивание горных пород 275

ВВЕДЕНИЕ

Магнитная восприимчивость магнетита и ферромагнитных минералов. Магнетит вследствие его относительно высокой магнитной восприимчивости и широкого распространения является самым важным ферромагнитным минералом. Действительно, величина магнитной восприимчивости породы обычно определяется только по содержащемуся в ней магнетиту. Другие ферромагнитные минералы немногочисленны и реже встречаются. Из них наиболее важными являются пирротин, ильменит, спекулярит, франклинит и кубанит.

В табл. 1 — XX приведены значения магнитной восприимчивости магнетита. Эти значения изменяются в широком диапазоне и зависят не только от образца, но также от напряженности намагничивающего поля. В природных крупных месторождениях магнетита, как, например, в рудных телах, очень большие величины восприимчивости, такие, какие были получены Вейссом [29] и Штейнметцом [25] для отдельных кристаллов, или совсем не наблюдаются, или наблюдаются очень редко. Обычно пользуются величиной около 0,3, но возможны исключения, так как восприимчивость магнетита, подобно восприимчивости других ферромагнитных веществ, чувствительна к небольшим изменениям в составе или структуре.

Табл. 2—XX содержит измеренные восприимчивости других ферромагнитных минералов. Следует отметить, что восприимчивость магнетита по крайней мере в десять раз больше восприимчивости других минералов.

Магнитная восприимчивость горных пород. В литературе опубликовано большое число измерений восприимчивости горных пород. (См. приведенные ссылки.) Значения, приводимые для различных образцов одного и того же типа горной породы, изменяются больше чем в 40 раз, что и следовало ожидать, так как восприимчивость определяется небольшими количествами немногих акцессорных минералов, содержание которых может меняться в значительной степени, не всегда влияя на классификацию породы. Следовательно, определение восприимчивости образца породы имеет сомнительное значение. Со статистической точки зрения, однако, хорошо известно, что существует четкая корреляция между восприимчивостью и типом горной породы. Степень этой корреляции иллюстрируется данными, приведенными в табл. 3—XX. В этой таблице измерения, произведенные на 317 образцах, взяты из литературы и классифицированы по типу горной породы и восприимчивости. Таблица показывает, что главные типы горных пород могут быть расположены следующим образом в порядке уменьшающейся магнитной восприимчивости: 1) основные эффузивные, 2) основные интрузивные, 3) граниты, 4) гнейсы, кристаллические и глинистые сланцы и 5) осадочные породы. Однако ясно, что в каждом из этих типов пород встречаются существенные исключения, мешающие делать надежные заключения о магнитной восприимчивости только на основании классификации горных пород.

Индуцированное намагничивание горных пород в общем мало, и поэтому его можно просто вычислить по формуле $I = kH$, где I обозначает намагничивание, k — восприимчивость, а H — существующую напряженность земного магнитного поля. Однако горные породы могут иметь «перманентное», или остаточное намагничивание, которое часто бывает гораздо интенсивнее, чем это можно было бы ожидать, согласно вышеприведенной формуле. Кроме того, сообщается о нескольких случаях, в которых направление намагничивания совершенно не совпадает с существующим направлением земного индуцирующего поля. В некоторых случаях эти два направления, повидимому, совершенно противоположны. Такие наблюдения, конечно, не обязательно внушают мысль об изменении направления земного магнитного поля; нередко их можно объяснить частично или в целом другими причинами — например, складкообразованием или опрокидыванием пластов структуры, происшедшими позже намагничивания.

Таблица 1—XX

Магнитная восприимчивость магнетита

Происхождение	Напряженность намагничивающего поля, эрстеды	Магнитная восприимчивость в единицах c. g. s. (электромагнитных) на см³	Ссылка
A. Отдельные кристаллы			
Броццо, Италия	20	8,2 (a) 7,5 (b) 9,2 (c)	29
Тироль	100	3,5 3,9 2,8	29
	2	8,0 5,2 5,6	
	8 (d)	12,5 8,2 9,8	
Траверселле, Италия	1	24,0	29
	3,5 (d)	29	
B. Твердые, неориентированные образцы			
Рудник Тилли-Фостер, округ Петнэм, Нью-Йорк	20	3	25
Неизвестное местонахождение	20	5	25
Гарц, Германия	1	0,49 (плотность = 4,81)	18
	1	0,44 (плотность = 4,83)	18
Стриберг, Швеция	1	0,85 (плотность = 4,9)	18
Коскюлскюлле, Швеция	1	2,0 (плотность = 5,15)	18
C. Порошки			
Неизвестное местонахождение	1	0,0013 (порошок гранита, 10% магнетита по весу)	18
Майнвилл, Нью-Йорк	0,64	0,8 (пустот 23%)	22
	20	1,3 (пустот 23%)	22
	0,64	(e) 0,3 (пустот 75%)	22
	0,64	(e) 0,26 (пустот 95%)	22
Синтетический	10	0,23 до 0,63	30

(a) Параллельно двойной оси.
(b) Параллельно тройной оси.
(c) Параллельно четверной оси.
(d) Напряженность поля при максимальной восприимчивости.
(e) Действующие значения для магнетита; восприимчивость всего образца с 75% пустот = 0,25 · 0,3 = 0,075.

Таблица 2—XX

Восприимчивость магнитных минералов

Минерал	Магнитная восприимчивость в единицах c.g.s. (электромагнитных) на см³	Напряженность намагничивающего поля, эрстеды	Ссылка
Магнетит	0,3—0,8 (см. табл. 1—XXI)	0,6	23
Пирротин, Садбери, Онтарио	0,028	0,6	23
Пирротин	0,007	—	26
Ильменит	0,031	—	26
Ильменит *	0,044	0,6	23
Спекулярит	0,004	0,6	23
Спекулярит	0,003	—	26
Франклинит	0,036	—	26

* Недавние неопубликованные измерения Р. Функхаузера (B. S. Thesis, Princeton, 1939) на ильмените, специально подобранном, свободном от магнетита, дают объемную восприимчивость в $6 \cdot 10^{-4}$ при напряженностях свыше 2000 эрстедов.

Влияние давления. Изучение влияния простого сжатия на восприимчивость магнетита и некоторых горных пород [33] дало по существу отрицательные результаты. Не найдено никакого изменения точки Кюри для железа, никеля, стали, магнетита и метеоритного железа при гидростатических давлениях до 3600 ат [1] (см. также ссылку 31).

Таблица 3—XX

Пределы магнитной восприимчивости для главных типов горных пород

(Ссылки 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 27, 28, 32)

[Восприимчивость в единицах c. g. s. (электромагнитных) на см³]

Тип породы	Количество образцов	Процент образцов с восприимчивостью			
		меньше 10^{-4}	между 10^{-4} и 10^{-3}	между 10^{-3} и $4 \cdot 10^{-3}$	больше $4 \cdot 10^{-3}$
Основные эффузивные	97	5	29	47	19
Основные интрузивные	53	24	27	28	21
Граниты и родственные породы	74	60	23	16	1
Гнейсы, кристаллические сланцы, шиферные сланцы	45	71	22	7	0
Осадочные породы	48	73	19	4	4

Остаточное намагничивание горных пород (B. Вакиэ). Направление остаточного намагничивания масс изверженных пород является весьма существенным при интерпретации данных магнитных разведок с целью определения геологической структуры. Однако в настоящее время данные слишком расходятся, чтобы иметь практическое значение, так что при интерпретации магнитных разведок предполагается, что направление намагничивания породы совпадает с направлением земного магнитного поля. Изверженные породы приобретали это остаточное намагничивание, когда они остывали ниже точки Кюри в земном магнитном поле. Это

Таблица 4—XX

Магнитная восприимчивость и остаточное намагничивание горных пород

(*B. Вакиэ*)

k = магнитная восприимчивость в единицах c. g. s. (электромагнитных) на см³.
I_r = остаточное намагничивание в электромагнитных единицах c. g. s.
I_r/I_s = отношение намагничивания остаточного к индуцированному.

Порода	$10^3\,k$	$10^3\,I_r$	I_r/I_s	Ссылка
Третичный или четвертичный базальт из Пруссии:				
Мюнстерберг	2,8	4,4	3,2	12
Кассель	5,2	1,3	0,5	
Бильтштейн	1,9	1,1	1,2	
Хорнберг	3,4	4,4	2,6	
Гранодиорит, меловой (?), Сант Евлалия, Перу	4,2	1,2	0,6	12
Андезит, послемеловой, горы Вест Эльк	1,6	0,6	0,8	12
Оливиновый диабаз, докаменноугольный (?), Тичино	0,7	0,5	1,4	12
Диабаз, докембрийский, Ангерманланд, Швеция	2,7	3,3	2,4	12
Кварцевый порфир, пермь, Кольмен, Саксония, среднее из 6 образцов	0,23	0,09	0,8	12
Габбро, послесилурское, Мёгнас, Швеция	4,1	2,9	1,4	12
Габбро, третичное, Мулл, Шотландия	0,31	42,0	28,0	12
Габбро, третичное, Скай, Англия	0,94	12,0	25,5	12
Базальт, заключенный в третичном габбро, метаморфизованный, Скай, Англия	3,0	14,0	9,3	12
Габбро, Лофтахаммар, Швеция	0,44	1,9	8,6	12
Базальт, послемезозойский, Бомбей, Индия	4,5	1,2	0,5	12
Лаурдалит, домезозойский, Лаугензунд, Норвегия	3,8	0,38	0,2	12
Гранит, Колорадо, среднее из 8 образцов	2,7	0,45	0,3	16
Гранит-порфир, Оклахома, среднее из 2 образцов	0,5	1,6	6,4	16
Гранит, Спевино (Spavinaw), Оклахома	1,5	4,5	6,0	16
Образцы кернов из нефтяных скважин, Анцоатеги и Монагас, Венецуэла:				
Эль Тигр, № 1, гранит	0,07	0,004	0,1	16
Пилон, № 1, гранит	0,03	0,001	0,07	
Иопальс, № 1, гранитоидный гнейс	0,12	0,013	0,2	
Мерей, № 2, кварцевый диорит	3,4	1,7	1,0	
Уракоа, № 1, гранато-биотитовый сланец	0,24	0,07	0,6	
Тембладор, № 4, биотитовый кристаллический сланец	0,026	0,005	0,4	

явление Кенигсбергер [12] назвал термореманентностью. Табл. 4—XX показывает магнитную восприимчивость, остаточное намагничивание и отношение остаточного намагничивания к индуцированному намагничиванию в поле напряженностью в 0,5 эрстеда для некоторых изверженных и метаморфических горных пород. Некоторые осадочные породы тоже обладают остаточным намагничиванием, которое можно сравнивать по величине с их индуцированным намагничиванием. Наклонение магнитного вектора измерялось в большом количестве кернов, взятых из скважин, с целью связать его с возрастом горной породы. Результаты [16] заставляют предположить, что намагничивание было нарушено бурением в значительном количестве случаев, что позволяет

считать этот метод неприемлемым. Кроме того, в литифицированных осадках намагничивание нельзя относить ко времени их отложения; оно могло возникнуть при кристаллизации вторичных минералов в гораздо более позднее время. Интересная работа Мак Ниша и Джонсона [15] о ленточных глинах не вызывает таких возражений и показывает, что изменения в склонении во время отступания плейстоценовых ледников в Новой Англии — величины того же порядка (35°), как и склонения, наблюдавшиеся в историческое время. По Линтону [13], керны осадочных пород, взятые из скважин, могут быть ориентированы путем определения направления их остаточного намагничивания, но удовлетворительных физических доводов в пользу этого метода выдвинуто не было.

