

УДК 550.3.525.2

А. Т. АСЛАНЯН, А. В. АРУТЮНЯН

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ, ПЛОТНОСТИ И СЖИМАЕМОСТИ СЕРПЕНТИНИТОВ АРМЕНИИ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Исследование упругих свойств и плотности серпентинитов при высоких давлениях имеет важное значение в связи с решением проблемы серпентинизации ультрамафитов. Результаты исследований упругих свойств серпентинитов офиолитовых поясов Армении частично были опубликованы ранее [1].

Для серпентинитов верхнемеловых офиолитовых поясов Армении при атмосферных условиях характерны большие вариации плотности ( $2,24—3,02 \text{ г/см}^3$ ) и пористости ( $1,03—11,5\%$ ). Скорость продольных волн  $v_p$  при нормальных условиях колеблется в пределах  $3,54—7,18 \text{ км/сек}$ , а поперечных волн ( $v_s$ ) —  $1,46—4,02 \text{ км/сек}$ . Коэффициент Пуассона в основном заключен в пределы  $0,27—0,32$ , а для некоторых образцов серпентинитов достигает  $0,35—0,4$ .

Характер связи между плотностью и скоростями упругих волн для серпентинитов показан на рис. 1. Как видно из рисунка, с возрастанием плотности увеличиваются скорости упругих  $v_p$  и  $v_s$  волн, причем коэффициент корреляции равняется  $0,61$ . Характер связи между скоростью и пористостью для этих пород показан на рис. 2. Следует отметить, что имеется общая тенденция к уменьшению скорости продольных волн с увеличением пористости.

Для испытаний в области высоких давлений из вышеуказанных образцов серпентинитов были выбраны наиболее представительные. Результаты исследований продольных волн при давлениях до  $20 \text{ кб}$  для серпентинитов хризотил-антигоритового состава приведены на рис. 3. По скоростям продольных волн серпентиниты дифференцируются на три группы.

На рис. 3 представлены кривые зависимости скоростей продольных волн от давления для образцов серпентинитов первой группы, состоящих из антигорита и до  $30—35\%$  хризотила. Эти образцы характеризуются наиболее высокими скоростями. Содержание рудных минералов (магнетит) в них варьирует в пределах  $3—8\%$ , причем в целом для всех групп серпентинитов процентное содержание рудных минералов примерно одинаковое. Для преобладающего большинства образцов кривые имеют плавный характер. Для некоторых образцов серпентинитов, как и для ультраосновных пород [2] в начальной области давления, харак-

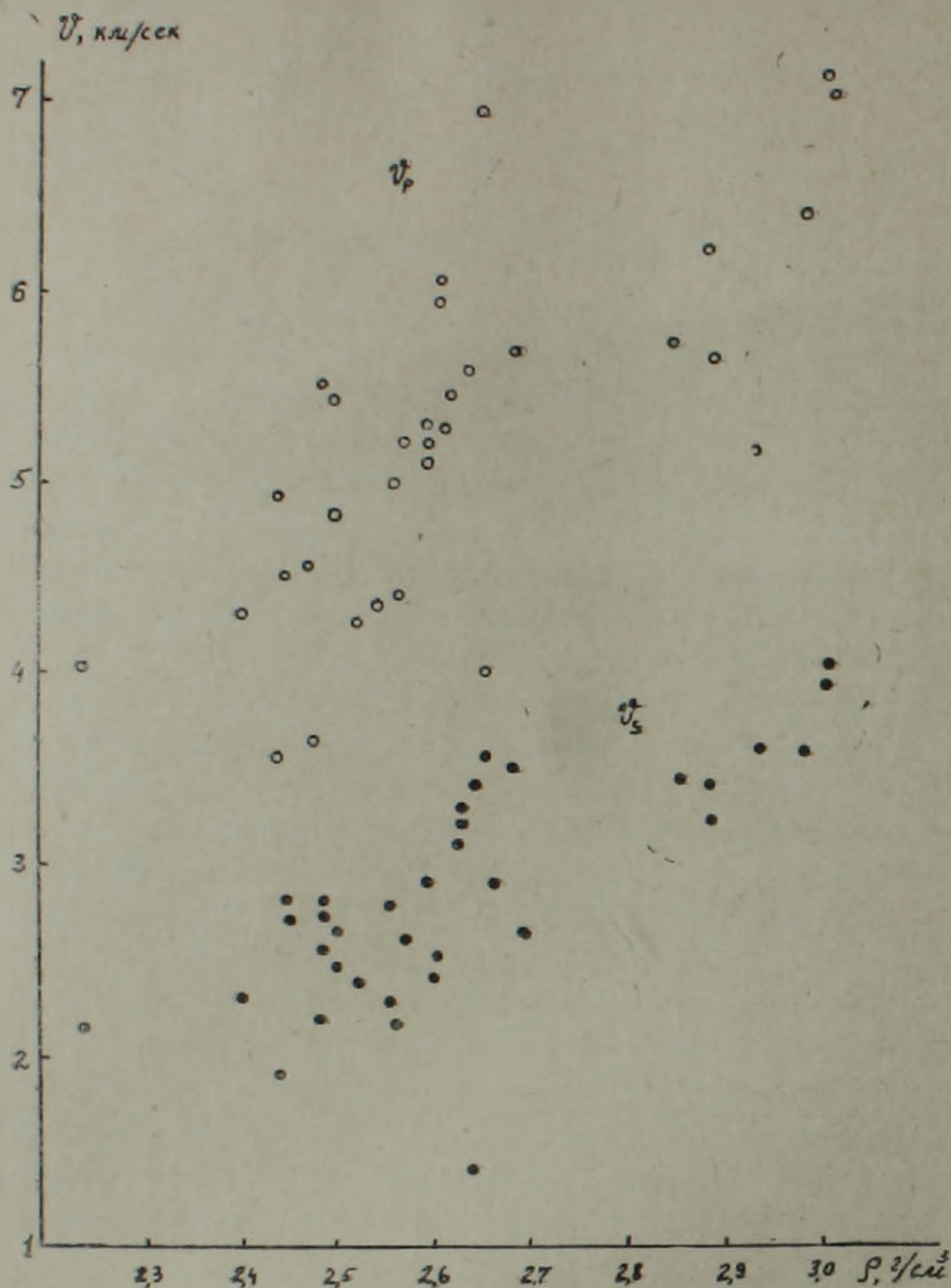


Рис. 1. Зависимость между плотностью и скоростями упругих волн при атмосферном давлении для серпентинитов.

терна волнистость кривых. Наклон кривых  $v_p = \bar{v}(\rho)$  для первой группы меняется относительно мало. В среднем прирост скорости с давлением  $\Delta v / \Delta \rho = 25 \text{ м/сек.кб.}$  Наиболее высокими скоростями в этой группе обладают образцы 1365—серпентинит антигоритовый и 1033—серпентинит апоперидотитовый, в которых скорость  $v_p$  волн при давлениях 10 кб варьирует в пределах 7,6—7,7 км/сек.

