

УДК 552.1:537.311

А. Т. БОНДАРЕНКО, М. П. ВОЛАРОВИЧ, Г. Т. ПРОДАЙВОДА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ БАЗАЛЬТОВ АРМЕНИИ
ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Исследование электропроводности магматических пород и минералов в зависимости от давления и температуры является частью общей задачи по изучению физических свойств вещества недр Земли [1, 8].

Электропроводность горных пород, будучи весьма чувствительной к изменению температуры, наличию проводящих пород и скоплению проводящих растворов, может служить для объяснения физического механизма термодинамических процессов в более глубоких слоях земной коры и мантии. Благодаря применению метода электромагнитного зондирования, уже в настоящее время стало возможным определить глубину зоны магмообразования, оценить мощность этой зоны и очертить распространение ее по площади [1].

Сопоставляя результаты лабораторных исследований электропроводности горных пород при различных температурах и давлениях с данными глубинных электромагнитных зондирований, можно строить не только схемы распределения электропроводности и температуры с глубиной, но и делать некоторые выводы о составе вещества глубоких слоев земных недр [2]. Таким образом, совокупность методов электромагнитного зондирования и лабораторных опытов позволит высказать предположение о природе проводящих слоев в земной коре и верхней мантии.

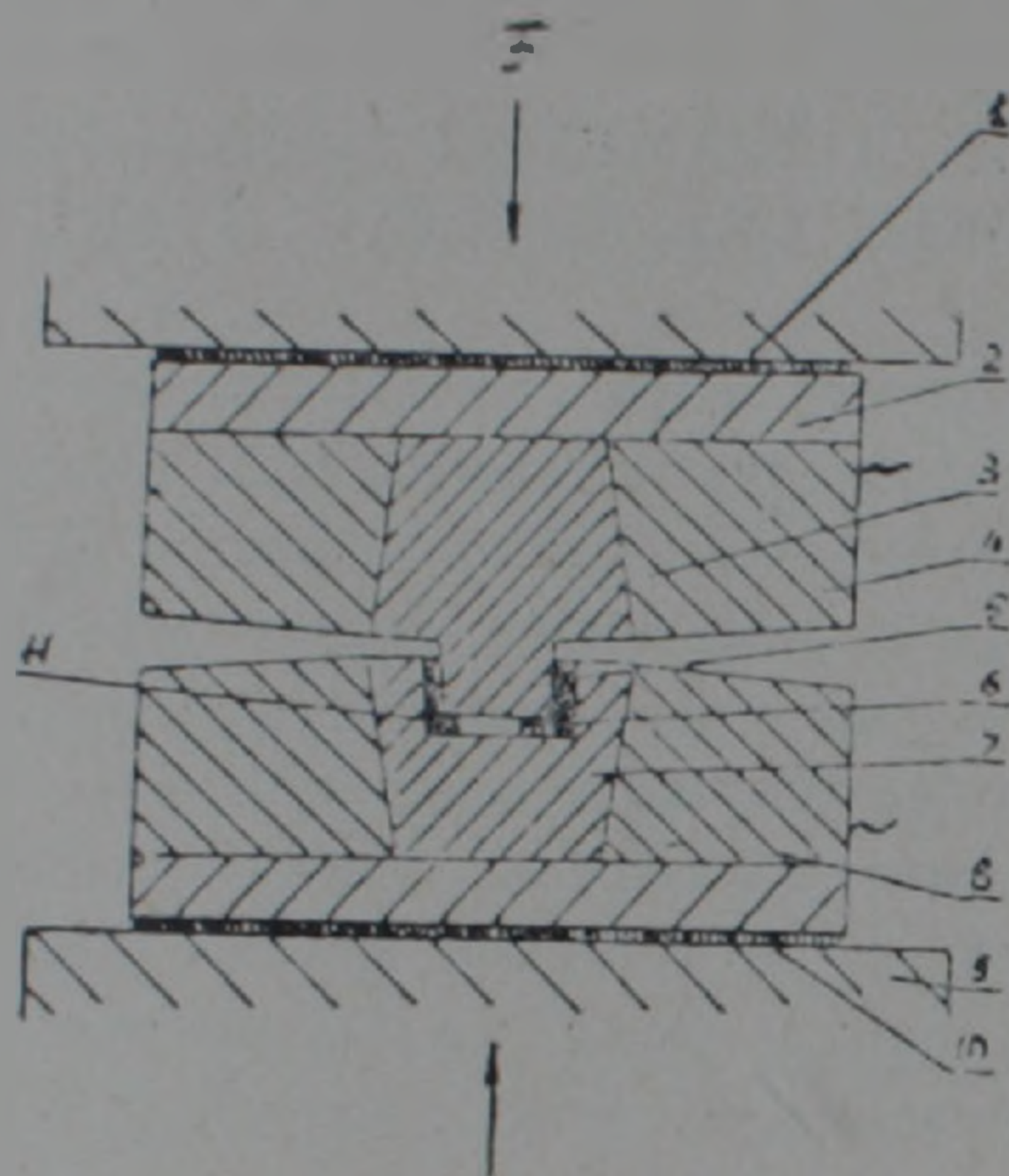
Электрические свойства магматических пород, особенно в условиях высоких давлений и температур, изучены еще недостаточно. Имеются лишь отрывочные сведения по электропроводности некоторых изверженных пород различных геологических провинций—Кольского полуострова, Казахстана [4, 6].

Настоящая статья посвящается рассмотрению электрических свойств базальтов Армянского нагорья. Проведенные экспериментальные исследования уже могут дать представление о электрических свойствах базальтов, находящихся в термодинамических условиях земной коры и верхних слоях верхней мантии.

Методика измерения электропроводности при высоких температурах до 1200°C не излагается, так как она подробно описана в работе [5].

Электропроводность базальтов при давлениях до 20000 кГ/см² и температурах до 600°C изучалась на установке отдела физических свойств Института физики Земли АН СССР. Установка (фиг. 1) изготовлена из легированных и жаропрочных сталей; она состоит из четырех деталей: пуансона—3, матрицы 7, в которую закладывался образец породы, и двух поддерживающих деталей—4 и 8. Поршень 3 от матрицы 7 изолировался слюдой или пиррофиллитом 5; 11—упаковочное кольцо

из пиррофиллита; 6—образец породы; 2—стальные подушки, передающие усилие F от 30-тонного пресса. От пресса установка изолировалась слюдяной прокладкой—10. Вся установка помещалась в вертикальную электрическую печь.



Фиг. 1. Схема установки высокого давления (пояснения в тексте).

Образец в виде диска диаметром 10 мм и высотой 3—5 мм упаковывался в пиррофиллит, который являлся с одной стороны электрическим изолятором, а с другой—средой, передающей давление. Таким образом, образец находился в условиях квазигидростатического давления.

Геолого-петрографическая характеристика

В петрографическом отношении вулканогенные породы представлены:

1. Долеритовыми базальтами лори-ахурянской толщи (обр. 511, 512, 527—Лорийское плато, «верхняя» пачка). Структура пород микродолеритовая и микроофитовая, текстура массивная. Минералогический состав всех образцов полностью идентичен и отличается лишь количественным соотношением минералов. Состав плагиоклаза соответствует лабрадору № 54—55, а пироксен представлен авгитом.

2. Долеритовыми базальтами (обр. 482, 490) Приереванского района. Структура пород долеритовая, либо чаще пойкилоофитовая. Последняя характеризуется развитием крупных короткопризматических выделений клинопироксена, в которые заключены отдельные лейсты плагиоклаза. Плагиоклаз по составу соответствует лабрадору № 55—58. По составу пироксен соответствует авгиту. Стекло мезостазиса обычно занимает участки 1—1,5 мм в диаметре между лейстами плагиоклаза. Рудный представлен титаномagnetитом.