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ XX

1. Adams, Green, Phil. Mag. 12, 361, 1931.
2. Бахурин И., Изв. Института прикладной геофизики, Ленинград, 3, 1927.
3. Booth, Rayner, Journ. Roy. Soc. N. South Wales, 67, 113, 1933.
4. Collingwood, Bull. A. A. Petr. Geol. 14, 1187, 1930.
5. Edge, Laby, Geophysical Prospecting, Cambridge, 1930.
6. Hallimond, Herron, Proc. Roy. Soc. 141A, 302, 1933.
7. Koenigsberger, Terr. Mag. and Atm. Elec. 34, 209, 1929.
8. Koenigsberger, Terr. Mag. 35, 145, 1930.
9. Koenigsberger, Zeit. Geophys. 5, 62, 1929.
10. Koenigsberger, Beitr. z. Geophys. 23, 248, 1929.
11. Koenigsberger, Schweiz. Min. Petr. Mitt. 16, 209, 1936.
12. Koenigsberger, Terr. Mag. 5, 119, 290, 1938.
13. Lynton, A. A. P. G. 21, 580, 1937; Geophysics 3, 122, 1938.
14. Malamphy, De Amaral, Odonne, A.I.M.E. Contrib. 96, 1936.
15. McNish, Johnson, Terr. Mag. 43, 401, 1938.
16. Неопубликованные результаты из фондов Gulf Research and Development Co.
17. Pockels, Ann. d. Phys. 63, 195, 1897.
18. Puzicha, Zeit. prakt. Geol. 38, 161, 1930.
19. Rothe, C. R. 198, 1443, 1934.
20. Rucker, Proc. Roy. Soc. 48, 505, 1890.
21. Rucker, White, Proc. Rey. Soc. 63, 460, 1898.
22. Slichter, A.I.M.E. Geophys. Prosp. 238, 1929.
23. Slichter, A.I.M.E. Geophys. Prosp. 343, 1929.
24. Stearn, A.I.M.E. Geophys. Prosp. 81, 318, 1929.
25. Steinmetz, Trans. A.I.E.E. 9, 671, 1892.
26. Stutzer, Gross, Bornemann, in Ambronn and Cobb, Geophysics, McGraw-Hill, 1928; Metall u. Erz. 15, 1, 1918
27. Takagi, Ishiwara, Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ. 3, 127, 1914.
28. Турцев, Известия Академии Наук СССР, Ленинград, 7, 89, 1928.
29. Weiss, L'Eclairage Electrique, 7, 487, 1896.
30. Welo, Baudisch, Phil. Mag., 3, 396, 1927.
31. Welo, Science 64, 453, 1926.
32. Wilson, Phil. Trans. Roy. Soc. A219, 83, 1919.
33. Wilson, Proc. Roy. Soc. 101A, 445, 1922.

ГЛАВА XXI

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД И МИНЕРАЛОВ

Содержание

Таблица 1 — XXI. Электрическое удельное сопротивление горных пород и почв 280
» 2 — XXI. Электрическое удельное сопротивление минерализованных горных пород 284
» 3 — XXI. Электрическое удельное сопротивление железного блеска в кварцевом порфире 284
» 4 — XXI. Электрическое удельное сопротивление металлических сульфидов 285
» 5 — XXI. Электрическое удельное сопротивление некоторых окислов и отдельных минералов 287
» 6 — XXI. Электрическое удельное сопротивление углеводородов 289
» 7 — XXI. Электрическое удельное сопротивление природных вод 289
» 8 — XXI. Электрическое удельное сопротивление соленых вод 290
» 9 — XXI. Влияние воды и нефти на сопротивление песчаника постоянному току 290
» 10 — XXI. Электрическое удельное сопротивление влажного песка 291
» 11 — XXI. Электрическое удельное сопротивление почв и морской воды, измеренное с помощью переменного тока высокой частоты 291
» 12 — XXI. Диэлектрические постоянные пород 292
» 13 — XXI. Диэлектрические постоянные минералов . . . 293
» 14 — XXI. Диэлектрическая постоянная сегнетовой соли в зависимости от температуры 293

ВВЕДЕНИЕ

Электрическое удельное сопротивление

1. **Электрические проводники.** Электропроводность горных пород и почв в естественных условиях обычно целиком определяется содержанием влаги. За некоторым исключением твердые минералы, составляющие породу или почву, являются хорошими изоляторами. Таким образом электропроводность не является особым свойством горной породы или типа горной породы; она зависит не только от способности породы к поглощению воды и от вида и характера пор, но также и от количества и состава содержащейся в ней воды. Следовательно, проводимость может зависеть в большой степени от геологических и климатических условий, в которых находятся горные породы. Отсюда следует, что на основании электрических удельных сопротивлений горных пород, приводимых в литературе, нельзя предсказывать удельные сопротивления сходного типа породы или почвы, если только содержания влаги и солености не поддаются сравнению. В случае анизотропных пород проводимость обычно сильно зависит от направления. Например, в слоистых или четко напластованных горных породах проводимость вдоль залегания может быть в 100 раз больше, чем в направлении, перпендикулярном залеганию. Эти рассуждения ограничивают полезность таблиц удельных сопротивлений горных пород. В общем, такие данные показывают лишь порядок величины ожидаемых удельных сопротивлений, в случаях же необходимости получить вполне надежные величины удельных сопротивлений горных пород следует, если возможно, производить измерения на месте.

2. **Металлические проводники.** Некоторые руды и минералы обладают значительной электропроводностью металлического характера. Обычные сульфиды металлов (за исключением сфалерита), арсениды, некоторые окислы, такие, как магнетит, и некоторые окислы марганца, графит и самородные металлы являются главными примерами этого класса. Электропроводность в общем сильно зависит от небольших изменений в составе и от второстепенных примесей. Сравнительно недавно Телькес [64] исследовала влияние изменений в составе на электропроводность искусственных агломератов сульфидов и окислов. Она нашла, что небольшой избыток свободного металла может увеличить проводимость в некоторых случаях в тысячу раз. Самое обширное исследование электропроводности отдельных кристаллов минералов было сделано Харвеем [29]. Его измерения делались под микроскопом на шлифах небольших кристаллов как четырехэлектродным, так и двухэлектродным методом. Он нашел, в согласии с Телькес и другими, что удельное сопротивление данного минерала значительно колеблется от образца к образцу. Несомненно, что эта тенденция к изменению была усилена малым линейным масштабом измерений. Кажется вероятным, что большие разницы в электропроводности, обычно встречающиеся при измерениях, производимых на природных массивных образцах металлических сульфидов, вызываются сравнительно небольшими изменениями состава.

В природных месторождениях металлических проводников, как, например, рудных тел, общая проводимость массы зависит от многих дополнительных переменных. Очевидно значение общей концентрации проводящих минералов (см. табл. 3 — XXI). Если концентрация так мала, что проводящие минералы встречаются в виде отдельных масс, включенных в окружающую породу, электропроводность будет сходна с электропроводностью пустой породы. Кроме того, концентрация, требуемая для установления эффективной электрической непрерывности, зависит от типа месторождения минерала и от характера присутствующих проводящих минералов. Таким образом, минерал, как, например, галенит, кубические кристаллы которого более или менее рассредоточены в окружающей породе, должен присутствовать в значительных процентах для того, чтобы образовать действительную непрерывность на значительном пути; опыт показывает, что всего лишь несколько процентов сульфидов меди — халькопирита, халькоцита, борнита, энаргита, ковеллина — электрически уже соединяют массу сульфидов. Электрическая непрерывность, проявляющаяся в мелких жилках халькопирита и ковеллина, часто поразительна. Так как сульфиды обычно встречаются в виде сложной ассоциации многих видов сульфидов, ясно, что общее влияние их концентрации и состава на проводимость является сложным. Следует признать, что нет двух рудных тел, одинаковых в отношении удельного сопротивления. В то же время следует подчеркнуть, что тела с большой электропроводностью обычно содержат высокий процент одного из двух обычных сульфидов — пирита и пирротина.

Таблицы этой главы показывают пределы электрических удельных сопротивлений, наблюдаемых на природных образцах. Кроме того, они могут служить основой для будущих, более обширных таблиц удельных сопротивлений, наблюдаемых в важных геологических или горнопромышленных районах.

Во втором столбце таблиц указывается место взятия образца, если оно известно. Различие в проводимости у сходных образцов проводящих руд или минералов из разных районов иногда очень велико. Вероятно, такие различия следует объяснить различиями в генезисе и присутствии различных второстепенных составных частей. В четвертом столбце тип образца и метод измерения обозначены следующими сокращениями:

A. C. обозначает измерение с помощью переменного тока (не коммутированного постоянного тока);

f » измерение в поле;

l » лабораторное измерение;

2 » измерение двухэлектродным методом, включающим влияния контактного сопротивления у электродов;

4 » измерение четырехэлектродным методом, устраняющим влияние контактного сопротивления;

n обозначает, что образец был близок к своим природным условиям;

S » » образец пропитывался подземной водой, присущей данной породе.