Вторую группу пород представляют серпентиниты (рис. 4) с содержанием хризотила 50—55%, антигорита и рудного минерала (1—6%). Они характеризуются более низкими значениями скоростей продольных волн, и кривые  $v_p = \bar{v}(\rho)$  группируются почти в таком же интервале давлений, что и кривые первой группы. Прирост скорости с увеличением давления выше, чем для первой группы пород, и составляет 32—36 м/сек.кб.

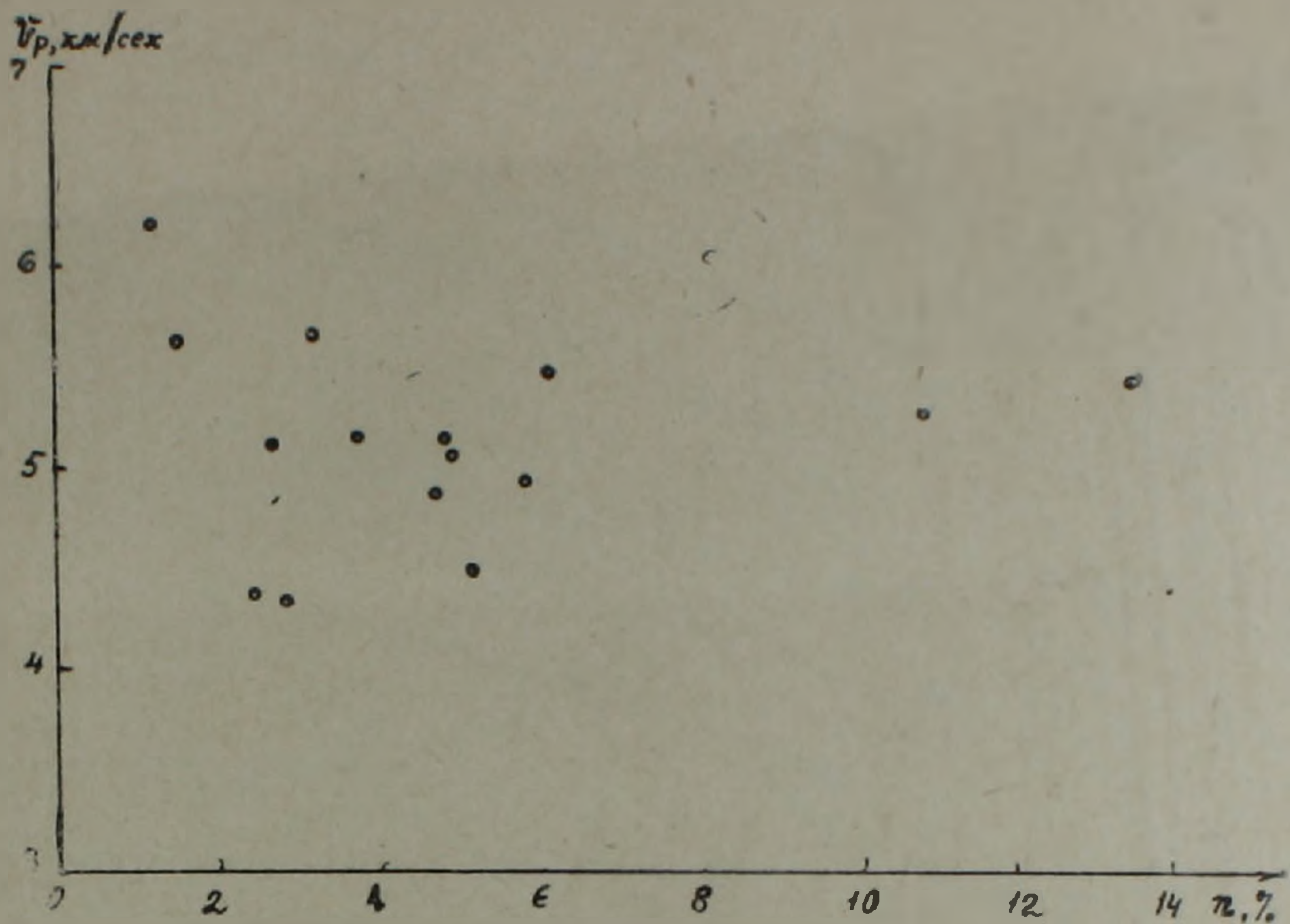


Рис. 2. Зависимость между скоростью продольных волн и пористостью при атмосферном давлении для серпентинитов.