3. Долеритовые базальты окраины гор. Камо Гегамского нагорья (обр. 1131). Структура породы слабо порфировая до гломеропорфировой,

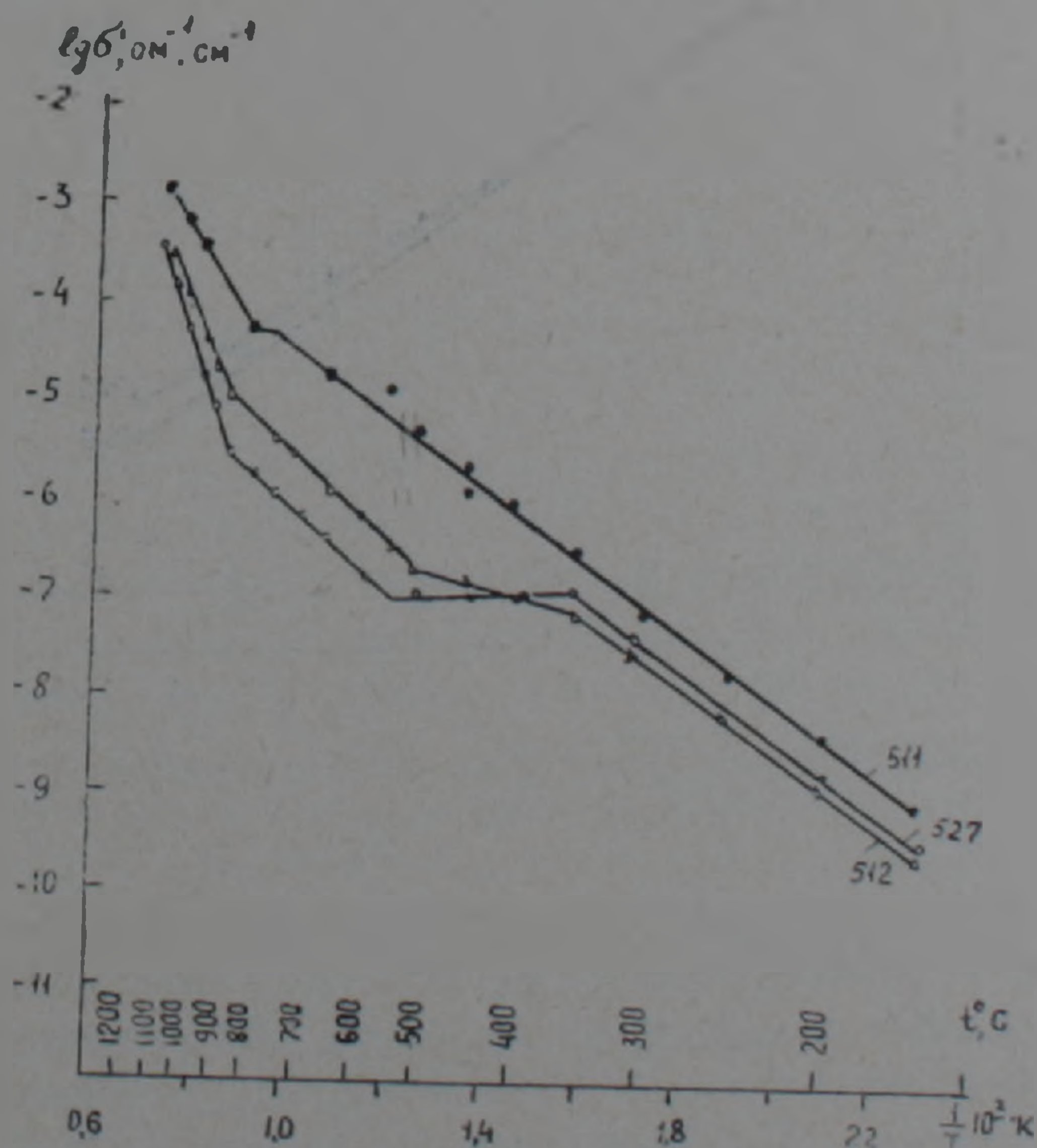
за счет скопления вкрапленников оливина и плагиоклаза. Структура основной массы микрофитовая, иногда с элементами интерсертальной. По составу плагиоклаз соответствует лабрадору № 64—65. Пироксен по составу отвечает авгиту. Основная масса сложена микролитами плагиоклаза размером 0,04—0,08 мм.

4. Базальты вулкана Саакасар Гегамского нагорья (обр. 1109; 1114). Структура породы порфировая. Структура основной массы микродолеритовая. Основная масса породы представлена микролитами плагиоклаза (60—70%), в подчиненном количестве присутствуют клинопироксен, рудный минерал, слабо раскристаллизованное стекло и рудная пыль. Плагиоклаз вкрапленников по составу соответствует лабрадору № 56—57.

5. Долеритовые базальты памбакской свиты Базумского хребта (обр. 1295, 1312, 1319).

Структура породы порфировая, местами переходящая в гломеропорфировую за счет скоплений зерен пироксена. Структура основной массы микродолеритовая. Основная масса состоит из плагиоклаза, пироксена и рудного минерала. Плагиоклаз по составу отвечает битовниту № 75—77. Пироксен по составу отвечает авгиту и подвержен частичному замещению уралитовой роговой обманкой.

Электропроводность при высокой температуре. Температурную зависимость электропроводности исследовали на 11 образцах пород базальтового состава; результаты приводятся на графиках (фиг. 2—5).



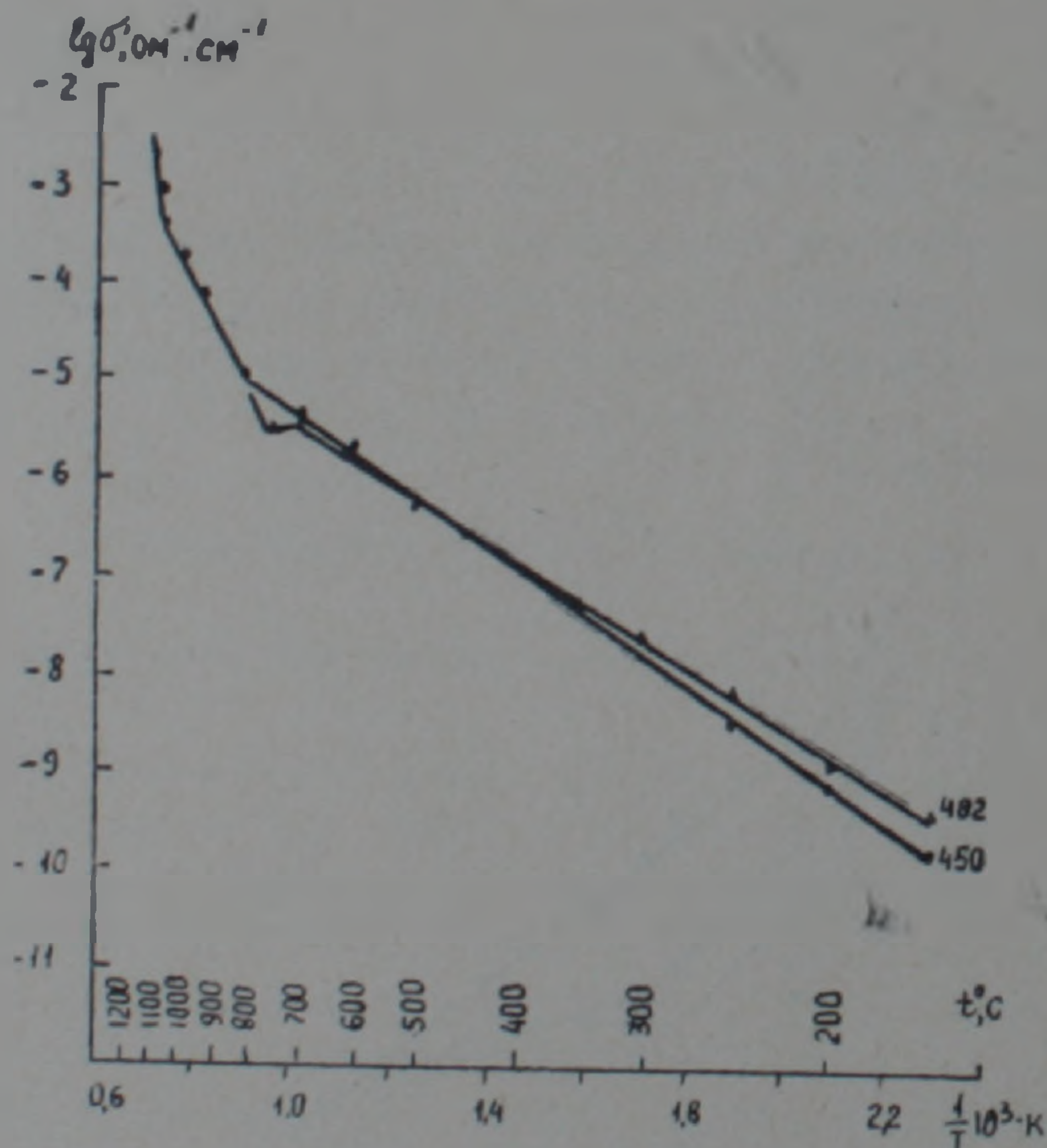
Фиг. 2. Зависимость электропроводности долеритовых базальтов Лорийского плато от температуры.