При подборе данных для таблиц было решено в общем оставлять лишь измерения, выполненные на образцах в природных условиях. Объединения вышеупомянутых обозначений имеют определенное значение — например, 4*l* обозначает лабораторное измерение четырехэлектродным методом. Если возможно, в общем следует предпочитать

измерения в поле четырехэлектродным методом. При этом методе устраняются контактные сопротивления, так же как и сопротивления, вызванные контактными потенциалами, если ток коммутируется. Кроме того, им можно измерять характерные образцы значительных размеров.

3. Влияние температуры на электрическое удельное сопротивление пород. Байар-Дюкло [9] приводит данные о температурном изменении удельного сопротивления пород приблизительно между 15° и 50° С. Справедлива формула следующего типа:

$$\log R = \frac{B}{T} - A,$$

где R — удельное сопротивление в омах на см, T — асболютная температура, а A и B — константы. По данным, имеющимся для нескольких десятков разных типов пород, константа B меняется в пределах от $1{,}3 \cdot 10^3$ до $4{,}1 \cdot 10^3$, но обычно находится между $2 \cdot 10^3$ и $3 \cdot 10^3$. Для морской воды эта константа равна около $8{,}5 \cdot 10^2$ [41].

Диэлектрические постоянные пород

Диэлектрические постоянные минералов и пород меняются в сравнительно узких пределах. Вследствие чрезвычайно большого значения этой величины для воды (81,1) и обычного присутствия воды в массивных и рыхлых породах, вода сильно влияет на величины диэлектрических постоянных горных пород. Значения диэлектрических постоянных пород и минералов внесены в таблицы Кеи и Леби (Kaye and Laby [38]) и в Смитсонианские таблицы (Smithsonian tables [6]). Можно также пользоваться измерениями, сделанными Пердью (Purdue [56]) и позднее Достоваловым [19]. Величины обычно находятся в пределах от 6 до 15, но в некоторых случаях наблюдались такие большие величины, как 40. Табл. 12 — XXI включает величины диэлектрической постоянной для более обычных типов горных пород. Табл. 13—XXI содержит подобные данные для минералов.

Таблица 1 — XXI

Электрическое удельное сопротивление горных пород и почв

Горная порода	Местность	Удельное сопротивление, ом·см	Тип измерения	Ссылка
	Изверженные породы			
Аплит	Офотен, Норвегия	$>5 \cdot 10^7$		66
Андезит, слегка измененный	Поркупайнский округ, Онтарио	$4 \cdot 10^5$	f4n	39
Андезит, полностью измененный	Поркупайнский округ, Онтарио	10^4—10^5	f4n	39
Андезито-дацит, свежий	Поркупайнский округ, Онтарио	10^6	f4n	39
Амигдалоид	Мичиган	10^4—10^5	f4ns	60
Диорит	Лимонэ, Франция	10^8	1A.C.2n	9
Фойяит	Кольский полуостров	10^5—10^6	14n	19
Габбро, серпентин	Поркупайнский округ, Онтарио	10^6	f4n	39

Продолжение табл. 1—XXI

Горная порода	Местность	Удельное сопротивление, ом·см	Тип измерения	Ссылка
Гранит	Валье дель Эста, Испания	10^7—10^9	1.AC.2n	9
Зеленокаменная порода	Мичиган	10^5—3.10^5	f4ns	60
Гранитопорфир	Нью-Мексико	10^6		66
Зеленокаменная порода, свежая	Вумен-Лейк, Онтарио	10^6	f4n	39
Гиалобазальт	Винсэнтин, Франция	10^8	1A.C.2n	9
Лабрадорит		10^7	1A.C.2n	9
Лавовый поток (основная лава)	Гора Шеперд, Миссури	10^6—10^7	f4n	61
Лава	Кивинаун, Мичиган	10^4—10^6	f4n	36
Лава, свежая	Беченс (Buchans), Ньюфаундленд	$3\cdot10^5$—10^6	f4n	39
Лава, измененная и слоистая	Беченс, Ньюфаундленд	10^4	f4n	39
Микрогранит	Лонджемер	10^8—10^9	1A.C.2n	9
Минетта, слегка измененная	Поркупайнский округ, Онтарио	10^5	f4n	39
Минетта, измененная и смещенная	Поркупайнский округ, Онтарио	10^4	f4n	39
Обсидиан	Эйрен, Шотландия	10^{10}	1A.C.2n	9
Полевошпатовый порфир, несмещенный	Мунте (Moonta), Австралия	$4\cdot10^5$	Все типы	20
Полевой шпат из кварцевого порфира, свежий	Беченс, Ньюфаундленд	$4\cdot10^5$	4n	39
Желтый кварц из кварцевого порфира, слегка измененный	Беченс, Ньюфаундленд	$4\cdot10^4$	f4n	39
Желтый кварц из порфира, сильно измененный	Беченс, Ньюфаундленд	$6\cdot10^3$	f4n	39
Порфир	Арюди (Arudy)	10^7	1A.C.2n	9
Фонолит	Жу-су-Монжу, Франция	10^7—10^8	1A.C.2n	9
Кварцевый порфир, влажный		$4\cdot10^4$	f4n	40
Кварцевая жила, массивная	Поркупайнский округ, Онтарио	$>10^6$	f4n	39
Кварцевая жила, массивная	Вумен-Лейк, Онтарио	10^7	f4n	39
Кварцевый порфир	Айрон-Маунтен, Миссури	10^6	2	61
Сиенит, слегка измененный	Поркупайнский округ, Онтарио	$3\cdot10^5$	f4n	39
Трапп, Куинси	Мичиган	$2\cdot10^4$—$4\cdot10^5$	f4ns	60
Поток траппа, пенистый, пористый	Мичиган	$2\cdot10^4$	f4ns	60
Поток траппа, компактный пласт	Мичиган	$5\cdot10^4$	f4ns	60
Туф окремненный, минерализованный	Беченс, Ньюфаундленд	Вплоть до 10^6	f4n	39

Продолжение табл. 1—XXI

Горная порода	Местность	Удельное сопротивление, ом·см	Тип измерения	Ссылка
Метаморфические породы				
Глинистый сланец, каменноугольный		10^5	f4n	40
Гнейс		10^8—10^9	1A.C.2n	9
Мрамор белый	Каррара	10^1	1A.C.2n	9
Мрамор	Арюди, Франция	$4 \cdot 10^8$	1A.C.2n	9
Мрамор, Сант-Анн	Ла Специя, Франция	10^9	1A.C.2n	9
Мрамор желтый	Вар, Франция	10^{10}	1A.C.2n	9
Филлит, формация Эллисон	Рудник Хомстэк, Юж. Дакота	$5 \cdot 10^4$	f4n	39
Кварцит, формация Эллисон	Рудник Хомстэк, Юж. Дакота	$3 \cdot 10^6$	f4n	39
Кристаллический сланец, слюда	Уеллеру, Австралия	10^7	Все типы	20
Кристаллический сланец, слегка минерализованный	Уеллеру, Австралия	10^6	Все типы	20
Кристаллический сланец, минерализованный и слегка окремненный	Поркупайнский округ, Онтарио	10^5	f4n	39
Кристаллический сланец с некоторым количеством кварца	Поркупайнский округ, Онтарио	10^6	f4n	39
Кристаллический сланец известковистый	Рио Навия, Испания	10^7—10^9	1A.C.2n	9
Кристаллический сланец с серицитом, паралл. сланцеватости		$6 \cdot 10^6$—$5 \cdot 10^7$	1A.C.2n	9
Кристаллический сланец с серицитом, перпенд. сланцеватости		$7 \cdot 10^6$—$3 \cdot 10^9$	1A.C.2n	9
Серпентин	Поркупайнский округ, Онтарио	$2 \cdot 10^5$—10^6	f4n	39
Серпентин, смещенный	Поркупайнский округ, Онтарио	$6 \cdot 10^4$	f4n	39
Глинистый сланец, Нонсач	Мичиган	10^4	f4n	36
Глинистый сланец, юрский, паралл. сланцеватости		$5 \cdot 10^4$	f4n	40
Глинистый сланец, юрский перпенд. сланцеватости		10^7	f4n	40
Кристаллический сланец, биотитово-гранатовый	Рудник Хомстэк, Юж. Дакота	$5 \cdot 10^4$	f4n	39
Глинистый сланец, пласт	Шемокин, Пенсильвания	10^5	f4n	21
Глинистый сланец, Моэнкопие	Метеоритный кратер, Аризона	$2 \cdot 10^4$	f4n	37