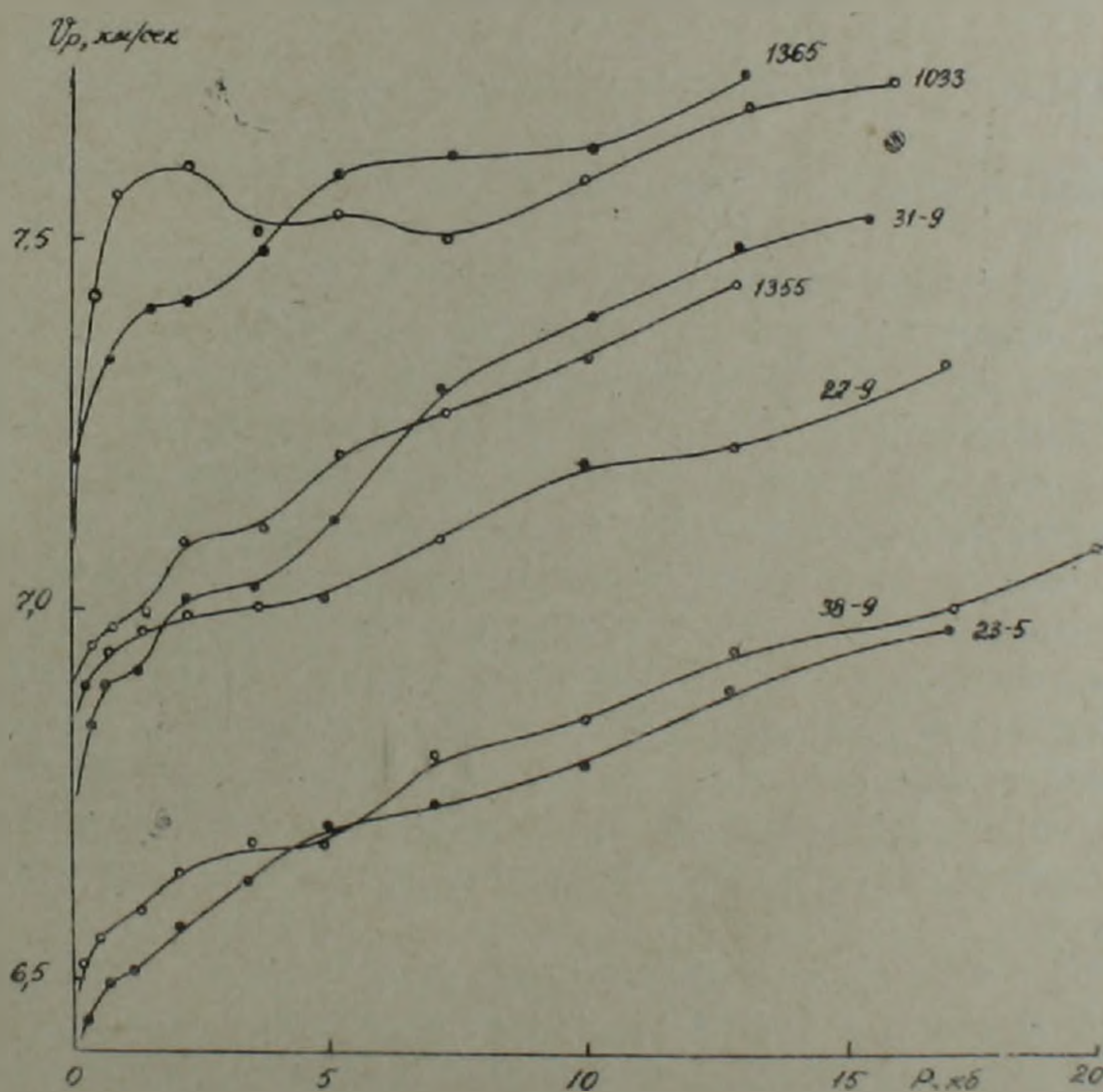


Рис. 3. Изменение скорости продольных волн в зависимости от давления для серпентинитов I группы.

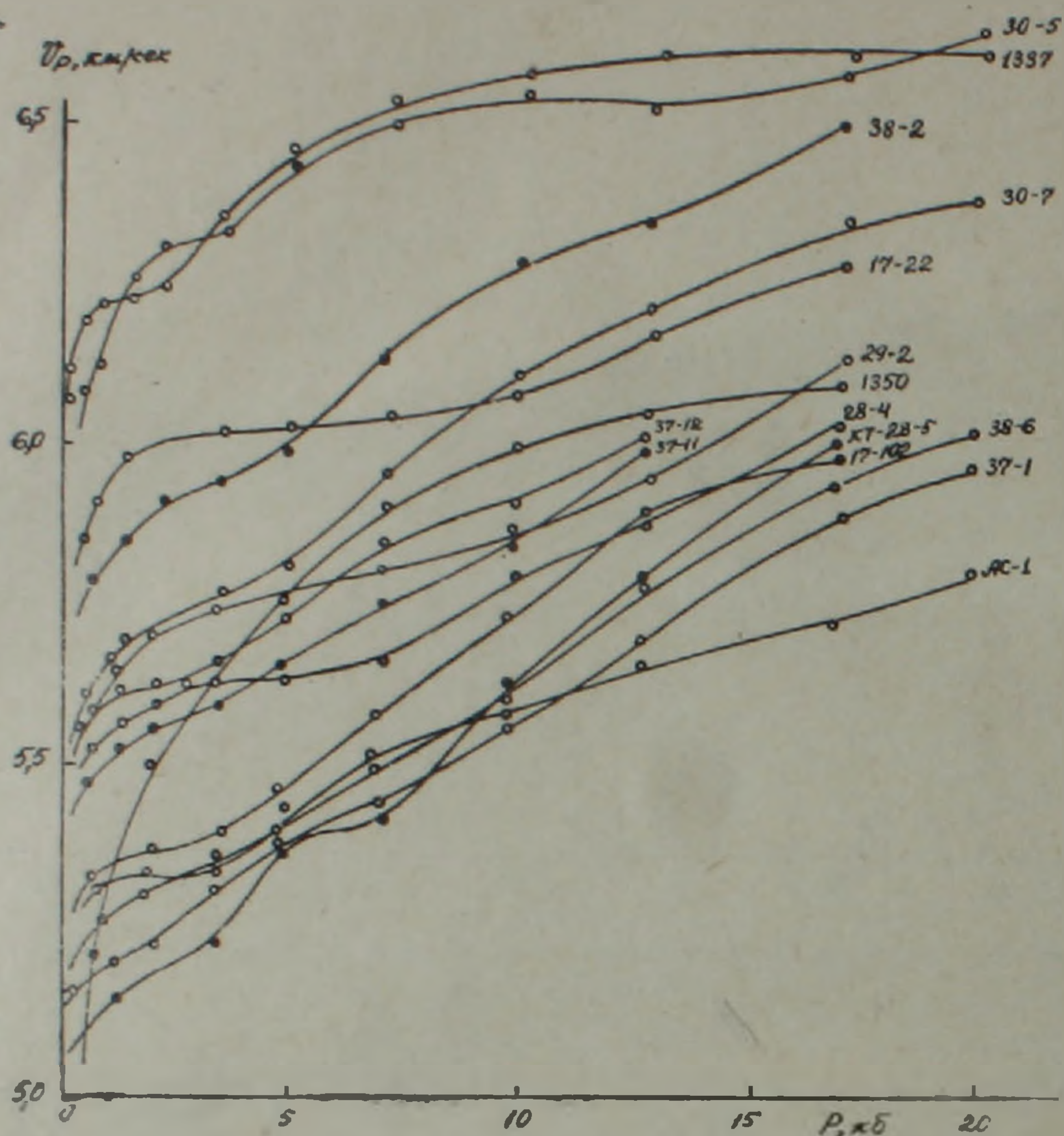


Рис. 4. Зависимость скорости продольных волн от давления для серпентинитов II группы.

Третья группа серпентинитов по составу отличается от второй группы большим содержанием хризотила и меньшим содержанием рудного минерала. Скорости упругих волн в этой группе наименьшие. Кривые зависимости  $v_p = f(p)$  для этой группы серпентинитов (рис. 5) характеризуются наибольшим наклоном к оси давления. Средний прирост скорости для пород этой группы  $\Delta v / \Delta p$  составляет 48—52 м/сек.кб.

Литературных данных по скоростям поперечных волн для серпентинитов немного. Результаты, полученные нами для скоростей поперечных волн, показаны на рис. 6. Обращает внимание то обстоятельство, что группировка на графике кривых  $v_s = f(p)$  проявляется не так четко, как для продольных волн, особенно по второй и третьей группам. Сопоставляя полученные данные по продольным и поперечным волнам, легко убедиться, что высоким значениям  $v_p$  соответствуют высокие значения  $v_s$ .