Кроме того, приводятся средние значения электропроводности базальтов рифтовой зоны и островных базальтов Индийского океана [6].

При рассмотрении экспериментальных данных по изучению зависимости $\sigma = f(t)$ при атмосферном давлении оказалось, что долеритовые базальты по электропроводности отличаются от обычных базальтов. Более того, даже породы, отобранные с одного и того же потока, близкие по минералогическому и химическому составу, также обнаруживают различия по электропроводности. Это свидетельствует о влиянии различных факторов на электропроводность.

Так долеритовые базальты Лорийского плато (обр. 511 и 527, фиг. 2) по электропроводности отличаются. Эти различия можно отнести за счет пористости ($m_p = 5\%$ для обр. 511 и $m_p = 9,4\%$ для обр. 527), а также повышенного содержания пироксена, отвечающего по составу авгиту, и оливина, отношением $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (3,85 для обр. 511 и 3,1 для обр. 527).

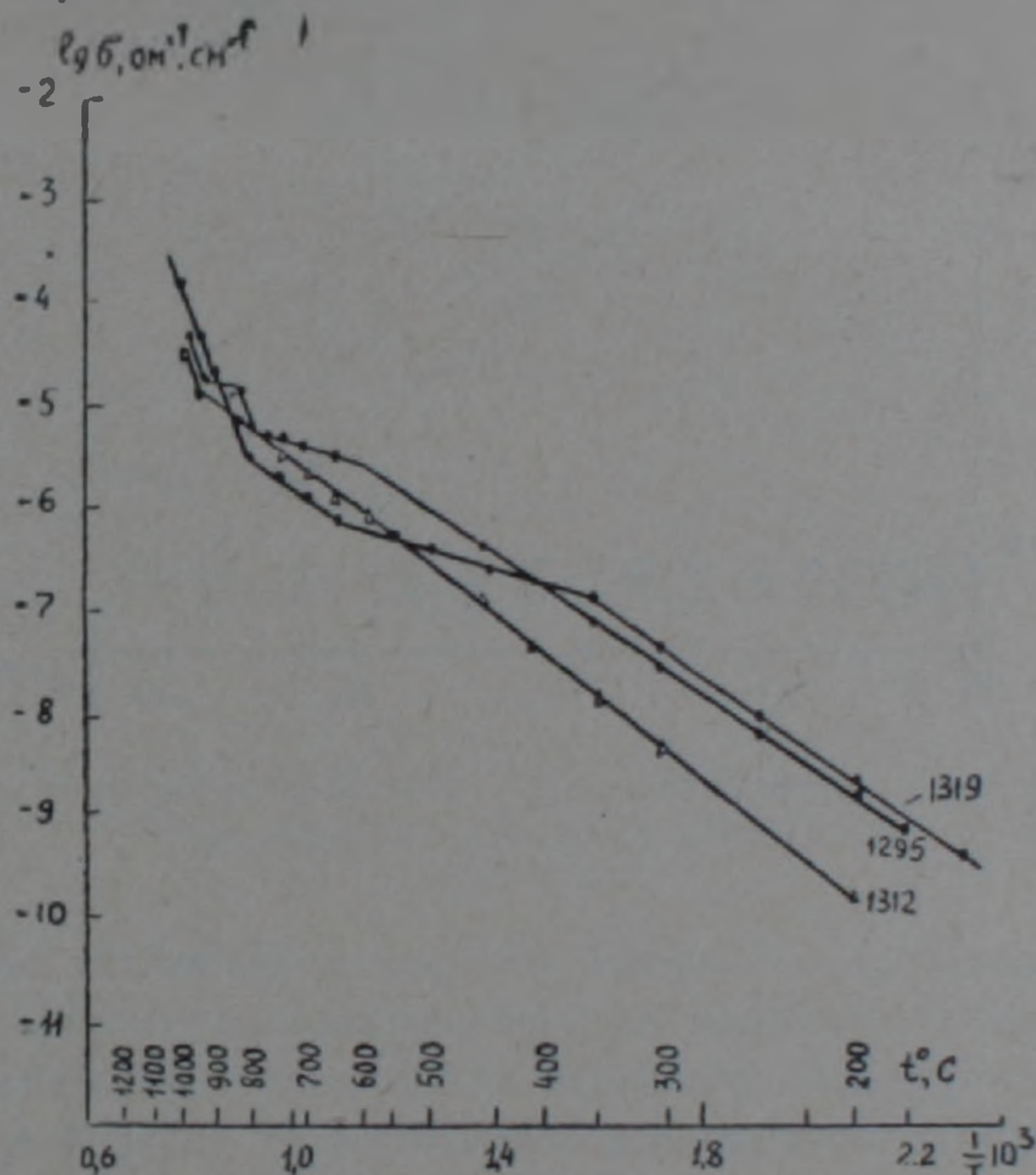
Долеритовые базальты Приереванского района (фиг. 3), несмотря на несколько большие различия в эффективной пористости ($m_p = 5,5\%$



Фиг. 3 Зависимость электропроводности долеритовых базальтов Приереванского района от температуры.

для обр. 482 и $m_p = 11,7\%$ для обр. 490), обнаруживают несколько меньшие различия в электропроводности. Это объясняется разнознаковым изменением различных факторов, которые и обуславливают вариации значений электропроводности. Так, в обр. 482 содержания авгита (18,26%) и отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (3,91) меньше, чем у обр. 490 (19,37% — авгит; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 4,46$), которые и увеличивают различия, обусловленные увеличением пористости.

Плотные долеритовые базальты памбакской свиты (обр. 1295, 1312, 1319) с эффективной пористостью 0,6—1,2% также обнаруживают различия в электропроводности (фиг. 4). Естественно, эти различия следует относить в первую очередь за счет минералогического состава исследованных образцов. Электропроводность обр. 1319 близка к обр. 1295, но вместе они значительно больше отличаются от электропроводности обр. 1312. Последний характеризуется пониженным содержанием авгита (15,97% против 19,65% в обр. 1295) и несколько повышенным значением эффективной пористости.