Продолжение табл. I—XXI

Горная порода	Местность	Удельное сопротивление, ом·см	Тип измерения	Ссылка
Осадочные породы				
Известняк юрский		$3 \cdot 10^5$	f4n	40
Известняк.....	Испания	10^4	f 4ns	60
Известняк, кембрийский	Шеперд-Маунтен, Миссури	10^4—10^5	f4n	61
Конгломерат	Айрон-Маунтен, Миссури	$2 \cdot 10^4$—10^5	f4n	61
Песчаник, восточный ...	Мичиган	$3 \cdot 10^3$—10^4	f4n	36
Песчаник, западный	Мичиган	$3 \cdot 10^4$	f4n	36
Песчаник, железистый, юрский.....		$4 \cdot 10^5$	f4n	40
Песчаник, Моэнкопие...	Метеоритный кратер, Аризона	10^5	f4n	40
Песчаник, Кебеб (Kaibab)	Метеоритный кратер, Аризона	$2 \cdot 10^5$	f4n	37
Песчаник, Коконайно ..	Метеоритный кратер, Аризона	$3 \cdot 10^4$	f4n	37
Песчаник, Зупэ (Supai) .	Метеоритный кратер, Аризона	10^5	f4n	37
Песчаник.....	Маммут-Кэв, Кентукки	10^5		43
Известняк.....	Маммут-Кэв, Кентукки	10^5		43
Осадки побережья Гольфа.....		всего 10^2		44
Рыхлые породы				
Глина, голубая.....		$2 \cdot 10^4$	f4n	14
«Глинистая земля».....	Сев. часть США	10^4—$4 \cdot 10^4$	f4ns	45
Глина, богатая магниевыми солями	Зап. Австралия	100—250	f4ns	50
Глинистый покров	Шемокин, Пенсильвания	10^5	f4ns	21
Глина, валуны.....	Сев. Онтарио	$3 \cdot 10^4$—10^6	f4n	30
Глина морская	Сев. Онтарио	$3 \cdot 10^5$	f4n	30
Глина огнеупорная	Сев. Онтарио	$2 \cdot 10^5$	f4n	30
Глина влажная красная, поверхность	Айрон-Маунтен, Миссури	10^4—$2 \cdot 10^4$	f4n	61
Ледниковый нанос	Мичиган	10^3—$4 \cdot 10^5$	f4n	36
Ледниковый нанос	Сев. часть США	10^4—$5 \cdot 10^4$	f4ns	45
Галька	Испания	10^5	f4ns	60
Песок, сухой	Зап. Австралия	10^5—10^6	f4ns	60
Песок, влажный	Зап. Австралия	10^5—10^6	f4ns	60
Свежеотложенный туф..	Беченс, Ньюфаундленд	10^6	f4n	39
Свежеотложенный аркоз	Беченс, Ньюфаундленд	10^6	f4n	39
Отложения, смещенные и измененные	Беченс, Ньюфаундленд	$4 \cdot 10^4$	f4n	39
Пески и галька, мокрые	Монтреаль-Ривер, Онтарио	10^5—$5 \cdot 10^5$	f4n	61
Ил, 0,6 м от поверхности	Сев. Онтарио	$2 \cdot 10^5$	f4n	30
Ил, 1,2 м от поверхности	Сев. Онтарио	10^6	f4n	30
Почва, песчаная	Сев. часть США	10^5	f4ns	45
Почва, суглинок, влажная	Испания	$5 \cdot 10^2$—$5 \cdot 10^3$	f4ns	60
Почва, плотный гумусовый дерн, мокрый		$4 \cdot 10^3$	f4n	40

Таблица 2—XXI

Электрическое удельное сопротивление минерализованных горных пород

Материал	Местность	Удельное сопротивление, ом · см	Тип измерения	Ссылка
Конгломерат с самородной медью	Хоутон, Канада	0,2		66
Графитовый сланец	Стурстенсбергет, Швеция	350		66
Графитовый сланец с пирротином	Офотен, Норвегия	0,5		66
Графитовый сланец	Офотен, Норвегия	13,3		66
Самородная медь	Джером, Аризона	$<0,1$		66
Норит с пирротином	Садбери, Канада	5		66
Пирротиновое скопление	Офотен, Норвегия	2,7		66
Кварцит с пиритом	Офотен, Норвегия	$4 \cdot 10^4$		66
Серицитовый кварцит с пиритовыми шлирами	Кристинеберг, Швеция	68		66
Серицитовый кристаллический сланец с пиритом	Офотен, Норвегия	$4 \cdot 10^6$		66
Плотный сланец с пирротином		6 — 53		66
Железный блеск в кварцевом порфире	Шеперд-Маунтен, Миссури	800	f4n	32

Таблица 3—XXI

Электрическое удельное сопротивление железного блеска в кварцевом порфире
(Айрон-Маунтен, Миссури) [61]

Содержание железа, %	Удельное сопротивление, ом · см	Тип измерения
64	20	f4n
60	30	
55	60	
50	110	
40	900	
30	6 000	
20	80 000	
15	400 000	
0	1 000 000	

Таблица 4—XXI

Электрическое удельное сопротивление металлических сульфидов

Материал	Местность	Удельное сопротивление, ом • см	Тип измерения	Ссылка
Аргентит Ag_2S, минерал, сжатый	Шнеберг, Австрия	2400 — 8200	41	52
синтетический		65	41	52
минерал		900	41	64
минерал (200° С)		0,0067	21	64
синтетический (200° С)		0,0013	41	69
синтетический (200° С)		0,0017	41	5
Арсенопирит Bi_2S_3, минерал	Фрейберг, Германия	0,13	21	64
Висмутин Bi_2S_3, минерал		1800	21	12
синтетический, расплавленный		10	41	33
синтетический, сжатый		1,7	41	68
Руда: цинковая обманка-галенит, ∥ полосчатости	Галена, Иллинойс	0,1		66
Руда: цинковая обманка-галенит, ⊥ полосчатости		$3,6 \cdot 10^4$		66
Борнит Cu_5FeS_4, минерал	Чили	0,5	21	46
минерал		0,060	41	68
Борнитовая руда, богатая	Мунте, Австралия	0,3	Все типы	20
Борнит-халькопирит		4,0	Все типы	20
Халькозин Cu_2S, минерал		2300	21	12
минерал, расплавленный		450 — 0,001	21	32
минерал, расплавленный		0,56	21	11
синтетический, сжатый		1 — 2	21	24
синтетический, сжатый		0,045	41	52
минерал, сжатый	Бристоль, Коннектикут	0,042	41	52
минерал, сжатый		0,011	21	64
синтетический, сжатый		0,036	41	68
синтетический, расплавленный		0,034 — 0,15	41	13
халькозиновая руда	Джером, Аризона	3,1		66
халькозиновая руда	Батт, Монтана	5,7		66
CdS синтетический, сжатый		$8,10^6$	41	6
синтетический сжатый		$7,10^8$	41	51
Халькопирит $CuFeS_2$, минерал	Япония	0,2	21	46
минерал	Трансильвания	1,0	21	1
Халькопиритовая руда	Джером, Аризона	0,1 — 10		66
Ковеллин CuS, минерал сжатый		0,0005	21	64
синтетический		0,00012	41	5
синтетический		0,00004	41	23
Кубанит	Фиерро, Нью-Мексико	6800		66
Данаит FeAsS, минерал		0,6	21	12
Галенит PbS, минерал, расплавленный		0,0003	21	28
минерал, расплавленный		0,00029	41	3
минерал	Джоплин, Миссури	0,037	41	31
синтетический, расплавленный		0,0012	41	31
минерал	Швейцария	0,0026	41	40
минерал	Кумберленд	0,0014	21	61
минерал	Кумберленд	0,0015 — 0,025	21	64
минерал	Фрейберг, Германия	0,23	21	52
синтетический, сжатый		210	21	52
галенитовая руда	Галена, Иллинойс	0,8		66
галенитовая руда	Джоплин, Миссури	<0,1		66
галенит		0,003		66
минерал, расплавленный		0,0023	41	47

Продолжение табл. 4—XXI

Материал	Местность	Удельное сопротивление, ом · см	Тип измерения	Ссылка
Галенит PbS (*продолжение*)				
минерал, расплавленный		0,0031	41	
минерал + 0,3% Pb, расплавленный		0,0026	41	
минерал + 0,8% Pb, расплавленный		0,0022	41	
минерал + 3,0% Pb, расплавленный		0,0012	41	
минерал + 15% Pb, расплавленный		0,0002	41	
минерал		0,014 — 0,25	41	
минерал, расплавленный	Джоплин, Миссури	0,0023	41	68
синтетический, сжатый		40	41	68
HgS (черная) синтетическая, сжатая		0,29	21	52
Ялпаит $(Ag, Cu)_2S$, минералы, смешанные	Бристоль			
	Коннектикут	57	21	52
Марказит FeS_2, минерал		300	21	12
минерал	Богемия	10	41	40
минерал	Богемия	1,4	41	71
минерал		10		66
Миллерит NiS, минерал	Допсинс, Трансильвания	0,0032 — 0,0074	21	1
синтетический, прессованный		0,00022	41	68
Молибденит MoS_2, минерал		1400	21	12
минерал		0,79 — 1,8	21	40
минерал	Нов. Южн. Уэльс	50	21	46
минерал		1,8	41	27
минерал		1,8	41	22
минерал	Южн. Австралия	500 — 16 000	41	17
минерал		7,0	41	31
минерал, прессованный		10^5	41	33
синтетический, сжатый		3300	41	68
минерал		0,8		66
Полибазит	Тинтик, Юта			
паралл. полосчатости		0,1		66
перпенд. полосчатости		400		
Молибденит, минерал	Канада	2 — 16	41	17
минерал	Колорадо	9,5	41	17
Руда, жила, низкотемпературного сульфида	Уеллеру, Австралия	13,0	Все типы	20
Руда, формация Хомстэк	Рудник Хомстэк, Южная Дакота	460	4fn	39
Пирит FeS_2, минерал	Трансильвания	9,2	21	1
минерал		1,5	21	3
минерал	Швейцария	0,024	41	40
минерал	Эльба	0,1	21	46
минерал	Эльба	0,0023 — 0,04	21	64
минерал	Гелливере, Лапландия	0,0023	21	71
минерал	Гелливере, Лапландия	0,0029	21	10
минерал, расплавленный		0,045	41	68
пирита 10%, пирротина 90%		10^4		54

Продолжение табл. 4—XXI

Материал	Местность	Удельное сопротивление, ом · см	Тип измерения	Ссылка
пиритовая руда	Бьеркосен, Норвегия	8,5—66,5		66
пиритовая руда	Бьюрлиден, Швеция	2000—10 500		66
пиритовая руда		0,1—250		66
пирит		0,02		66
Пирротин FeS, минерал		0,01		66
FeS, минерал	Трансильвания	0,0084—0,010	21	1
FeS, минерал	Бразильское Моровельо	0,00050	41	40
пирротиновая руда		0,1—7,0		66
SnS, минерал (100° C)		3500	21	12
синтетический, расплавленный		1070	21	28
синтетический, сжатый		680	41	68
Серебряная руда «среднего типа»	Тинтик, Юта	2500		67
Сфалерит		10^8	4fn	2,14
Tl_2S синтетический		2900	21	57
синтетический, расплавленный		500	41	33
TiS_2 синтетический, сжатый		6,1	41	68
TaS_2 синтетический, сжатый		0,12	41	68
Стибнит Sb_2S_3, минерал		10^7	41	56
минерал		10^7	41	48
минерал		10^{14}	41	70
Вуртцит ZnS, минерал		350	21	12
WS_2 синтетический, сжатый		1400	41	68