Влияние пористости и сжимаемости минералов на интенсивность изменения декремента объема под влиянием давления образцов серпентинитов показано на рис. 7. В большинстве случаев с увеличением начальной пористости возрастает величина декремента объема (29—5,38—

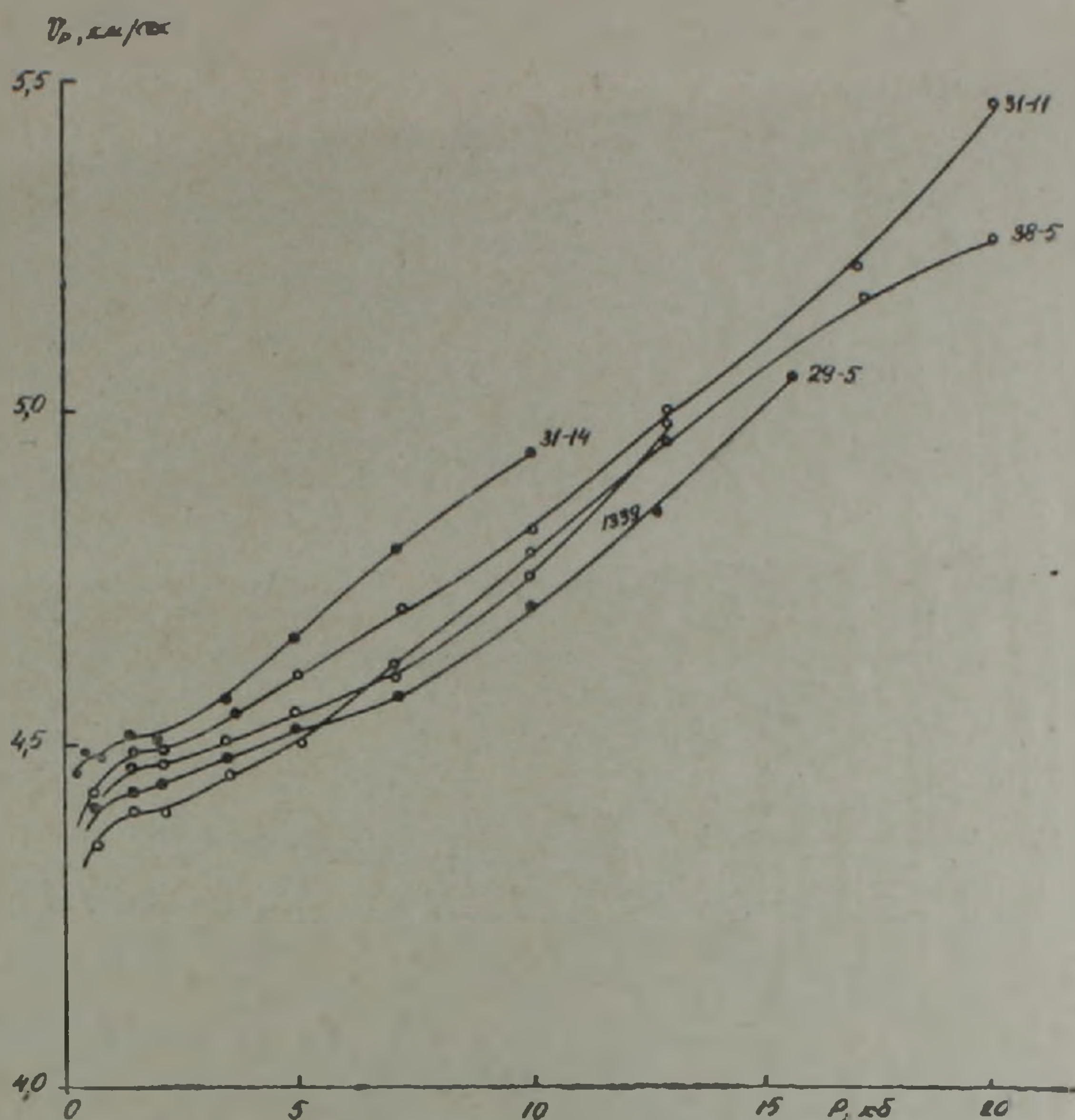


Рис. 5. Изменение скорости продольных волн от давления для хризотилowych серпентинитов III группы.

5 и др.). Этим объясняется тот факт, что у наиболее плотных серпентинитов декремент объема возрастает с давлением сравнительно слабее (31—9,27—9 и др.). Образцы хризотилового состава имеют большую величину декремента объема, чем образцы антигоритового состава.

Плотность является одной из важных физических характеристик горных пород. Литературных данных об изменении плотности с давлением для серпентинитов тоже немного. Там же было изучено влияние давления на плотность и, как уже отмечалось, на декремент объема. Данные по плотности в функции от давления для первой группы образцов серпентинитов представлены на рис. 8. Для всех изученных образцов с повышением давления плотность значительно возрастает. Сопоставляя данные по скорости упругих волн и плотности в функции давления, можно сказать, что, как и для других пород, между кривыми наблюдается хорошее согласие: породам с наибольшей плотностью соответствуют наивысшие скорости упругих волн.

Данные по плотности для большинства образцов второй и третьей групп представлены на рис. 9. По значениям плотности так же, как и по скоростям поперечных волн, вторая и третья группы разграничиваются не так четко.