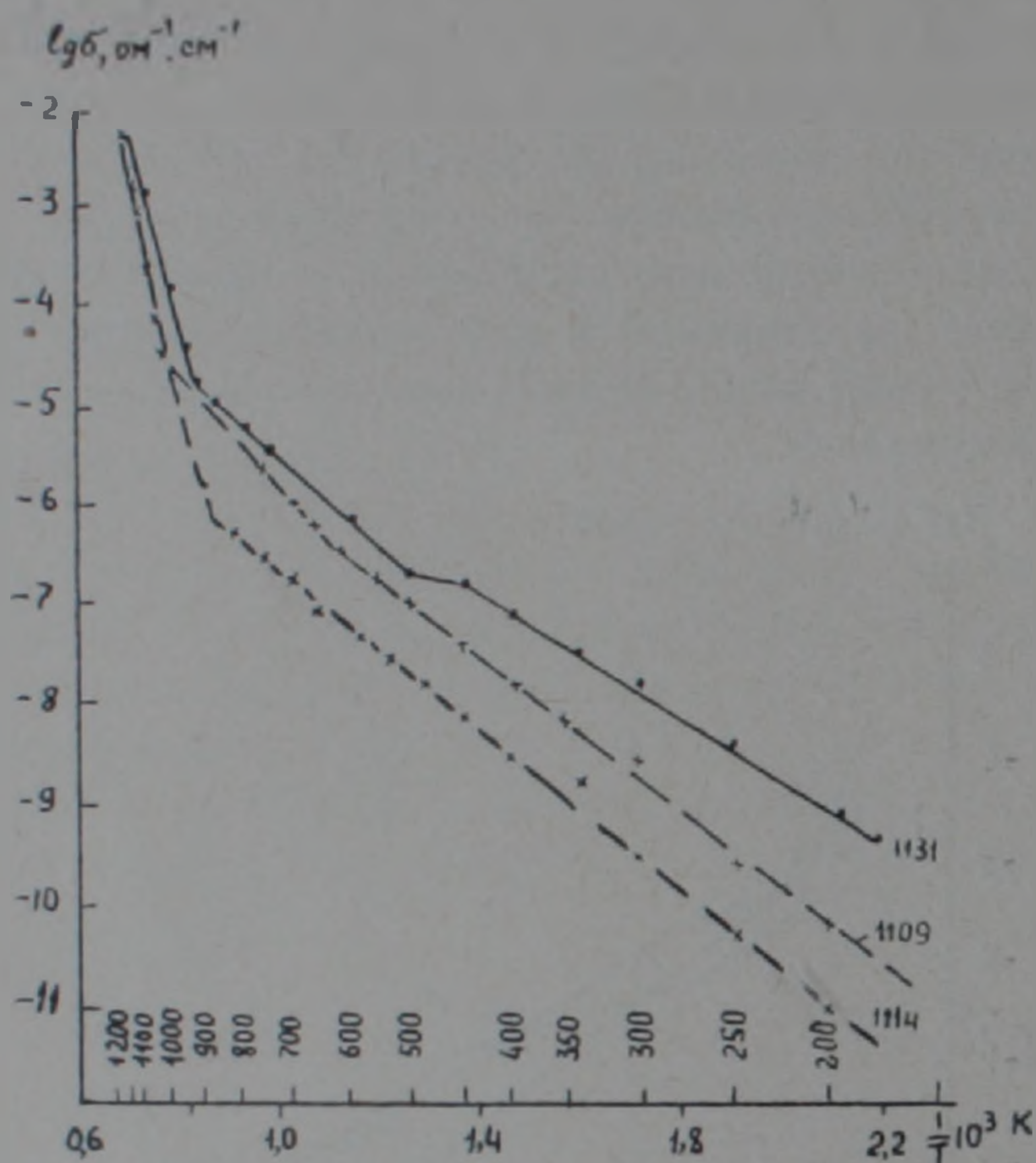


Фиг. 4. Зависимость электропроводности долеритовых базальтов памбакской свиты от температуры

Еще более ощутимые различия в электропроводности (фиг. 5) наблюдаются при сопоставлении базальтов вулкана Саакасар (обр. 1109 и 1114) и долеритовых базальтов гор. Камо (обр. 1131). При довольно близком химико-минералогическом составе этих пород различия можно отнести за счет пористости, которая у обр. 1114 достигает значений 26,8%.

Таким образом, на электропроводность долеритовых базальтов и базальтов большое влияние оказывают: пористость, процентное содержание пироксенов и их химический состав, отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$, а также плотность пород. Влияние процентного содержания пироксена, который в исследованных породах представлен авгитом, не случайно. Согласно экспериментальным данным минерал авгит является самым проводящим минералом по сравнению с другими минералами, содержащими щелочные металлы.

Таким образом, горные породы в пределах даже одного типа, благодаря различиям в составе и структурно-текстурным особенностям, об-

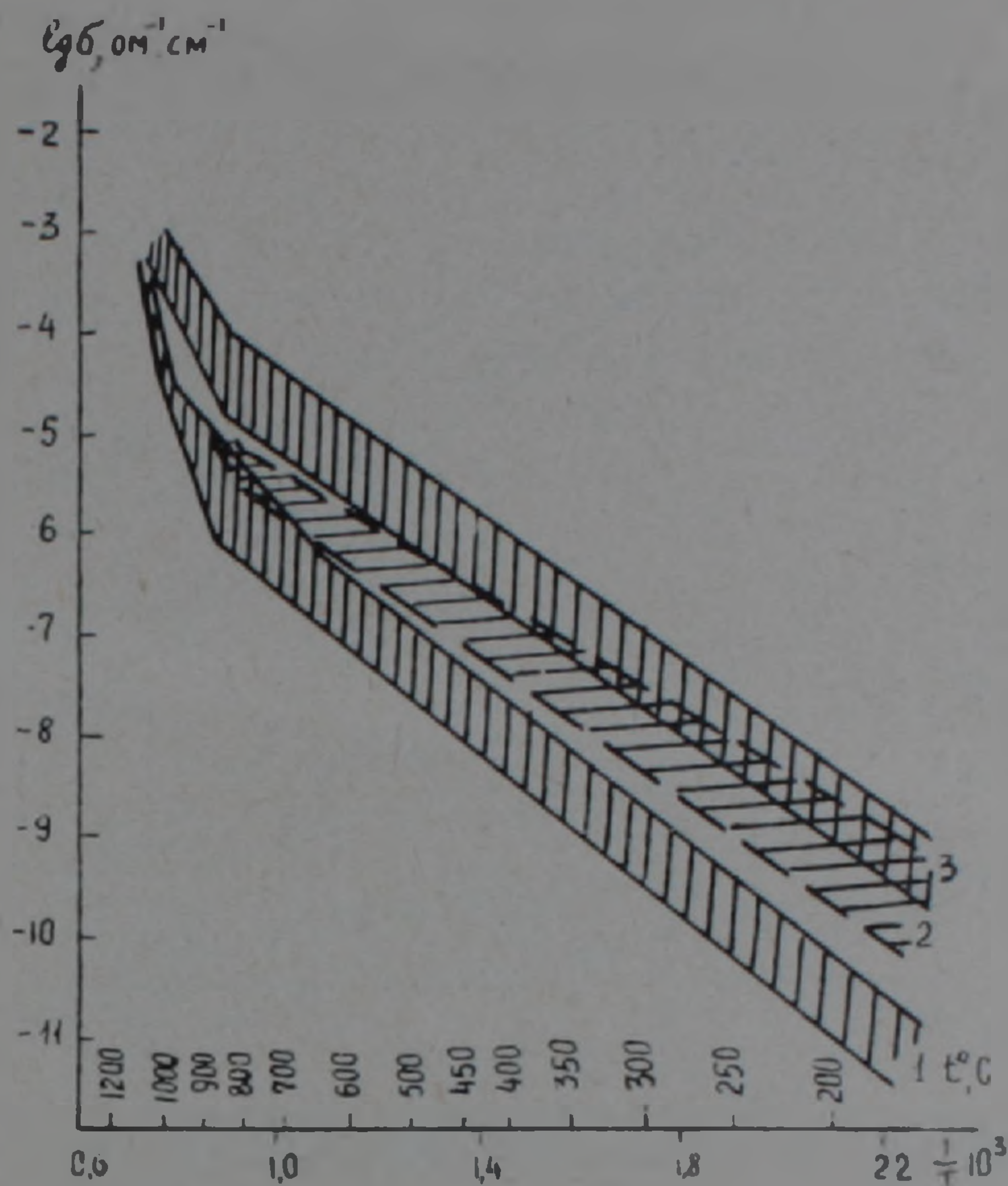


Фиг. 5. Зависимость электропроводности долеритового базальта и базальтов Гегамского нагорья от температуры.

наруживают достаточно большой разброс в значениях электропроводности. Согласно полученным экспериментальным данным по изучению зависимости $\sigma = f(t)$ при атмосферном давлении оказалось, что обычные базальты по электропроводности отличаются от долеритовых базальтов. Долеритовые базальты (фиг. 6) являются более электропроводящими, поэтому область, в которую укладываются графики электропроводности этих пород, по отношению к базальтам сдвинуты вверх. Долеритовые базальты ламбакской свиты занимают промежуточное положение, перекрываясь с долеритовыми базальтами лори-ахурянской толщи.