Таблица 5—XXI

Электрическое удельное сопротивление некоторых окислов и отдельных минералов

Материал	Местность	Удельное сопротивление, ом · см.	Тип измерения	Ссылка
Хромитовая руда	Фатмомакке, Швеция	10^5		66
Куприт	Джером, Аризона	0,1		66
Графит, технические электроды (плотность = 1,5)		0,001—0,0013		49
		0,003		38
		0,0008		62
среднего качества	Порт Линкольн, Юж. Австралия	0,5	Все типы	20
низкого качества	Порт Линкольн, Юж. Австралия	150	Все типы	20
минерал		0,03		66
Гематит Fe_2O_3, минерал	Норвегия	0,35—0,7	21	4
минерал	Швеция	0,6	21	40
минерал	Бразилия	0,7	21	40
минерал		1200	21	18
минерал	Швеция	200	21	46
синтетический		10^8	41	72
Ильменит Fe_2TiO_5, минерал	Урал	220	21	40
Железо, металлическое, метеоритное	Метеоритный кратер, Аризона	2,4—3,2x10—3?	4fn	37

Продолжение табл. 5—XXI

Материал	Местность	Удельное сопротивление, ом · см	Тип измерения	Ссылка
Магнетит Fe_3O_4, минерал	Трансильвания	0,036	21	40
минерал	Окр. Эссекс, Нью-Йорк	0,008	21	40
минерал	Бавария	0,014	21	64
магнетит		0,5	4fn	14
магнетитовая руда		1,0—100		66
синтетический		0,005	41	72
синтетический		0,005	41	68
Каменная соль, чистая		$10^6 - 10^7$	4fn	40
с примесью		10^6	4fn	40
Сидерит		7100		66
Железный блеск, руда (60% Fe)	Айрон-Маунтен, Миссури	30	2	32
Железный блеск, руда		10 — 1000		66
Спекулярит		0,4 – 0,8		66
Сидеритовая руда		$\sim 10^8$		66
Сера		$> 10^{14}$		2
Титано-магнетит	Фатмомакке, Швеция	10^3		66
Цинкит	Франклин Фернес Нью-Джерси	28		66
SnO_2, минерал (360° C)		3500	21	18
синтетический (в вакууме)		0,03	41	8
синтетический (на воздухе)		10^6	41	8
SnO, синтетический		10^4	41	42
SnO, синтетический		10^4	41	25
PbO_2, синтетический		0,000092	41	55
PbO_2, синтетический		0,00023	41	64
CdO, синтетический		0,028	21	64
		0,0012	41	5
		0,0047	41	25
Tl_2O_3, синтетический		0,0047	41	25
		0,1	41	42
		0,001	41	8
Ti-окиси, синтетические		1,8	41	25
MnO_2, синтетический		6	21	64
синтетический		100	41	42
Ta_2O_3		0,01	41	25
MoO_2		0,0031	41	25
Mo_2O_5		0,001	41	25
WO_2		0,001	41	25
W_2O_5		0,00045	41	25
WO_3		$2,10^5$	41	25
ZnO, синтетический (20° C)		10^5	41	72
синтетический (650° C)		22	41	72
синтетический (в H_2, 650° C)		0,4	41	72
V_2O_3		0,0055	41	25
V_2O_4		0,045	41	25
V_2O_5		3,1	41	25
Cb_2O_3		0,086	41	25
Cb_2O_4		1100	41	25
Cb_2O_5		$5 \cdot 10^6$	41	25
NiO, синтетический		10^8	41	42
$NiO + 0,05O_2$		10^3	41	42

Примечание. По поводу табл. 4—XXI и 5—XXI можно сделать следующие обобщения:

1. Удельное сопротивление минералов сильно меняется от образца к образцу, что, вероятно, вызвано присутствием примесей.

2. Плавленные искусственные минералы могут обладать гораздо меньшими удельными сопротивлениями, чем природные образцы. В случае галенита это вызвано присутствием избытка металлического Pb, который образовался путем химической реакции между PbS и окисями во время плавления. То же явление, вероятно, имеет место и в плавленом Bi_2S_3.

3. Большие изменения в удельном сопротивлении могут быть в минералах, образующих химические соединения разной валентности. Примерами являются Cu_2S и CuS, а также FeS и FeS_2.

4. Присутствие минералов низкого сопротивления: ковеллина (CuS), пирротина (FeS) и миллерита (NiS) может сильно уменьшить удельное сопротивление минералов, смешанных с ними.

Таблица 6—XXI

Электрическое удельное сопротивление углеводородов

Материал	Местность	Удельное сопротивление, ом·см	Тип измерения	Ссылка
Уголь, антрацит.....	Округ Мегеной, Пенсильвания	70—200	f4ns	21
Уголь, антрацит.....	Локюст-Гэп, Пенсильвания	10^4—$4\cdot10^4$	f4ns	21
Уголь, антрацит.....	Шемокин, Пенсильвания	10^6—10^9	f4ns	21
Уголь, антрацит.....	Пласт Холмс	300	f4ns	21
Уголь, антрацит.....	Пласт Маммонт	$3\cdot10^3$—$2\cdot10^4$		
Уголь, антрацит, паралл. залеганию.....		800—1000	1A.C.2	63
Уголь, антрацит, перпенд. залеганию.....		4500—5000	1A.C.2	63
Уголь битуминозный...	Нью-Ривер, Зап, Виргиния	10^8	f4ns	21
Уголь		10^4	f4n	40
Уголь, трещиноватый...		10^5	f4n	40
Лигнит		$4\cdot10^5$	f4n	30
Нефть		10^{11}—10^{18}	f4n	40

Таблица 7—XXI

Электрическое удельное сопротивление природных вод

Материал	Местность	Удельное сопротивление, ом·см	Тип измерения	Ссылка
Свежедистиллированная вода		$2\cdot10^7$		16
Рудничные воды	Порт Линкольн, Юж. Австралия	500	Все типы	20
	Мунта (Moonta), Австралия	56	Все типы	20
	Уоллеру, Австралия	36	Все типы	20
	Сев. Онтарио	$2\cdot10^4$—$6\cdot10^4$	f4n	30
	Аустенвилл*, Виргиния	$1{,}6\cdot10^4$—$1{,}9\cdot10^4$	2	61

Продолжение табл. 7—XXI

Материал	Местность	Удельное сопротивление, ом·см	Тип измерения	Ссылка
Поверхностные воды	Нью-Ривер, Аустенвилл, Виргиния	10^5	2	61
	Монреал - Ривер, Онтарио	$5 \cdot 10^4$	2	61
	Потомак-Ривер, Вашингтон, округ Колумбия	$4 \cdot 10^3$		26
		$3 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$	f4n	65
Питьевые грунтовые воды. Местные источники	Порт-Линкольн, Юж. Австралия	$10^3 - 10^5$	Все типы	20
		10^3		
Реликтовые воды		$3 \cdot 10^3 - 10^4$	Все типы	20
Соленые воды (см. табл. 8—XXI).....				41

* Среднее из анализов 4 проб рудничных вод, Аустенвилл, Виргиния (в миллиграммах на литр).

SiO_2	12,0	SO_2	52,4
Fe	1,25	Cl	2,1
CaO	80,0	CO_2	161,3
MgO	53,6	Na_2O и др.	12,2
Zn	не определялся		

Таблица 8—XXI

Электрическое удельное сопротивление соленых вод [16, 41]

Соленость морской воды в открытом океане колеблется от 32 до 38 г на килограмм. 35 г на килограмм является типичным.

Температура, °С	Соленость, г/кг					
	5	10	20	30	35	40
	Удельное сопротивление, в ом·см					
0	209	109	57	39	34	30
10	169	82	43	30	26	23
20	126	65	34	24	21	18
30	103	53	28	20	17	15

Таблица 9—XXI

Влияние воды и нефти на сопротивление песчаника постоянному току

Песчаник из формации Модело, Санта Моника, Калифорния. Пористость 23,2% [34]

Состав насыщающей жидкости, объемные %		Удельное сопротивление, ом·см
Нефть	Вода	
100	0	250000
95	5	27 370
90	10	10 390
85	15	4852
75	25	1928
65	35	1163
55	45	788
45	55	606
35	65	406
25	75	308
15	85	187
5	95	140
0	100	131

Таблица 10—XXI

Электрическое удельное сопротивление влажного песка

Песок Желтой реки; использовано удельное сопротивление воды (10^3 ом.см); [63]

Содержание воды, весовые %	Удельное сопротивление, ом·см·10^4
0,86	8,3
1,52	3,8
2,37	2,3
3,3	1,7
5,8	1,2
7,4	1,0
9,5	0,95

Таблица 11—XXI

Электрическое удельное сопротивление почв и морской воды, измеренное с помощью переменного тока высокой частоты

Материал	Частота, килоциклы/сек.	Удельное сопротивление, ом·см	Ссылка
Почва, очень сухая	1 – 10 000	10^7	1
Почва, нормальной влажности	1 – 10 000	10 000	1
Почва (влажность 24%)	100	10 000	1
	1 200	6 900	
	10 000	6 900	
	100 000	6 000	
Песчано-глинистый грунт, сухой	37 000	7 000	2
Песчано-глинистый грунт, очень мокрый	37 000	6 000	2
Суглинок темный (влажность 60%)	100	2 600	1
	1 200	2 300	
	10 000	1 500	
Суглинок (влажность 22%)	100	15 000	1
	1 200	13 000	
	10 000	9 000	
Глина сухая	37 000	60 000	2
Глина и песок (влажность 26%)	100	1 050	1
	1 200	1 000	
	10 000	700	
Мел (влажность 24%)	100	33 000	1
	1 200	22 000	
	10 000	14 000	
Морская вода	0,5	23	1
	1	21,5	
	2	21	
	100	21	
	1 200	21	
	10 000	16,5	
	2 300	23	2
	5 000	23	
	8 600	22	
	10 000	20	
	18 700	10	

ССЫЛКИ К ТАБЛИЦЕ 11 — XXI

1. Smith-Rose, Proc. Roy. Soc. A140, 139, 1933; и 143, 135, 1933; Proc. Phys. Soc. London, 47, 923, 1935.
2. Feldman, Proc. Inst. Radio Eng. 21, 764, 1933.