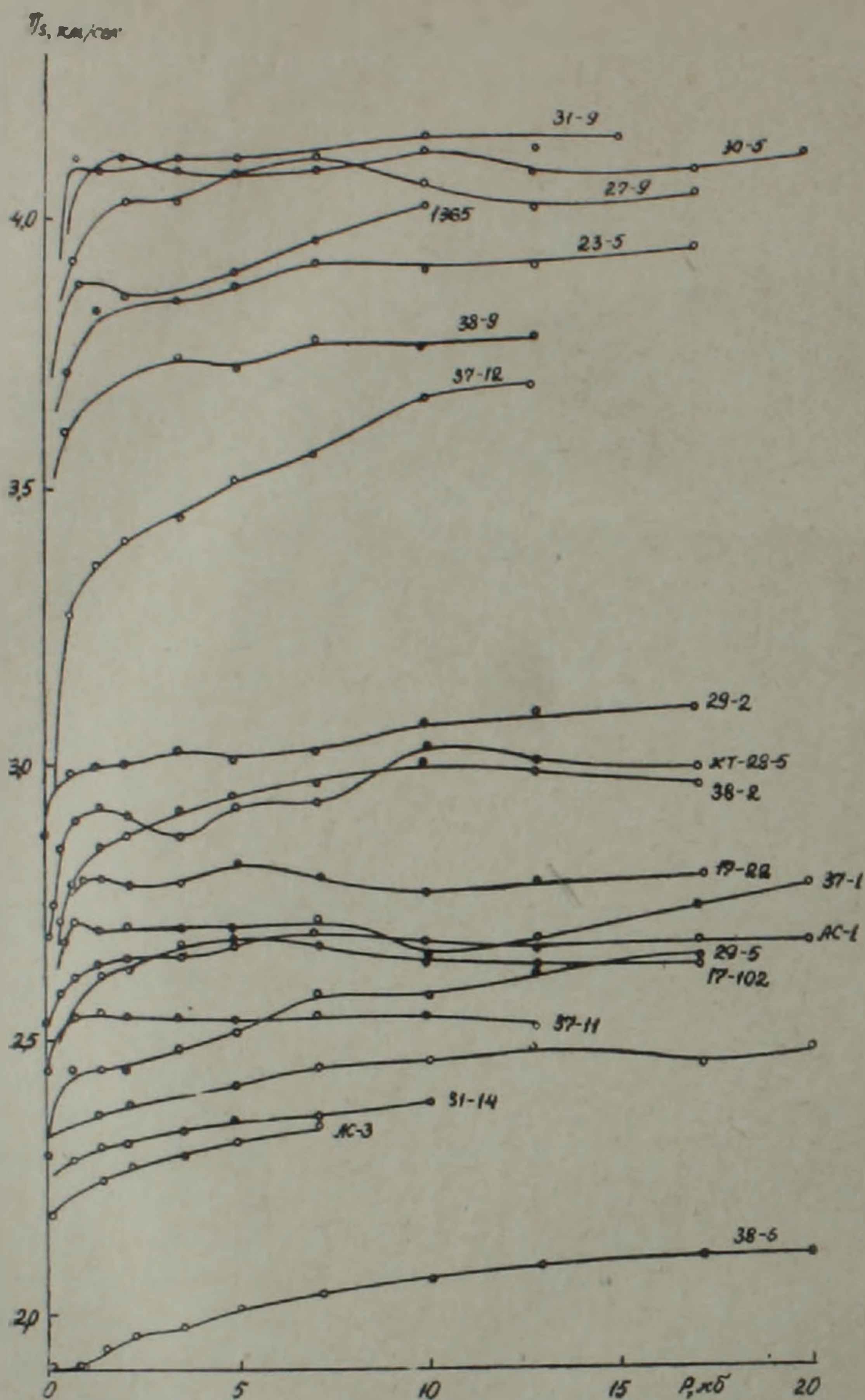


Рис. 6. Зависимость скорости поперечных волн от давления для серпентинитов.

Обсуждая полученные опытные данные по скоростям и плотности серпентинитов различного состава, можно отметить, что присутствие серпентина (минерала) в разных породах существенно снижает как скорость упругих волн, так и плотность, а также повышает пластичность пород. Величина скорости упругих волн и характер изменения ее с давлением в серпентинитах различаются для хризотилowych и антигоритовых минеральных разновидностей.

Для антигоритовых серпентинитов наблюдались аномально высокие скорости [5], почти равные по величине скоростям в перидотитах. В этих

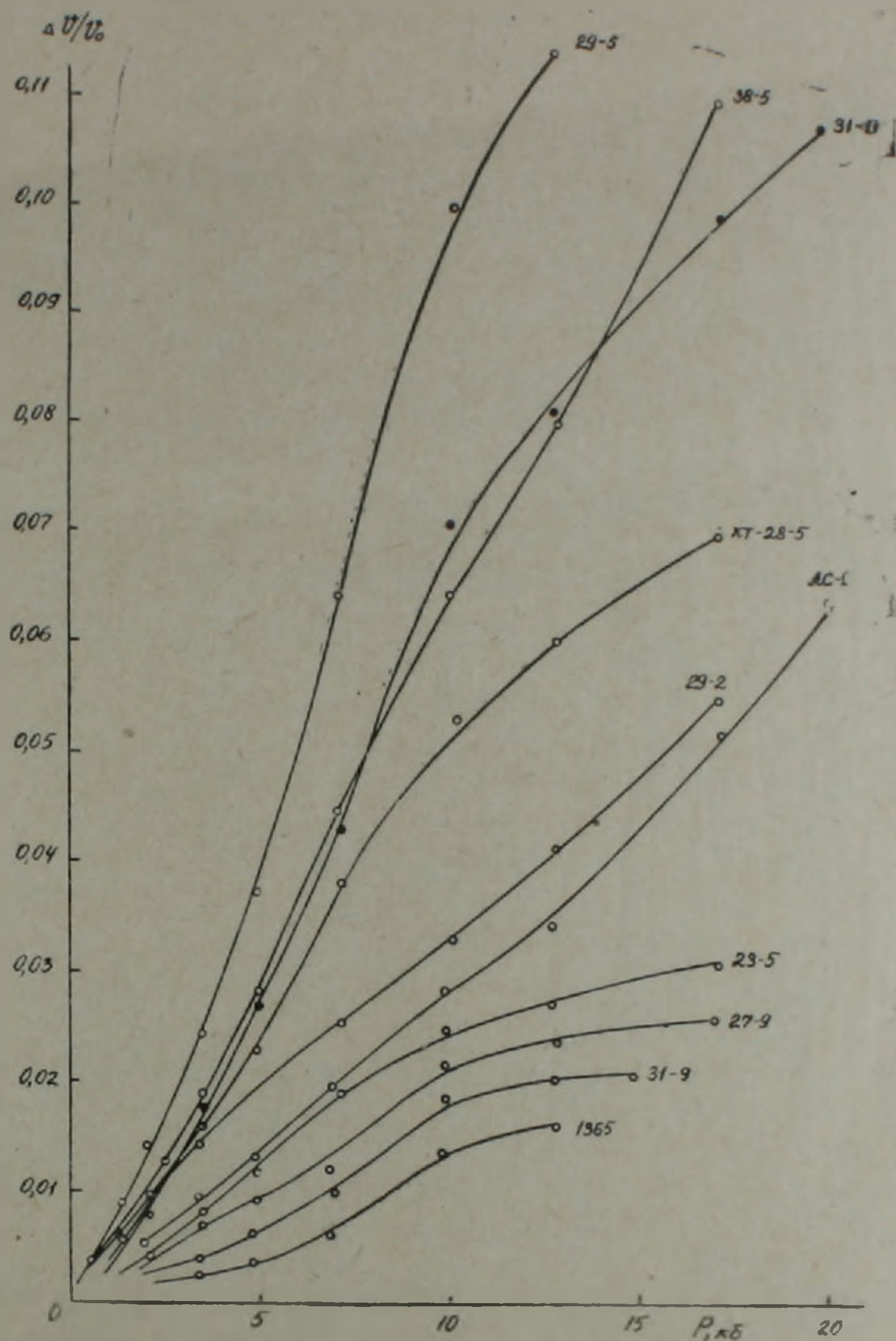


Рис. 7. Зависимость декремента объема при повышении давления в серпентинитах.