Долеритовые базальты лори-ахурянской толщи отличаются от базальтов Гегамского нагорья пониженным содержанием SiO_2 , повышенным содержанием суммарного железа и отношения $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$, процентным содержанием и характером вкрапленности рудных минералов, а также пониженными абсолютными значениями общей и эффективной пористости. Совокупность указанных факторов и обуславливает положение графиков $\sigma = f(t)$, которые размещаются в областях, характерных для пород определенного состава и текстуры.

Анализ графиков $\sigma = f(t)$ позволяет выявить некоторые особенности в изменении электропроводности долеритовых базальтов и базальтов Армении при высоких температурах, присущие всем исследованным породам. Прежде всего наблюдается закономерное увеличение электропроводности в процессе нагревания до 1100°C , достигающее 6—9 порядков

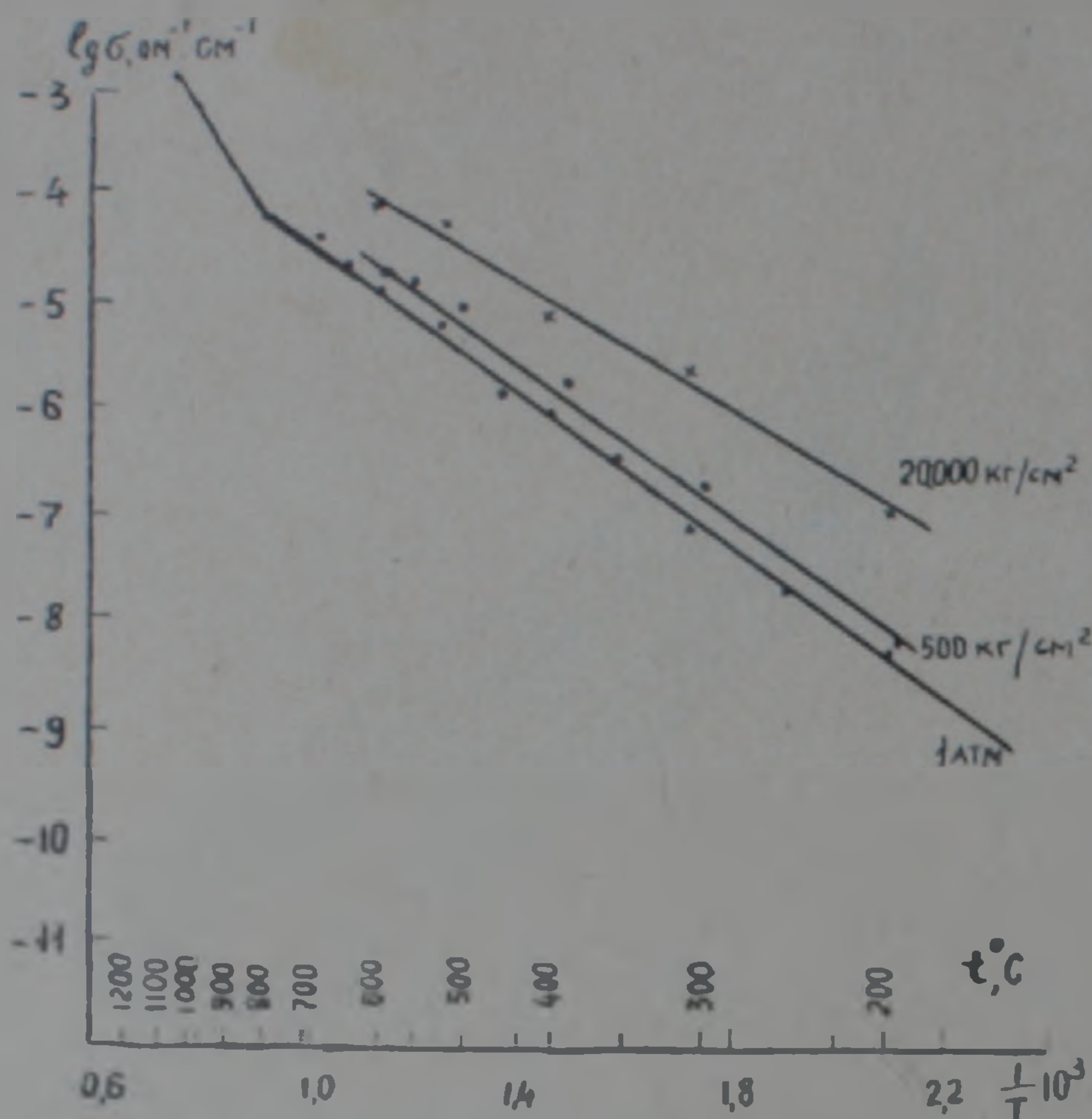


Фиг. 6. Области расположения графиков. 1—базальты Гегамского нагорья, 2—долеритовые базальты памбакской свиты; 3—долеритовые базальты лори-ахурянской толщи.

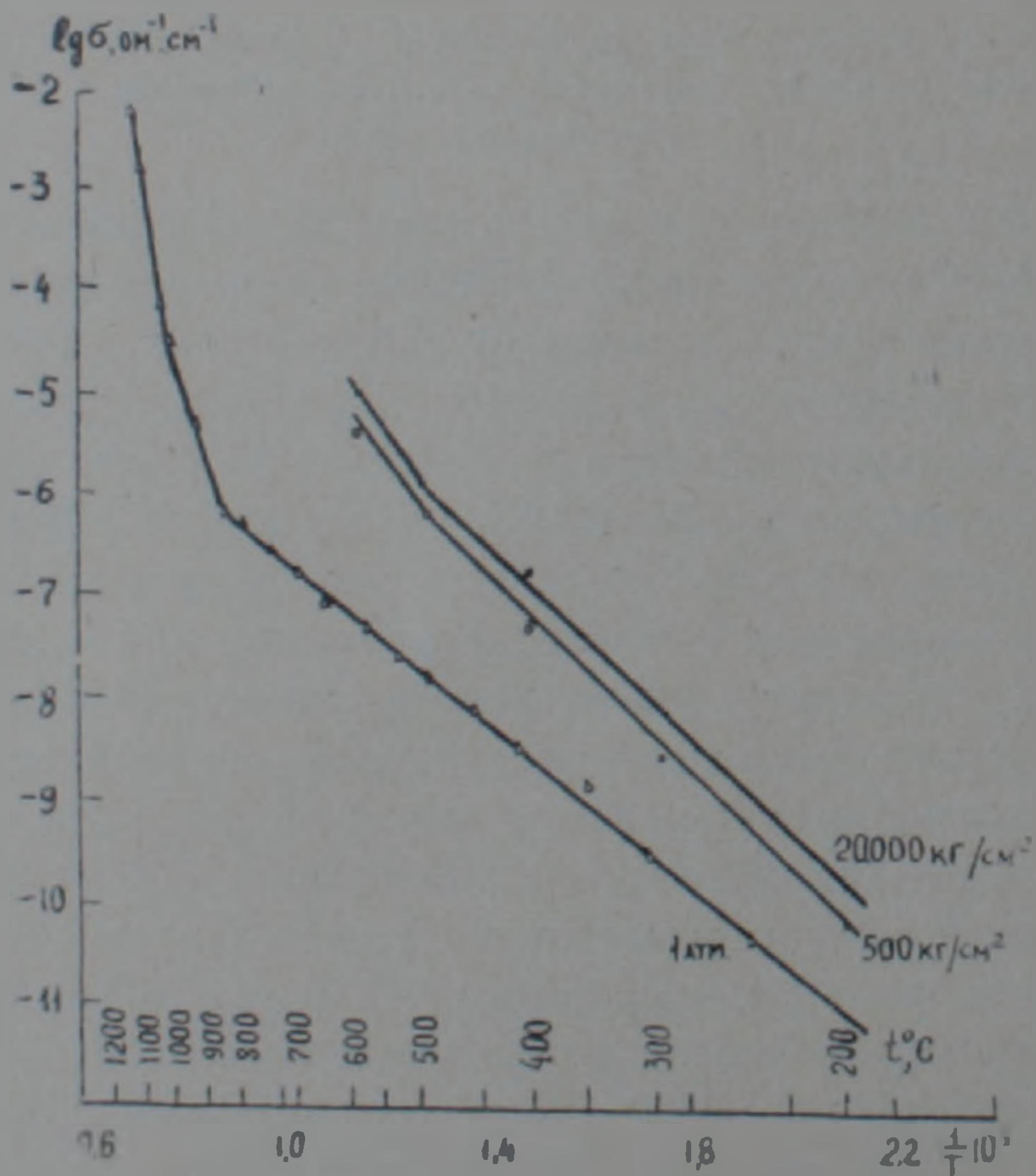
по сравнению с первоначальным. Величины электропроводности при температуре 1100°C оказываются близкими для различных пород.