Таблица 12—XXI

Диэлектрические постоянные пород

Материал	Длина волн, см	Диэлектрическая постоянная, пределы	Ссылка
Ангидрит		6—7	58,2
Базальт		12	58
Мел, средний девон		8,0—9,0	58
Коралловый доломит		8,0—9,0	58
Дацит	$3 \cdot 10^4$	6,8—8,16	19
Диорит		8,0—9,0	58
Диорит-гнейс		14,0—15,0	58
Доломит		7,3	2
Элеолитовый сиенит		8,0—9,0	58
Фоянт	$3 \cdot 10^4$	7,45—8,95	19
Гнейс		8,0—15,0	58
Гранит		7,0—9,0	58
Гранитит		8,0	58
Гранулит		8,0	2
Грауваккa		9,0—10,0	58
Роговообманковая порода		7,0—8,0	58
Известняк		8,0—12,0	2
Мрамор		8,3	62,38
Мраморизованный известняк	$3 \cdot 10^4$	15,2	19
Слюдистый сланец		16,0—17,0	58
Обсидиан	$3 \cdot 10^4$	5,8	19
Филлит		13,0	58
Кварцит	$3 \cdot 10^4$	6,6	19
Кварцитовый сланец		9,0	58
Кварцит		7,0	58
Пестрый песчаник		9,0—11,0	58
Серицитовый кристаллический сланец		11,0—12,0	58
Сиенит		13,0—14,0	58
Трахит		8,0—9,0	58
Траппы	$3 \cdot 10^4$	18,9—39,8	19
Туфы и туфовая лава	$3 \cdot 10^4$	3,8—4,5	19

Таблица 13—XXI

Диэлектрические постоянные минералов

Материал	Длина волн, см	Пределы	Диэлектрическая постоянная		Ссылка
			⊥ оси	∥ оси	
Апатит	75	8,5	9,50	7,40	38,62
Асфальт		2,7			62
Берилл	∞		7,85	6,05	20
Кальцит		7,5—7,7	8,49	7,56	39,62
Уголь, антрацит		5,6—6,3			2
Доломит	75		7,80	6,80	62
Флюорит		6,8			38
Стекло кремневое, очень тяжелое		9,9			62
Стекло, твердая крона		7,0			62
Стекло свинцовое (Поуэлл)		5,4—8,0			62
Стекло иенское бариевое		7,8—8,5			62
Гипс		6,3			38
Гематит		25,0			2
Лед (—2°С)		93,9			38
Исландский шпат	75		8,50	8,00	62
Слюда		5,7—7,0			38,62
Кварц	∞		4,69	5,06	62
Кварц	10^3		4,27	4,34	62
Кварц расплавленный		3,5—3,6			38
Каменная соль		5,6—6,3			2,62
Сидерит		7,4			2
Сфалерит		7,8			2
Сера аморфная		3,9			62
Турмалин	∞		7,13	6,54	62

			D_α	D_β	D_γ	
Сера ромбическая	∞		3,65	3,85	4,66	62
Сера ромбическая	75		3,62	3,85	4,66	62

Таблица 14—XXI

Диэлектрическая постоянная сегнетовой соли в зависимости от температуры

(Частота около 1000 циклов в секунду; [53])

Температура, °С	Диэлектрическая постоянная
0	222
5	190
10	190
15	252
20	480
24,7	1490
25,7	810
28,2	430
31	265
34,2	181
38	134
40,2	116
42	104
47,5	80

ССЫЛКИ К ГЛАВЕ XXI

1. Abt. Ann. d. Physik 62, 474, 1897.
2. Ambronn, Cobb, Elements of Geophysics, Ist edition McGraw-Hill.
3. Aubel, C. R. 135, 456, и 734; 1906; Phys. Zeit. 4, 551; 1903.
4. Bäckström, Kgl. Svenska Akad. Stockholm, 553, 1888.
5. Baedeker, Электрические явления в металлических проводниках, 1911; Ann. d. Physik 22, 749, 1907.
6. Bail, Zeit. Electrochem. 44, 143, 1938.
7. Baldwin, Wiseman, Griffith, Физические свойства строительных материалов. Proc. Inst. of Civil Engrs. 179, pt. 1, 290, 1909—10.
8. Bauer, Ann. d. Phys. 30, 433, 1937.
9. Bayard-Duclaux, C. R. 197, 854, 1933; Ann. de Physique 6; 5, 1936.
10. Beckmann, Comm. phys. Lab. Leiden No. 132 g 63, 1912.
11. Becquerel, Ann. chim. Phys. 8, 389, 1866.
12. Beijerinck, Neues Jahrb. f. Mineral. Beilage B. 11, 403, 1897.
13. Bodländer, Zeit. Elektrochem. 11, 161, 1905.
14. Canadian Geological Survey Memoir — Geophysical Prospecting No. 165, 1928—29; No. 170, 1930.
15. Card A. I. M. R. Tech. Pub. 829, 19 pp., 1937.
16. Chapman, Bartels, Geomagnetism, Oxford Univ. Press, p. 424; 711; 1940.
17. Coblentz, U. S. Bur. Stand. Sci. Papers 15, 121, 1919.
18. Doelter, Sitzungsber. Akad. Wien. 116, 1243, 1907.
19. Достовалов, ДАН СССР, 3, 87, 1935.
20. Edge, Laby, Geoophysical Prospecting, Cambridge, 1931.
21. Ewing, Crary и другие A.I.M.E. Tech. Pub: 683, 36 pp., 1936.
22. Eyth, цитировано из Guertler Handb. d. Metallographie VI, 776, 1925.
23. Fischbeck, Zeit. anorg. Chem. 181, 372, 1929.
24. Fischer, Zeit. Electrochem. 32, 538, 1926.
25. Friedrich, Zeit. anorg. Chem. 145, 127, 1925; Zeit. Physik 31, 813; 1925.
26. Gish, Rooney, Terr. Magn. 30, 1, 1925.
27. Gottstein. Ann. d. Physik, 43, 1079, 1914.
28. Guinchant, C. R. 134, 1224, 1902.
29. Harvey, Econ. Geol. 23, 778, 1928.
30. Hawkins, (Geophys. Prosp.) A. I. M. E. Trans. 110, 76, 1934.
31. Heaps, Phil. Mag. 6, 1283, 1928.
32. Hittorf, Ann. d. Physik 84, 1, 1851.
33. Hochberg, Physik. Zeit. d. Sowjet, 13, 198, 1938.
34. Hopper, Jakosky, Geophysics, 2, 33; 1937.
35. Holladay, Journ. Frank, Inst. 195, 229, 1923.
36. Hotchkiss, Rooney, Fisher, (Geophys. Prosp.) A. I. M. E. Trans. 81, 1929.
37. Jakosky и другие (Geophys. Prosp) A. I. M. E. Trans: 97, p. 85, 1932.
38. Kaye, Laby, таблицы физических и химических констант, Longmans, 8 th ed.; 1936.
39. Kihlsted, (Geophys. Prosp.), A. I. M. E. Trans. 110, 74, 1934.
40. Koenigsberger и другие, Ann. d. Physik 32, 179, 1910; Physik. Zeit., 570, 1906; Physik. Zeit. 9, 347, 1908; Physik. Zeit. 12, 1139, 1911; (Geophys. Prosp.), A. I. M. E. Trans. 81, 1929.
41. Krümmel, Handbuch der Oceanographie, 1, p. 291; 1907.
42. Le Blanc, Physik. Zeit. 32, 125, 1911.
43. Lee, Eve, Keyes, Can. Geol. Survey; Memoir 165; p. 112, 1931.
44. Leonardon, личное сообщение.
45. Leonardon, Crosby, A. I. M. E. Tech. Pub. 131, 1928.

46. Löwy, Ann. d. Physik 36, 125—133, 1911.
47. McLennan, Trans. Roy. Soc. Canada 24, III, 53, 1930.
48. Martin, Physik. Zeit. 12, 41, 1911.
49. Mead, Thesis, M. I. T. 1940.
50. Meissner, Ann. d. Physik, 17, 593, 1933.
51. Meyer, Zeit. f. Physik 85, 278, 1933.
52. Mönch, Neues Jahrb. f. Mineral. Beilage B. 20. 365, 1905.
53. Mueller, Phys. Rev. 47, 182, 1935.
54. Мурашов Д. Ф., Беренгартен Е. В. и другие, Материалы по общей и прикладной геологии, Издание Геол. Ком., Ленинград., вып. 76, 1, стр. 36, 1928.
55. Palmaer, Zeit Elektrochem. 29, 415, 1923.
56. Planck, цитировано из Guertler Handb. d. Metallographie VI, 776, 1925.
57. Pélabon, C. R., 173, 142, 1921.
58. Purdue, A. H., Ark. Geol. Surv., p. 62, 1909.
59. Reich, Angewandte Geophysik, vol. 25, 3d sec., 1930.
60. Rooney, Terr. Mag. At. Elec. 32, 97, 1927.
61. Slichter, неопубликованные данные.
62. Smithsonian Physical Tables, 8-е издание, 1933.
63. Sinkinson, Ind. and Engr. Chem. 20, 862, 1928.
64. Streintz, Physik. Zeit. 12, 845, 1911; Ann. d. Physik 9, 854, 1902; Jahrb. f. Rad. u. Elektronik. 10, 221, 1913; Zeit. Elektrochem. 10, 414, 1904.
65. Sundberg, (Geophys. Prosp.) A. I: M: E. Trans. 97, 367, 1932.
66. Sundberg, Lundberg, Eklund, Syeriges Geol. Unders. Arsbok, 17, 327, 73, 1923.
67. Sundberg, A. I. M. E. Tech. Pub: No: 122, 3, 1928.
68. Telkes, неопубликованные данные.
69. Tubandt, Zeit. Elektrochem. 37, 589, 1931.
70. Voigt, Zeit. Physik, 57, 154, 1929.
71. Wesely, Physik. Zeit. 14, 76, 1913.
72. Wagner, Zeit. Phys. Chem. B. 24, 439, 1936; Zeit Phys: Chem. B. 22, 199, 1933.