серпентинитах, как отмечают авторы, увеличение скорости под давлением составляет 7—12%, а в лизардитовых достигает 20—30%. Характерным для пластически деформированных антигоритовых серпентинитов является волнистость кривых. Это явление, как уже отмечалось [5], объясняется специфической реакцией пластически деформированной породы на вторичное погружение, в результате чего в образце происходит перераспределение напряжений в соответствии с направлением пластического течения. Указанное явление может также связываться со специфическими особенностями структуры образцов, а в некоторых случаях с наличием карбоната в серпентинитах, который при давлениях 2-4 кб претерпевает полиморфный переход.

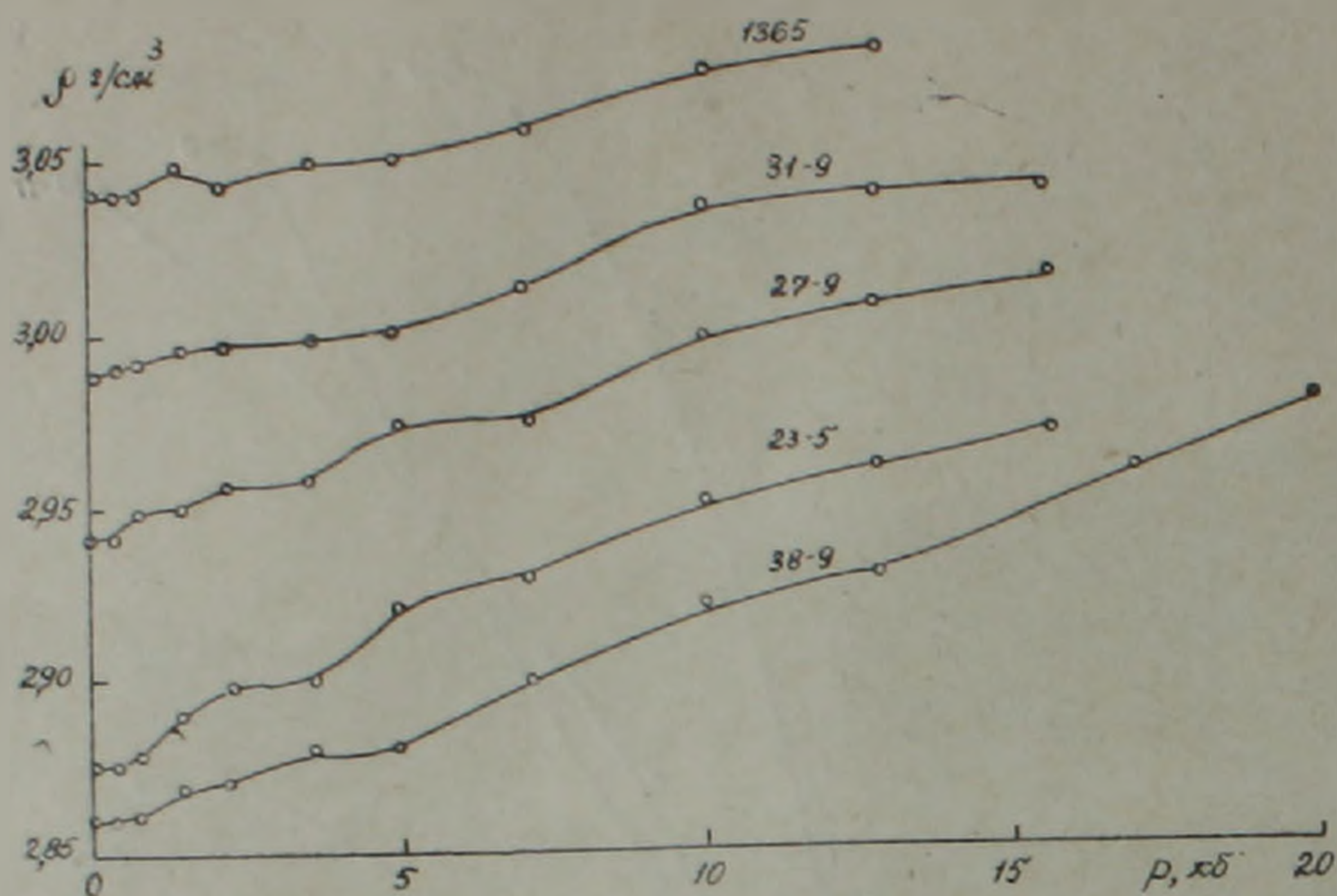


Рис. 8. Зависимость плотности от давления для образцов антигоровых серпентинитов I группы.