Электропроводность при высоких температурах и давлениях. Электропроводность долеритовых базальтов и базальтов Армении также исследовалась при одновременном воздействии давления до 20000 кг/см^2 в диапазоне температур $200\text{—}600^\circ\text{C}$. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что электропроводность при воздействии давления возрастает. Увеличение давления, при соответствующих температурах, приводит к увеличению электропроводности на несколько десятков процентов, а в некоторых случаях—на порядок и больше. Обнаружено, что градиент изменения электропроводности в области начальных давлений (до 500 кг/см^2) наибольший у образцов с наибольшей эффективной пористостью. Это достаточно наглядно видно при сравнении графиков $\sigma = f(t)$ долеритового базальта (фиг. 7) и базальта (фиг. 8). Электропроводность долеритовых базальтов и базальтов при повышении давления до 20000 кг/см^2 увеличивается больше, чем на порядок. При более высоких температурах изменение электропроводности при увеличении давления меньше.

Одновременное воздействие температуры и давления не нарушает прямолинейной зависимости электропроводности от температуры. Изобары с увеличением давления смещаются в сторону увеличения электропроводности. Угол наклона графиков к оси абсцисс при этом остается



Фиг. 7. Зависимость электропроводности от температуры и давления для долеритового базальта (обр. 511) с эффективной пористостью 5%.

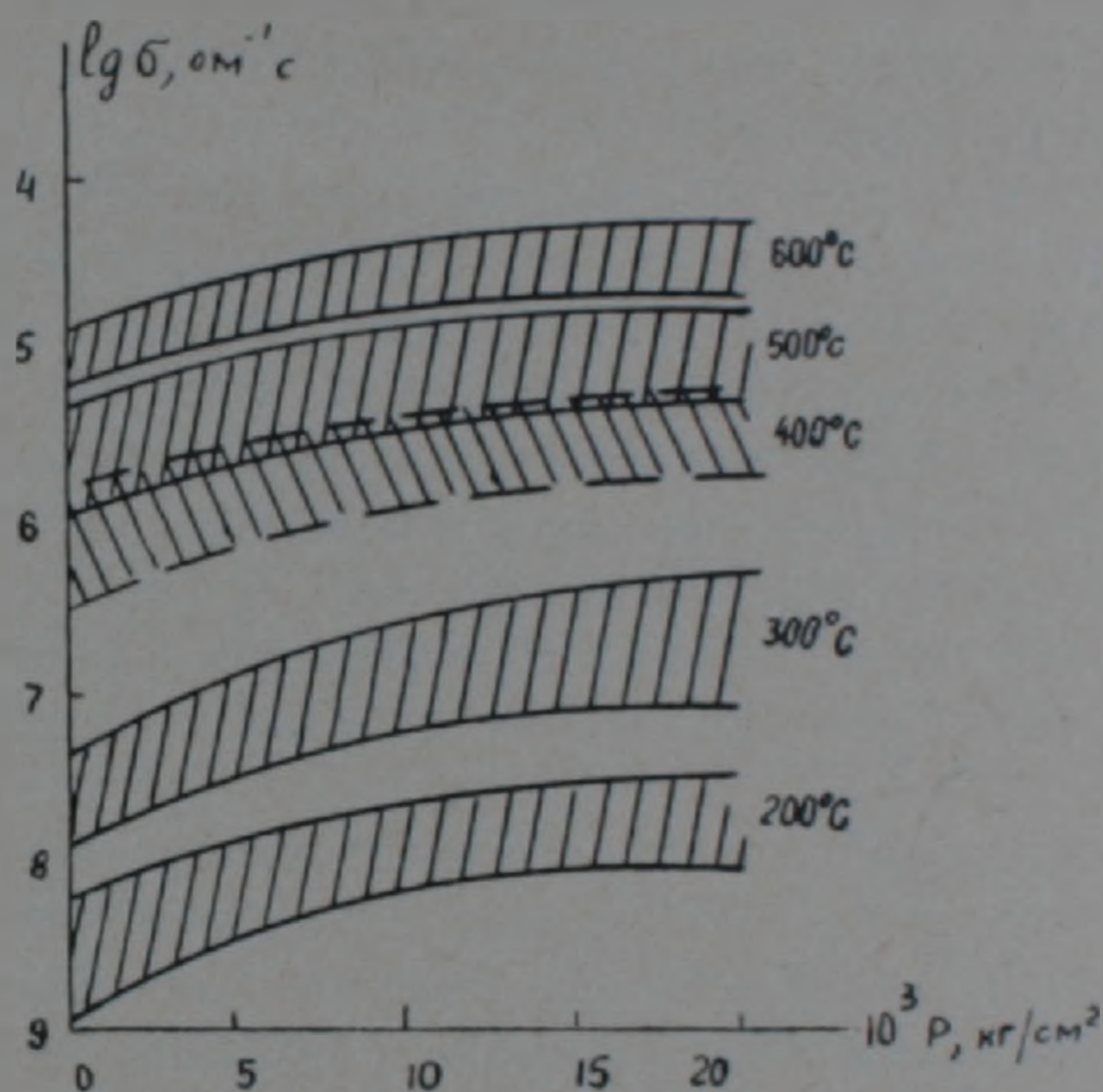


Фиг. 8. Зависимость электропроводности от температуры и давления для базальта (обр. 1114) с эффективной пористостью 26.8%.

почти постоянным, что свидетельствует о том, что энергия активизации частиц, осуществляющих перенос электрических зарядов, почти не из-

меняется. Однако, у долеритового базальта 511 (фиг. 7) угол наклона изобары при 20000 кг/см^2 по отношению к атмосферному давлению заметно изменился; соответственно изменилась также и энергия активации от 0,74 до 0,60 эв.

На основании полученных экспериментальных данных построены области изменения электропроводности долеритовых базальтов Армении для давлений до 20000 кг/см^2 и температур 200, 300, 400, 500, 600°C (фиг. 9). Следует отметить, что в эти области ложатся графики для базальтов рифтов Индийского океана.



Фиг. 9. Области расположения графиков электропроводности долеритовых базальтов и базальтов Армении.

Проведенные исследования показали, что области расположения графиков заметно обособляются при сравнительно низких температурах (200—300°C), но при дальнейшем увеличении температуры области сужаются, сближаются и даже перекрываются.

О механизме электропроводности. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать некоторые выводы о механизме электропроводности исследованных пород. Исследования электропроводности изверженных пород [6] при температуре до 1200°C показали, что на графиках, построенных в координатах логарифм электропроводности $\lg \sigma$ —обратная абсолютная температура ($1/T$), выделяются, главным образом, два прямолинейных участка. В некоторых породах может наблюдаться по три и более излома графиков этой зависимости.