ТАБЛИЦА ПЕРЕВОДНЫХ КОЭФИЦИЕНТОВ

Единицы длины

1 см = 0,39370 дюйма	1 дюйм = 2,5400 см
1 м = 3,28083 фута	1 фут = 0,304801 м
1 км = 0,62137 амер. мили	1 амер. миля = 1,60935 км

Единицы площади

1 $см^2$ = 0,15500 дюйма ^{2}	1 $дюйм^2$ = 6,4516 $см^2$
1 $м^2$ = 10,76387 фута ^{2}	1 $фут^2$ = 0,092903 $м^2$
1 $км^2$ = 0,38610 кв. мили (амер.)	1 кв. миля (амер.) = 2,58999 $км^2$

Единицы объема

1 $см^3$ = 0,061023 $дюйма^3$	1 $дюйм^3$ = 16,38716 $см^3$
1 $м^3$ = 35,3144 $фута^3$	1 $фут^3$ = 0,028317 $м^3$
1 $км^3$ = 0,23991 куб. мили (амер.)	1 куб. миля = 4,1682 $км^3$

Единицы массы

1 кг = 2,20462 англ. фунта	1 фунт (англ.) = 0,45359 кг

Единицы давления

Эти единицы имеют размерность силы на единицу площади. Там, где указаны единицы массы как в $кг/см^2$ или $фунт/дюйм^2$, сила является гравитационным притяжением для этой массы. Следовательно, величина этих единиц зависит от местной величины g; эти изменения редко имеют значение для измерений давления или напряжения.

Нормальной атмосферой считается давление 76 мм ртут. ст. при 0°C (уд. вес ртути = 13,59509 $г/см^3$) при условии, что $g = 980{,}665$ $см/сек^2$ (нормальная сила тяжести).

Бар иногда называют также мегабаром или мегабарием; он равен 10 $дин/см^2$.

	Бары	Нормальные атмосферы	кг/см² (нормальная сила тяжести)	фунт/дюйм² (нормальная сила тяжести)
1 бар	1	0,986924	1,01972	14,5038
1 нормальная атмосфера	1,01325	1	1,03323	14,6960
1 кг/см² (нормальная сила тяжести)	0,980665	0,967842	1	14,2234
1 фунт/дюйм² (нормальная сила тяжести)	0,068947	0,068046	0,070307	1

Температура

Если температура выражена в градусах Цельсия и следует ее перевести в градусы Фаренгейта, то это делается из расчета, что температура в °C = 5/9 (°F — 32), а температуры в °F = 1,800° C + 32; 1°C = 1,8°F

Температурный градиент

1 °C/метр = 0,5486 °F/фут 1 °F/фут = 1,8227 °C/м
1 °C/км = 2,897 °F/милю 1 °F/милю = 0,3452 °C/км

Энергия, работа, теплота

1 малая калория (15°C) = 4,1852 абс. джоулям = 42,67 кг · см = = 3,087 фунт · фут.
1 джоуль = 10^7 эргов = 10^7 дин · см = 0,2389 г · кал. = 10,10 кг · см
британская единица теплоты (BTU) (60° F) = 1054,6 джоуля (абс).

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Индивидуальные вещества, за немногими исключениями, не внесены в указатель (см. требуемое свойство, как например, «упругость», «плотность» и т. д.)

Внутреннее трение
в вибрирующих твердых веществах 97
в горных породах 101
в отдельных кристаллах 99
в поликристаллических металлах 100
в стеклах 100
Вода
давление пара 198
кривые плавления 195
растворимость при 1 ат (твердых веществ) 181
— при высоком давлении 181
— при высоких температурах (различных веществ в воде и воды в силикатных расплавах) 203, 208
скорость волн сжатия 106
твердые фазы 194
теплоемкость 200
теплопроводность 247
теплота испарения 198
тройные точки 195
удельный объем в зависимости от давления и температуры 196, 197, 199, 200
электрическое удельное сопротивление
морской воды 291
природных вод 289
соленых вод 290
Восприимчивость магнитная
главных типов горных пород 274, 275
магнетита 273
магнетитных минералов 274
Вязкость
влияние давления 142
лавы (по полевым измерениям) 141
обычных жидкостей 142
стекол 139
эквивалентная (в пуазах) различных материалов 134

Газы
в горных породах 14
водяной пар, удельный объем 199, 200
гелиевый метод определения возраста 257
давление пара (воды) 198
Газы
плотность 228
теплоемкость 228
теплота испарения (воды) 198
Гелиевый метод 257
Геологический возраст
гелиевый метод в применении к магнетитовым месторождениям 257
определение возраста по соотношению изотопов свинца 255
— по свинцовому методу 255
Гидротермальное изменение силикатов 159
Градиент геотермический
для Великобритании 265, 266, 269
для различных стран 265
для СССР 266, 267
для США 261
для Южной Африки 265, 268

Давление
в недрах Земли 113
влияние на восприимчивость (магнитную) 274
на вязкость 142
— жесткость
— горных пород 90
— металлов 79
— стекол 94
— критическую температуру (жидкость — пар) 178
— прочность пород 128, 129, 131
— равновесие между твердыми состояниями (однокомпонентная система) 171
— растворимость 180
— температуру плавления (однокомпонентная система) 171
— термическое расширение 58
— точку Кюри 274
— фазовое равновесие в двойных конденсированных системах 179
— температуру и состав эвтектики 186
критическую (жидкость — пар) 173
Давление пара
воды 198
насыщенных солями водных растворов 203

Двойниковое скольжение 126
Двойные конденсированные системы
влияние давления на фазовое равновесие 179
водных растворов солей при высоких температурах 201
температура плавления и превращения (при 1 ат) 143
Диссоциация (температуры диссоциации) 143
Диэлектрическая постоянная
горных пород 292
минералов 293
сегнетовой соли 293

Единицы, переводные коэфициенты 297

Жесткость (*см.* Упругость)
Жидкости (*см. также* Вода, Растворы)
влияние температуры и давления на вязкость 142
плотность при высоких температурах 48
сжимаемость 69, 191
скорость звука 106
теплопроводность 247
термическое расширение 48
удельное электрическое сопротивление 289, 290
Жидкость — пар, критические данные 178

Затвердевание (*см. также* Плавление)
кривые точек затвердевания для трехфазных систем силикат — вода 207
Звук, скорость 103
в горных породах 105, 106
в жидкостях 106
в почвах 105, 106

Изотопический состав
обычного свинца 254
радиоактивных элементов и конечных продуктов распада 253

Кварц
влияние температуры на упругость 80
прочность 129, 133
термическое расширение 47
Кипение
температура (1 ат) 143
воды в зависимости от давления 198
Кларки литосферы 12
Кристаллы и соответствующие им стекла
отдельные кристаллы
— внутреннее трение 99
— диэлектрическая постоянная 293
— магнитная восприимчивость 273
— плотность 18
— прочность 129
— сжимаемость 51
— теплопроводность 234, 235
— термическое расширение 44, 47
— упругость 77
— удельное электрическое сопротивление 285
плотность 23
Критические данные состояния жидкость — пар 178

Лава
максиальные наблюденные температуры у вулканических жерл 269
вязкость, определенная по полевым измерениям 141
Ликвидус
насыщенных водных растворов 203
температуры ликвидуса 203

Магнитные свойства горных пород 271
восприимчивость, магнитная
— главных типов горных пород 274
— магнетита 273
— магнитных минералов 274
остаточное намагничивание горных пород 275
Металлы
отдельные кристаллы
— внутреннее трение 99
— теплопроводность 245
— термическое расширение 44
— упругость 77, 79
плотность, жидкое и кристаллическое состояние 48
поликристаллические
— внутреннее трение 100
— теплопроводность 245
— упругость 81, 82
сжимаемость 55, 57, 54, 59
щелочные металлы, сжатие и термическое расширение 58
Метеориты
железные, химический состав 16
каменные, химический состав 15
Минералы (*см. также* Отдельные кристаллы)
диэлектрическая постоянная 293
магнитная восприимчивость 274
плотность при комнатной температуре и 1 ат 18
прочность 124, 126, 129, 131, 134
сжимаемость 51
температура плавления и превращения 143
теплопроводность 231
термическое расширение 44, 47, 48
удельное электрическое сопротивление 277
упругость 77, 80
Модуль сдвига (*см.* Упругость)
Момент инерции Земли 112

Недра Земли
давление 113
плотность 113
сейсмические скорости 110
сила тяжести 113
эллиптичность 113
Нефть
вязкость 142
скорость волн сжатия 106
теплопроводность 247
удельное электрическое сопротивление 289

Объем (удельный, *см.* Удельный объем)
изменение
— при кипении (воды) 198
— при плавлении 173, 177, 195
— при переходе 173, 177, 194
Объемный вес, осадочные отложения 25
Осадочные отложения
потеря веса при сушке 39
пористость и объемный вес 25
скорость сейсмических волн 105, 106, 107

Пар, давление пара
воды 198
насыщенных водных растворов 203
Плавление
влияние давления на плавление соединений 177, 195
— на плавление элементов 173, 175, 176
изменение сжимаемости при плавлении 69
кривые формулы 176
теплота (*см.* Скрытая теплота)
температуры (1 ат) 143
Пластичность 115
Пласты земной коры, сейсмические скорости и мощности в различных районах 99
Плотность
Земли в недрах 113
— средняя 112
критическая (жидкость — пар) 178
при высоком давлении (*см.* Сжимаемость) 51
при высокой температуре (*см.* Термическое расширение) 41
— воды 196, 197
— жидкого и кристаллического состояний 48
— отдельных кристаллов 44, 47
— пород 48, 49
— стекол 48, 49
при комнатной температуре и 1 ат 17
— и пористость осадочных отложений 25
— изверженных пород 22
— кристаллических пород и соответствующих им стекол 24
— кристаллов и соответствующих им стекол 23
— минералов 18
— природных стекол 24
Ползучесть, испытание материалов 134
Почвы
рыхлый песок 128
механические свойства 128
скорость волн сжатия 106
теплопроводность и диффузия 243
электрическое удельное сопротивление 283, 290, 291
Породы горные
внутреннее трение 101
диэлектрическая постоянная 292
магнитная восприимчивость 274
минералогический состав 15
остаточное намагничивание 274
плотность (средняя)
— изверженных пород 22
Породы горные
плотность пород и соответствующих им стекол 24
осадочных пород 25
пористость и объемный вес 25
прочность при всестороннем сжатии 128, 129, 134
радиоактивность 251
сжимаемость 70, 71
скорость сейсмических волн 96, 105, 106, 107
стандартная прочность на раздавливание 123
теплопроводность и коэфициент диффузии 238
термическое расширение 48
упругость
в зависимости от давления 91
влияние напряжения 89
влияние температуры 93
по сейсмическим определениям 96
при обычном давлении и температуре 82
при давлении 4000 кг/см² 90
химические анализы 14
электрическое удельное сопротивление 280
Пористость осадочных отложений 25
Прочность 115
двойниковое скольжение 126
пород, заключенных в стальные оболочки 128
при всестороннем давлении керосина 129
при ползучести 134
рыхлого песка 128
скольжение перемещения 124
сопротивление сдвигу при высоком всестороннем давлении 131
стандартная прочность пород на раздавливание 123