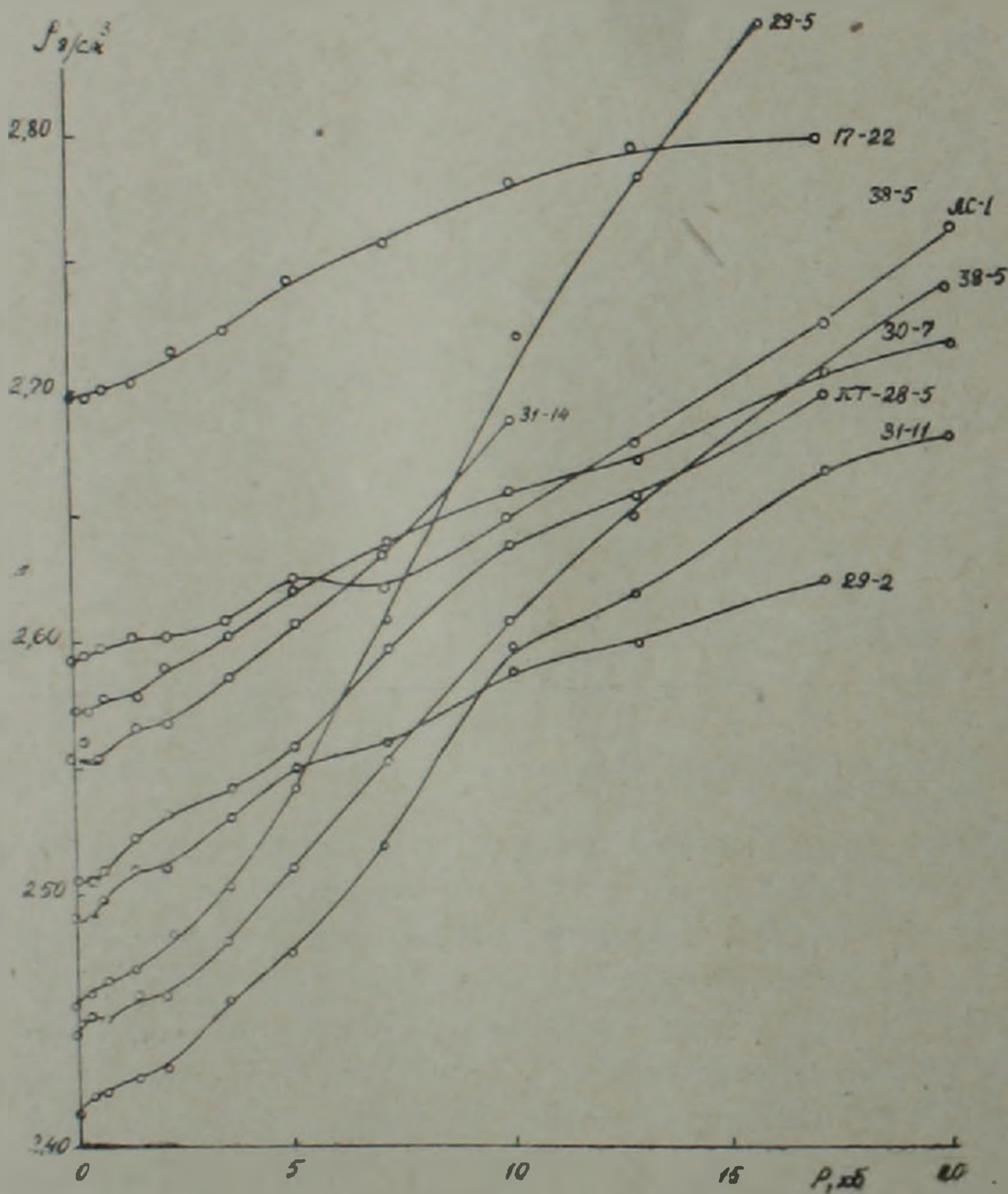


Рис. 9. Зависимость плотности от давления для хризотил-антигоровых серпентинитов II и III групп.

Первая группа пород, в которую входят серпентиниты антигоритового состава, характеризуется при нормальных условиях скоростями продольных волн 6,4—7,5 км/сек (15%), при 5 кб—6,64—7,65 км/сек (13%) и при 20 кб—6,99—7,78 км/сек (10%). Среднее значение повышения скорости в этой группе в интервале 0—20 кб составляет 6—7%. Во вторую область сведены данные для образцов с содержанием серпентина-хризотила до 50—55%. При нормальных условиях для этой группы пород  $v_p$  колеблется в пределах 5,0—6,1 км/сек (18%), при 5 кб—от 5,31 до 6,45 км/сек (17%) и при 20 кб—от 5,8 до 6,65 км/сек (12%). Среднее значение повышения скорости в этой группе в интервале 0—20 кб составляет 11—12%. Третья область ограничивает кривые скоростей продольных волн, полученные для образцов серпентинитов с содержанием хризотила 70% и более. Значения скоростей при различных давлениях для этой группы пород находятся в следующих интервалах: при нормальных условиях 3,8—4,47 км/сек (15%), при 5 кб—4,28—4,72 (13%) и при 20 кб—5,03—5,50 км/сек (9%). Среднее изменение повышения скорости в интервале 0—20 кб составляет 18—19%.

Данные по скоростям поперечных волн показывают, что вторая и третья группы образцов пород разделяются не так четко. Это, по-видимому, объясняется тем, что поперечные волны относительно мало чувствительны к вариациям минерального состава и структуры образцов пород; значения скоростей поперечных волн для второй и третьей групп при нормальных условиях находятся в интервале 2,1—2,8 км/сек (25%), при 5 кб—2,3—3,0 км/сек (23%), при 20 кб—2,39—3,18 км/сек (24%). Первая группа расположена при нормальных условиях в интервале 3,2—4,02 км/сек (20%), при 5 кб—3,61—4,2 км/сек (14%), при 20 кб—3,72—4,2 км/сек (11%).

Серпентиниты по значениям плотности также разбиваются на две области. Величины  $\rho$  при нормальных условиях расположены в пределах 2,81—3,04 г/см<sup>3</sup> (7,5%), при 5 кб—2,86—3,06 (6,5%), при 20 кб—2,97—3,1 г/см<sup>3</sup> (4,2%). Средний прирост плотности в диапазоне давлений 0—20 кб в этой группе составляет 3—4%.

Плотность при нормальных условиях второй группы серпентинитов варьирует от 2,41 до 2,69 г/см<sup>3</sup>, что соответствует 10%, а при 15 кб этот интервал сужается до 7,7% (от 2,61 до 2,83 г/см<sup>3</sup>).

Средний прирост плотности в интервале давлений 0—20 кб для второй группы образцов составляет 8—9%. Можно отметить, что с повышением давления уменьшается интервал вариации плотности.

Сопоставление приведенных выше результатов для серпентинитов, представленных из офиолитовых поясов Армении, с имеющимися в литературе данными для аналогичных пород, показало следующее.

В первую группу входят в основном антигоритовые серпентиниты, которые характеризуются высокими скоростями упругих волн (при 15 кб  $v_p = 7,0—7,7$  км/сек). Такими высокими скоростями характеризуются, например, антигоритовые серпентиниты Воронежского кристаллического массива [5] (при 15 кб  $v_p = 7,0—7,1$  км/сек), а также антигоритовые серпентиниты, исследованные авторами [6].

Серпентиниты второй группы, которые представлены хризотил-антигоритовыми разностями, характеризуются более низкими скоростями, чем антигоритовые (при 15 кб  $v_p = 5,7—6,6$  км/сек). Область вариации этой группы хорошо согласуется с областями, полученными для лизардит-антигоритовых серпентинитов Воронежского кристаллического массива [3], а также для серпентинитов того же состава со дна Индийского океана [4] и из скважины, пробуренной на острове Пуэрто-Рико [7]. Низкие скорости получены в хризотиловых серпентинитах (при 2 кб  $v_p = 4,1—4,5$  км/сек). Подобными скоростями характеризуются серпентиниты того же состава Воронежского кристаллического массива, Индийского океана и острова Пуэрто-Рико [3, 4, 7].

Необходимо отметить, что для большинства образцов пород, приведенных в вышеуказанных работах, отсутствует петрографическое описание, вследствие чего не представлялось возможным провести более глубокий анализ.

Для выяснения влияния минералогического состава, трещиноватости и структуры на скорости упругих волн у серпентинитов, можно сопоставить образцы разных групп. Образцы первой группы в основном состоят из антигорита; они имеют сложную петельчатую и решетчатую структуру (рис. 3) и обладают малой пористостью. В отличие от первой группы пород образцы второй группы вместе с антигоритом содержат серпентин, представленный хризотилом, и имеют неясную решетчатую, местами параллельно-волокнистую структуру (рис. 4). Они обладают более высокой пористостью, чем образцы первой группы. Образцы третьей группы, состоящие в основном из серпентина-хризотила, имеют параллельно-волокнистую или поперечно-волокнистую, а иногда мелкопетельчатую структуру (рис. 5) и обладают большей пористостью, чем образцы первой и второй групп.