Следует указать, что построение графиков в координатах $\lg \sigma$ — $1/T$ дает возможность вычислить значение энергии активации E_0 и значение предэкспоненциального коэффициента σ_0 , а также судить о механизме и других явлениях, наблюдающихся при процессах проводимости. Для долеритовых базальтов и базальтов Армении на графиках $\lg \sigma = f(1/T)$

можно выделить несколько прямолинейных участков. Чаще наблюдаются два прямолинейных участка. Первый из них соответствует интервалу $150-750^{\circ}\text{C}$ и $150-900^{\circ}\text{C}$, а второй— $700-900^{\circ}\text{C}$ и выше. В большинстве случаев обнаруживается резкий излом на графиках. Как известно [6], зависимость электропроводности от температуры выражается прямой линией только тогда, когда перенос тока осуществляется частицами одного знака и с одинаковой степенью закрепления частиц. Причем, в области высоких температур в электропроводности начинают принимать участие частицы с более высокими значениями энергии активации. Поэтому, наклон кривой изменяется и возникает излом. Изменение наклона кривой показывает, что с повышением температуры изменяется тип токоносителей. Обычно при низких температурах ток осуществляется примесными ионами, а при высоких температурах—ионами основной решетки. Эти представления, справедливые для монокристаллов, обычно применяются и для объяснения температурного хода электропроводности поликристаллических агрегатов. Поскольку в настоящее время невозможно сказать что-либо определенного об относительной роли проводимости кристаллических зерен и межкристаллической прослойки, то обычно не делают различий между ними [4]. Поэтому при истолковании экспериментальных данных по изверженным горным породам используют гипотетическую модель полупроводника, имеющего смешанную проводимость.

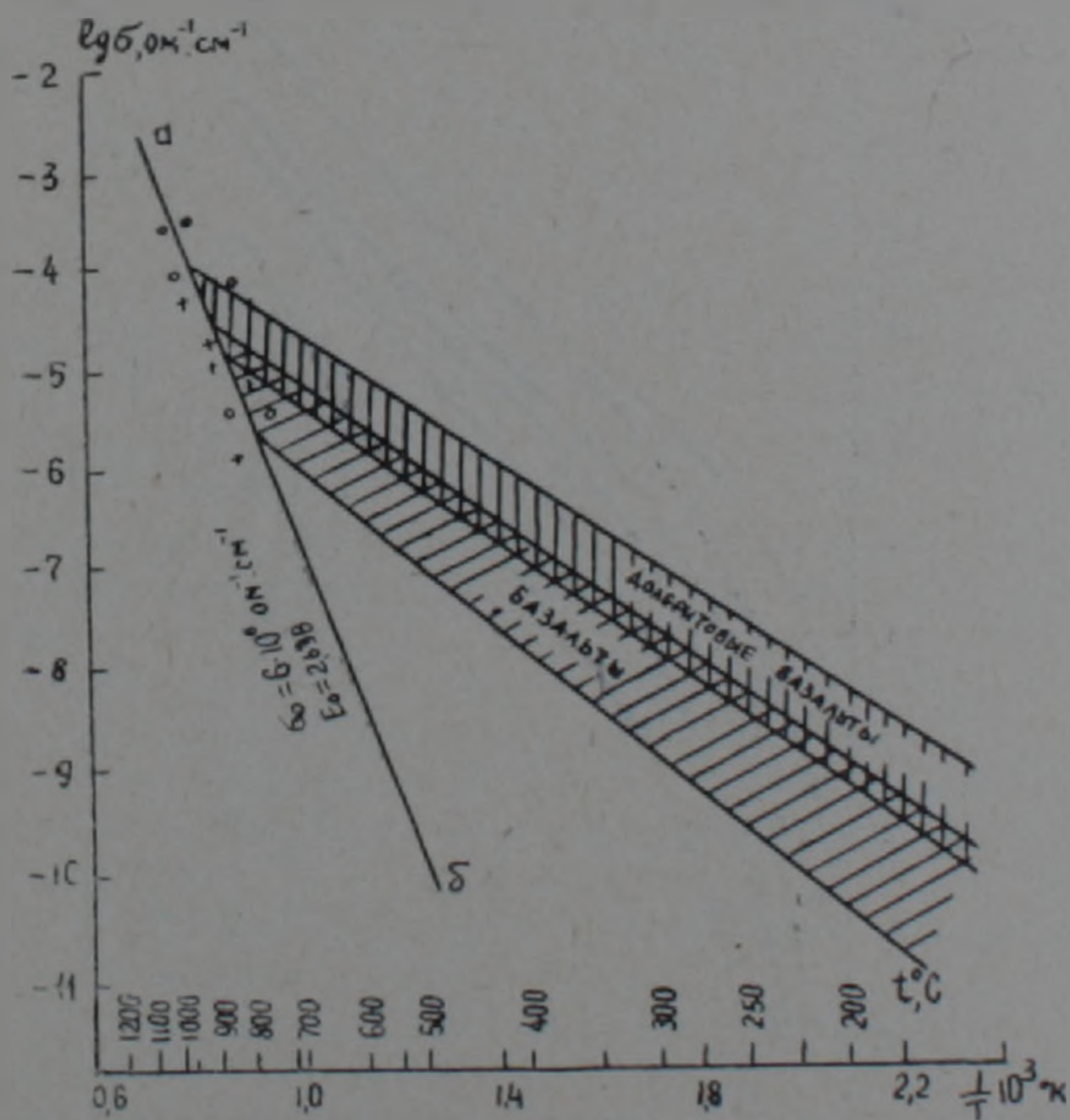
Из полученных данных видно, что более пологие отрезки графиков электропроводности имеют низкое значение E_0 , характерное для примесной проводимости ($E_0=0,66-1,0$ эв). Энергия активации высокотемпературных участков долеритовых базальтов и базальтов составляет $1,99-3,5$ эв, а иногда $3,8-6,0$ эв. Низкие значения E_0 обусловлены тем, что примесные ионы находятся вне узлов кристаллической решетки и поэтому всегда имеют меньшую энергию закрепления, чем основные ионы решетки. Для примесных ионов достаточны невысокие температуры, чтобы они, срываясь со своих мест закрепления, превратились бы в ионы, переносящие электрические заряды. Большие значения E_0 при $t=900^{\circ}\text{C}$ и выше соответствуют вступлению в электропроводность нового механизма носителей тока, обусловленного основными ионами, вырванными из узлов кристаллической решетки сильными тепловыми флуктуациями. Как и для ранее изученных изверженных горных пород, электропроводность долеритовых базальтов и базальтов также имеет ионный механизм, а параметры σ_0 , E_0 определяют собственную электропроводность и являются физической характеристикой изученных пород.

Наблюдаемая высокая энергия активации E_0 частиц, осуществляющих электропроводность породы ($3,5-6,0$ эв), характерна для тех пород, излом графиков электропроводности которых происходит при температуре 900°C , а иногда и при 950°C . Эти температуры характеризуют область собственной проводимости пород. Поскольку у этих базальтов следов плавления не наблюдалось, то, возможно, высокотемпературный излом графика, после которого происходит резкий рост электропровод-

ности, совпадает с моментом выделения конституционной воды из кристаллической решетки [3]. Такой интенсивный рост электропроводности может наблюдаться и при более низких температурах в тех случаях, когда идет разрушение вторичных водосодержащих минералов или наблюдаются полиморфные превращения в рудных минералах [6].

Таким образом, высокая энергия активации частиц, участвующих в переносе электрических зарядов тех базальтов, которые испытывают физико-химические изменения, не является для них реальной физической величиной. Вероятно, эти параметры будут характеризовать состояние породы при физико-химических превращениях минералов. Поэтому, с целью определения истинной величины электропроводности, был построен график собственной проводимости а-б (фиг. 10) по точкам излома прямой примесной проводимости различных типов базальтов.

Известно [6], что если в относительно чистый кристалл вводить примеси, то с увеличением их концентрации излом графика зависимости $\lg \sigma = i(1/T)$ сдвигается в область высоких температур. Причем все точки изломов ложатся на прямую линию, характеризующую собственную проводимость ионного кристалла. Аналогично был построен график собственной проводимости базальтов. Энергия активации собственной проводимости, найденная графически (фиг. 10), имеет величину $E_0 = 2,6$ эв, а предэкспоненциальный коэффициент $\sigma_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Эти пара-



Фиг. 10. График собственной проводимости (а и б) и области примесной проводимости долеритовых базальтов и базальтов Армении. Условные обозначения: $\circ$ — долериты; $+$ — базальты; а—б — график собственной электропроводности, построенный по точкам излома прямой $\lg \sigma = f(1/T)$. Заштрихованные области графиков — область примесной проводимости.