Радиоактивность 249
изотопический состав 253, 254
константы распада 252
образование тепла 250, 251
продукты распада 252
радиоактивность горных пород 251
радиоактивность элементов 250
Расплавы, растворимость воды в силикатах 208
Растворимость
в воде
— при 1 ат 181
— при высоком давлении 180, 183, 201
— при высокой температуре 201
в органических растворителях 184

Свинцовый метод 254
Сейсмические волны (*см.* Скорость)
Сжимаемость 51 (*см. также* Упругость)
воды 196, 197
изменение при плавлении 69
пород при высоких давлениях 71
— при низких давлениях 70
соединений при давлении до 50000 кг/см² 60

— кристаллизующихся в гексагональной, тригональной и тетрагональной системах 64
Сжимаемость соединений
— кристаллизующихся в кубической системе 62
— кристаллизующихся в моноклинной и триклинной системах 67
— кристаллизующихся в ромбической системе 65
стекол 69
элементов, щелочных металлов 58
— гексагональной и тетрагональной системе 57
— при давлении до 50000 кг/см^2 60
— кубической системы 55
— различных 54
Сила тяжести
в недрах Земли 113
у земной поверхности 112
Силикаты (*см.* Свойства)
Система силикат — вода
кривые точек затвердевания 207
растворимость при высокой температуре и давлении 208
Скольжение
двойниковое 126
перемещения 124
Скорость сейсмических волн
в верхних пластах земной коры 108, 109
в жидкостях 106
в зависимости от глубины и геологич. возраста 106, 107
в недрах Земли 110
в породах, в зависимости от температуры 93
в породах, при высоком давлении 90, 91, 93
по полевым определениям на малых глубинах 96, 105, 106, 107
Скрытая теплота
испарения KCl и воды 206
парообразования воды 198
перехода при высоком давлении 173, 177
плавления
при 1 ат 225
при высоком давлении 173, 177
Сопротивление сдвигу 131
Состав
минералогический, изверженных пород 15
химический
— железных метеоритов 16
— изверженных пород 14
— каменных метеоритов 15
— метеоритного железа 16
— насыщенных водных растворов 201
— средний, земной коры (кларки) 12
Состав изотопический
обычного свинца 254
радиоактивных элементов и конечных продуктов 253
Стекло
внутреннее трение 97
вязкость 139, 141
— влияние давления на вязкость 142
плотность 23, 24
сжимаемость 69
теплопроводность 244
термическое расширение 48, 49
Стекло
упругость 94, 95

Твердое состояние — твердое состояние, температуры перехода
при 1 ат 143
при высоком давлении 173, 177, 194
Температура
диссоциации 143
кипения 143, 198
критическая 178
наблюденная
— в вулканических жерлах 269
— в земной коре, в скважинах и горных выработках 259
перехода
— при 1 ат 143
— при высоком давлении 173, 177, 194
плавления
— при 1 ат 143
— при высоком давлении 173, 177, 195
эвтектики
— при 1 ат 143
— при высоком давлении 186
Температура превращения, 1 ат 141
Теплоемкость
воды 200
газов 228
горных пород 223
минералов 214
Теплопроводность и диффузия
влияние давления 243, 247, 248
— смачивания и сжатия 243
горных пород 238, 243
жидкостей 247
кристаллических порошков 236
металлов 245
отдельных кристаллов
— кубических 234
— некубических 235
почвы, снега, льда 243
различных материалов 245
стекол 244
Теплота
Земли 250
— образованная радиоактивными элементами 250
— поток тепла к земной поверхности 251
испарения воды 198
испарения водного раствора KCl 206
образующаяся в горных породах 251
плавления (*см. также* Скрытая теплота)
— при 1 ат 225
— при высоком давлении 173, 177
получаемая от Солнца 251
Термическое расширение 41
влияние давления 58
воды 196, 197, 200
горных пород 48, 49
жидкостей 48
кварца 47
отдельных кристаллов 44

стекол 48, 49
щелочных металлов при высоком давлении 58
Трение (*см.* Внутреннее трение. Вязкость)
Тройные точки 143
воды 195

Удельное сопротивление (*см.* Электрическое удельное сопротивление)
Удельный вес (*см.* Плотность)
Удельный объем
воды, жидкой и пара вдоль кривой насыщения 198
водяного пара 200
жидкой воды 196, 197, 198
насыщенного раствора KCl в воде 206
Упругость 73
горных пород
— влияние влажности на скорость волн. Амхерстовский песчаник 89
— напряжения на модуль Юнга и на σ 89
— температуры на скорость волн при высоком давлении 93
— жесткость (модуль сдвига) в зависимости от давления 91
— по сейсмическим определениям 96
— при обычной температуре и давлении 82
— при 4000 кг/см² и 30° С 90
поликристаллических металлов 81
— влияние давления на жесткость 81
— влияние температуры 82
отдельных кристаллов 77
— кварца, влияние температуры 80
— крайняя величина модуля Юнга и модуля сдвига 79
стекол 94
— влияние давления 94
— температуры 95

Фазовые соотношения
влияние давления, однокомпонентные системы 171
воды 191
Фазовые соотношения
водных растворов солей при высоких температурах 201
двойных конденсированных систем 179
жидкость — пар (критические данные) 178
температуры плавления и превращения — при 1 ат 143
льда и воды 195
льда и льда 194
Форма земной поверхности (фигура Земли) 112

Химический состав земной коры (кларки литосферы) 12

Эвтектические температуры 149
Электрические свойства пород и минералов 273
диэлектрические константы пород и минералов 292
удельное сопротивление пород, почв, минералов, песка 280—284
— воды 289
— при переменном токе высокой частоты 291
— углеводородов 289
Электропроводность (*см.* Электрическое удельное сопротивление)
Эллиптичность пластов одинаковой плотности в недрах Земли 113

Юнга модуль (*см.* Упругость)

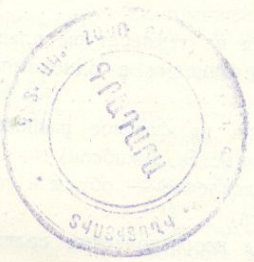
Ядро Земли
давление 113
инерции момент 114
плотность 113, 114
радиус 114
сила тяжести 113
скорость волн 113
Q — (функция рассеяния) 98

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора 5
Предисловие составителей 9
Глава I. Средний химический состав изверженных пород, каменных и железных метеоритов (Р. А. Дэли, Э. С. Ларсен и Л. Ла Форж) 13
II. Плотность при комнатной температуре и одной атмосфере (Г. Берман, Р. А. Дэли, и Г. С. Спайсер) 17
III. Плотность при высокой температуре; термическое расширение (Э. Б. Дэн) 41
IV. Плотность при высоком давлении; сжимаемость (Френсис Берч) . 51
V. Упругость (исключая сжимаемость) (Френсис Берч) 73
VI. Внутреннее трение в вибрирующих твердых веществах (Френсис Берч) 97
VII. Скорость сейсмических вол (Л. Д. Лит и Френсис Берч) 103
VIII. Геодезические константы: данные, относящиеся к недрам Земли (Френсис Берч) 111
IX. Прочность и пластичность (Дэвид Григгс) 115
X. Вязкость (Френсис Берч и Э. Б. Дэн) 137
XI. Температуры плавления и превращения минералов и других веществ (Ф. К. Крачек) 143
XII. Влияние давления на температуры плавления и на равновесия между твердыми состояниями в однокомпонентных системах (Френсис Берч) 171
XIII. Влияние давления на фазовое равновесие в двойных конденсированных системах (Р. Э. Джибсон) 179
XIV. Температура — давление — объем и соотношение фаз для воды (Рой В. Горансон) 191
XV. Водные растворы неорганических солей при высоких температурах (Н. Б. Кивил) 201
XVI. Теплоемкость; теплота плавления (Рой В. Горансон) 209
XVII. Теплопроводность и диффузия (Френсис Берч) 231
XVIII. Радиоактивность: тепло Земли и измерения геологического возраста (Р. Д. Ивенс, Клерк Гудмен и Н. Б. Кивил) 249
XIX. Температуры, наблюденные в земной коре (Г. С. Спайсер) 259
XX. Магнитные свойства горных пород (Л. Б. Слитчер) 271
XXI. Электрические свойства горных пород и минералов (Л. Б. Слитчер и М. Телькес) 277
Таблица переводных коэфициентов 296
Предметный указатель 298

Редактор *Л. С. Балашов*
Технический редактор *А. Н. Никифорова*
Корректор *Б. А. Ерусалимский*
Сдано в производство 24/V 1948 г.
Подписано к печати 10/V 1949 г.
А03890 Печ. л. 19 Уч.-изд. л. 26,8
Формат 70×108 1/16 Издат № 5/183
Заказ 501 Цена 27 руб.

Типография Металлургиздата,
Москва, Цветной б., 30.



ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
39	4 св.	Petrographic methods and calculations	Flow of homogeneous fluids
53	25 »	$-\Delta V/V$	$-\Delta V/V_0$
145	14 сн. в 1-м столбце	; кип. 3570	; кип. 357,0
146	20 св.	**Бисмут**	**Бисмит**
147	21 »	**Минимум**	**Миниум**
148	15 »	336	236
160	16 сн.	Pb_2CO_3	Rb_2CO_3
226	22 »	Chem. 81,257	chim. ital., 42,1,
297	2 »	10,10 кг·см	10,19 кг·см

Зак. 501

8596