Таким образом, выясняется, что высокие скорости образцов первой группы обусловлены присутствием минерала антигорита, который обладает более высокими упругими свойствами, сложной петельчатой и решетчатой структурой, а также малой пористостью. В то же время низкие скорости третьей группы серпентинитов обусловлены, очевидно, присутствием большого количества серпентина-хризотила с параллельно-волокнистой структурой, а также высокой пористостью породы. Образцы второй группы занимают промежуточное положение. Прирост скорости с давлением при переходе от хризотиловых серпентинитов к антигоритовым уменьшается.

Как уже отмечалось, имеется хорошая корреляция между скоростями продольных и поперечных волн и плотностью горных пород. Так, например, образцы 1365, 31-9 и др. (см. рис. 8) из первой группы обладают высокими скоростями и соответственно высокой плотностью. Подобный пример можно привести также для пород второй группы.

Влияние пористости на сжимаемость горных пород можно рассматривать на примере образцов 31-11 ( $n=5,86\%$ ) и АС-1 ( $n=2,63\%$ ). Из рис. 7 видно, что декремент объема сильно колеблется, причем наиболь-

шие изменения при повышении давления претерпевают наиболее пористые образцы. Данные по приросту скоростей и плотности показывают, что серпентиниты хризотилового состава являются одними из наиболее сильно сжимаемых горных пород. Значительные изменения плотности с давлением обусловлены особой волокнистой структурой минерала хризотила. Сжимаемость серпентинитов уменьшается с увеличением количества серпентина-хризотила.

Широкий диапазон значений скоростей в серпентинитах как в наших исследованиях, так и в вышеуказанных работах объясняется различными соотношениями разновидностей серпентина в породах. Однако само это соотношение обусловлено более общими причинами, заключающимися в различии термодинамических условий образования серпентинитовых минералов.

Связь антигоритизации с динамометаморфизмом подчеркивалась в ряде работ [5, 8 и др.], однако во многих описанных случаях фиксировалось ориентированное давление (стресс) с проявлением многочисленных зон брекчирования, расщепления. Исследованные нами серпентиниты обладают местами отчетливым сланцеватым строением, приуроченным к тектонически нарушенным участкам ультрамафитовых пород, а также петельчатой и сложно-петельчатой микроструктурой, которая является результатом многостадийности процесса серпентинизации. Каждая фаза серпентинизации влияла на структуру и минеральный состав определенным образом. Аналогично высокие скорости наблюдались в антигоритовых серпентинитах. Равные по величине скорости в некоторых перидотитах объясняются влиянием давления в процессе антигоритизации.

Исходя из вышеуказанных результатов, полученных для метаморфизованных ультрамафитов, можно предполагать, что интенсивность серпентинизации (как это указывалось и в работах других авторов) зависит от интенсивности термодинамических параметров. По-разному серпентинизированные массивы горных пород в земной коре, как это отмечалось для ультрамафитовых пород, могут вызывать скачкообразное изменение скоростей упругих волн, а границы по-разному серпентинизированных массивов могут являться сейсмическими границами, а в некоторых случаях границы наиболее серпентинизированных пород могут образовывать зоны пониженных скоростей на различных глубинах земной коры.

Результаты вышеуказанных исследований могут быть использованы для интерпретации полевых геофизических данных с целью уточнения структуры и вещественного состава глубинных слоев земной коры и верхней мантии, а также познания процессов, протекающих в них.

Институт геологических наук  
АН Армянской ССР  
Ереванский политехнический  
институт им. К. Маркса

Поступила 12 VI 1979.

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՍԵՐՊԵՆՏԻՆԻՏՆԵՐԻ ԱՌԱՋԳԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ,  
ԽՏՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՍԵՂՄԵԼԻՈՒԹՅԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

## Ա մ փ ո փ ո Վ մ

Սերպենտինիտների ֆիզիկա-մեխանիկական հատկությունների ուսումնասիրությունը բարձր ճնշման պայմաններում մեծ հետաքրքրություն է ներկայացնում սերպենտինացման պրոցեսի թերմոդինամիկական պայմանների որոշման համար: Ուսումնասիրությունների արդյունքներից պարզվում է, որ առաջնային ծագում ունեցող խրիզոտիլային տարատեսակը՝ անտիգորիտայինի հետ համեմատած, սժտված է ավելի թույլ ֆիզիկա-մեխանիկական հատկություններով: Միներալոգիական կազմի տեսանկյունով սերպենտինիտային ապարները խմբավորում են ինչպես ըստ առաձգական հատկությունների, այնպես էլ ըստ խտության:

Ստացված արդյունքներից կարելի է եզրակացնել, որ երկրակեղևում որոշ սեյսմիկ հարթություններ կարող են ապարների սերպենտինացման տարբեր աստիճանի արդյունք հանդիսանալ:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Асланян А. Т., Волярович М. П., Левыкин А. И., Вегуни А. Т., Арутюнян А. В., Скворцова Л. С. Исследование скоростей упругих волн в базитах и ультрабазитах Армении при высоких давлениях. Известия АН СССР, Физика Земли, № 2, 1976.
2. Асланян А. Т., Арутюнян А. В. Исследование упругих свойств, плотности и сжимаемости ультрамафитов офиолитовых поясов Армении. Известия АН Арм. ССР, Науки о Земле, № 6, 1979.
3. Баяк Е. И., Волярович М. П., Тархов А. П., Элевич В. Я. Влияние тектонического фактора на петрофизические свойства гипербазитов Воронежского кристаллического массива. Сб. «Тектонофизика и механические свойства горных пород», «Недра», 1971.
4. Баяк Е. И., Волярович М. П., Галдин Н. В. Исследование при высоких давлениях скоростей упругих волн в образцах горных пород рифтовой зоны и островов Индийского океана. Сб. «Исследование по проблеме рифтовых зон мирового океана», М., «Наука», 1972.
5. Волярович М. П., Левыкин А. И., Элевич В. Я. Тектоническая обстановка серпентинизации гипербазитов Воронежского кристаллического массива по данным изучения скоростей упругих волн в образцах пород при давлении до 25 кб. Известия СССР, сер. геол. № 12, 1972.
6. Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kb. Part 1. J. Geophys. Res. 65, № 4, 1960, P. 266, № 7, 1961.
7. Birch F. A study of serpentinite the AMSOC bore hole near Mayagure, Puerto-Rico. Nat. Acad. Sci-Nat. Res. Council Pub., 1158, 1964.
8. Hess H. H., Smith R. J., Dengo G. Antigorit from the vicinity of Caracas, Venezuela, Amer. Mineral., v. 37, № 1—2, 1952.