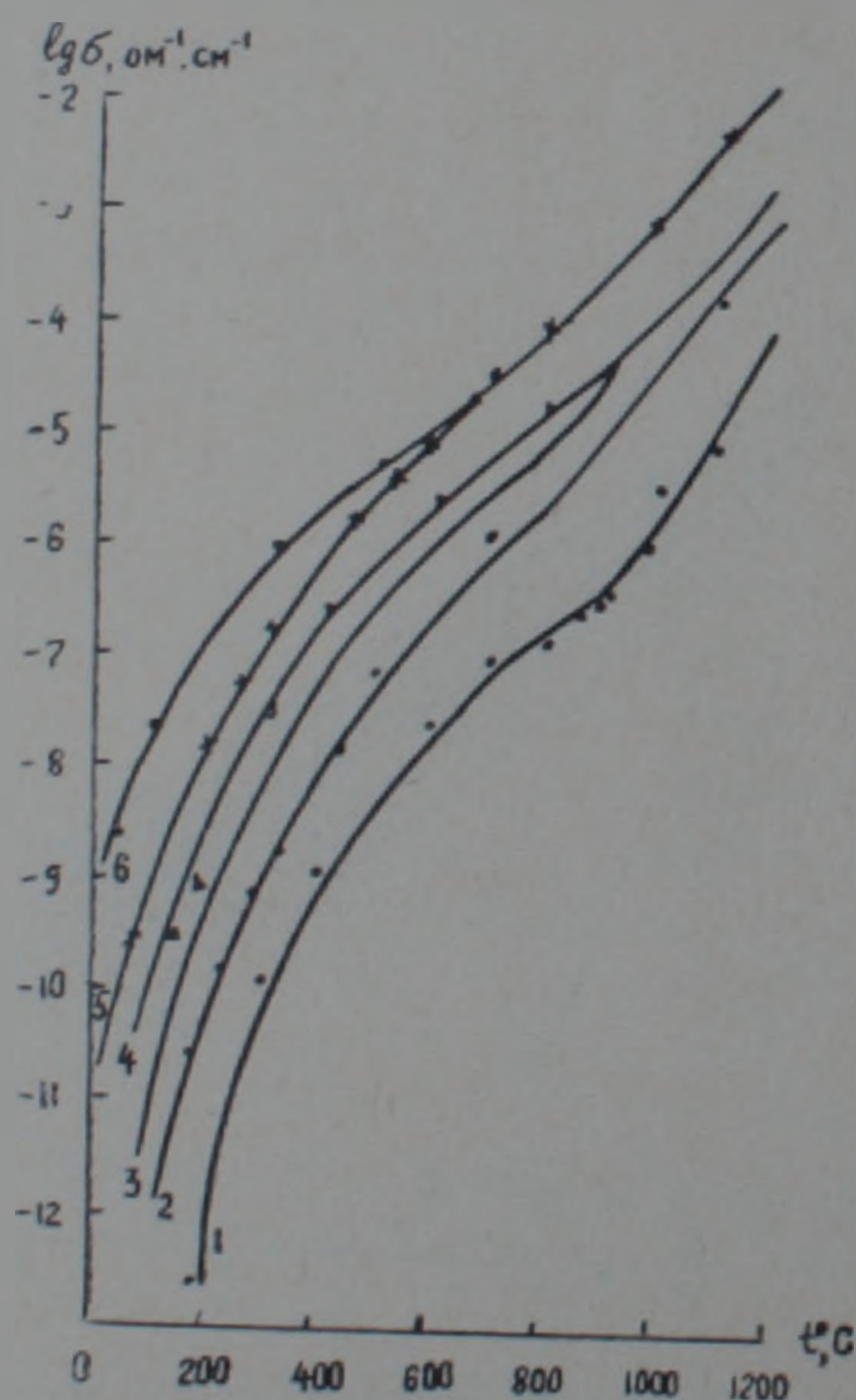
метры меньше значений, полученных прямыми измерениями и характеризуют термодинамические состояния базальтов в области собственной электропроводности. При давлении 20000 кг/см^2 значения E_0 в области примесной проводимости находятся в пределах $0,4—0,6 \text{ эв}$, а в области собственной проводимости— $1,4—1,8 \text{ эв}$, то есть меньше, чем при атмосферном давлении.

На основании выполненных исследований можно отметить следующее:

1. Электропроводность базальтов различных типов в области умеренных температур обнаруживает определенную связь с их составом и структурно-текстурными особенностями. Увеличение пористости понижает электропроводность и оказывает влияние на градиент ее изменения в начальной области давлений (до 500 кг/см^2).

2. Значения собственной проводимости изученных пород ($E_0 = 2,6 \text{ эв}$ и $\sigma_0 = 6 \cdot 10^6 \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$) являются реальными физическими величинами, определяющими термодинамические процессы в этих веществах. Собственная проводимость в области температур $700—1200^\circ\text{C}$ осуществляется, как и для большинства изверженных пород, ионами кристаллической решетки.

3. Базальты и долеритовые базальты Армении в области температур до 900°C (фиг. 11) характеризуются меньшей электропроводностью в



Фиг. 11. Зависимость электропроводности магматических горных пород от температуры. 1—мангитные эклогиты; 2—ультраосновные породы; 3—базальты Армении; 4—базальты Анатолы; 5—островные базальты Индийского океана; 6—базальты рифтовой зоны Индийского океана.

сравнении с базальтами Индийского океана и континентов, но в сравнении с ультраосновными породами и эклогитами они обладают более высокой электропроводностью во всем изученном диапазоне температур.

Институт физики Земли
им. О. Ю. Шмидта АН СССР
Киевский ордена Ленина государственный
университет им. Т. Г. Шевченко

Поступила 14.XII.1972.

Ա. Տ. ԲՈՆԴԱՐԵՆԿՈ, Մ. Պ. ՎՈՒԱՐՈՎԻՉ, Գ. Տ. ՊՐՈԴԱՅՎՈՒԱ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԲԱԶԱԼՏՆԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԸ ԲԱՐՁՐ ՃՆՇՈՒՄՆԵՐԻ ՈՒ ԶԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆՆԵՐԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Ուսումնասիրված է բազալտների ու դոլերիտային բազալտների էլեկտրահաղորդականությունը մինչև 1100°C ջերմաստիճանների և մթնոլորտային ճնշման, ինչպես նաև մինչև 20000 կգ/սմ^2 ճնշումների և մինչև 600°C ջերմաստիճանների պայմաններում: Բերված են էլեկտրահաղորդականության, ակտիվացման էներգիայի արժեքները և դիտարկված է դրանց կախումը պետրոգրաֆիական բնութագրերից: Տրված է ուսումնասիրված բազալտների և այլ հրային ապարների էլեկտրահաղորդականությունների համեմատական անալիզը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бердичевский М. Н. и др. Аномалия электропроводности земной коры в Якутии. Известия АН СССР, сер. Физика Земли, № 10, 1969.
2. Бондаренко А. Т. Обобщение данных по электропроводности изверженных горных пород при высоких температурах в связи со строением земной коры и верхней мантии. ДАН СССР, т. 178, № 5, 1968.
3. Кузнецов А. А., Иванов В. П., Касатов Б. К. О применении термографии для исследования траппов северо-запада Сибирской платформы. ДАН СССР, т. 163, № 2, 1965.
4. Моисеенко У. И., Соколова Л. С., Истомин В. Е. Электрические и тепловые свойства горных пород. «Наука», Новосибирск, 1970.
5. Пархоменко Э. И., Бондаренко А. Т. Электропроводность горных пород при высоких температурах и одностороннем давлении. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, № 23 (190), 1962.
6. Пархоменко Э. И., Бондаренко А. Т. Электропроводность горных пород при высоких температурах и давлениях. «Наука», 1972.
7. Ракчеев А. Д., Чернышев Л. В. Зависимость энергии активации и химического состава пиритов от условий их синтеза. ДАН, т. 183, № 5, 1968.
8. Садовский М. А. Насущные задачи геофизики в комплексе наук о Земле. Вестник АН СССР, № 1, 1968.