

УДК 550.9; 534.8

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

Драгомирецкая Е. В., Кузьмина Л. М., Скипа М. И.
(Отделение гидроакустики Морского гидрофизического
института НАНУ, г. Одесса, Украина)

Драгомирецкий А. В.
(Одесский Национальный Университет им. И. И. Мечникова,
г. Одесса, Украина)

Наведено результати досліджень фізико-механічних і акустичних властивостей мейотичних відкладень на різних глибинах залягання. На основі аналізу змін кінематичних та динамічних характеристик пружних хвиль при поширенні в породах доведено перспективність акустичних методів як одного з найбільш інформативних в інженерно-геологічній практиці і у вирішенні задач геоконтроля.

The results of researches of physical-mechanical and acoustic properties of the Meotic deposits at various depths of occurrence are given. On the basis of analysis of changes in kinematic and dynamic characteristics of elastic wave propagation in rocks, acoustic methods are considered as the most informative ones in engineering-geological practice and in geological survey too.

Оценка пространственной изменчивости неоднородных геологических сред, задачи прогнозирования и повышения эффективности инженерно-геологических исследований для обеспечения устойчивости и сохранности территорий и сооружений требуют достоверной и надежной информации о состоянии, составе и свойствах массивов горных пород.

Известно, что прибрежные территории приморских городов подвержены разрушающему воздействию оползневых процессов. Одним из природных факторов, способствующих образованию оползней на приморских склонах г. Одессы в северо-западном Причерноморье являются структурно-тектонические неоднородности в осадочных толщах. Взаимосвязь же природных процессов с инженерно-технической деятельностью человека на склонах способствует изменению состава, строения и физических свойств массивов пород, а значит искажению существующих или созданию новых локальных физических полей.

Выбор и осуществление инженерных мероприятий при освоении городских территорий непосредственно зависят от эффективности выявления и идентификации таких неоднородностей, определяемой возможностями методов и средств получения адекватных представлений о структурной организации сложной геологической среды. Несмотря на наличие специальных защитных сооружений на основной части побережья, находящейся в зоне городской застройки, заметные подвижки склонов происходят. Наиболее разрушительный тип одесских оползней - это так называемые оползни выдавливания, характерной чертой которых является глубокое заложение поверхности основного смещения. Факторам оползневого процесса посвящено много работ, но до сих пор неясны спусковые механизмы возникновения этого типа оползней. Известно лишь [1], что один из факторов, формирующих оползневые движения на Черноморском побережье – литологический.

Основной деформируемый горизонт потенциальных оползней выдавливания в рассматриваемом районе представлен весьма неоднородной толщей мезокайнозойских отложений, состоящей из серо-зеленых глин, супесей и суглинков с прослоями песков и лигнитов, обладающих повышенной пластичностью и пониженными прочностными свойствами [2]. Установлено также [3, 4] существование зон дилатантного разуплотнения в породах мезокайнозойского возраста.

Традиционные методы выявления структурных неоднородностей в прибрежных зонах (бурение скважин, топографо-геодезические и гидрогеологические изыскания) ввиду сложно-

сти проведення досліджень і неоднозначності інтерпретації отриманої інформації сильно поступають неконтактним методам, дозволяючим здійснювати неруйнівний контроль територій. К ним в першу чергу слід віднести не порушуючі структуру і властивості геологічної середі акустичні методи, використання яких до цього часу неадекватно їх потенціальним можливостям.

Метою даної роботи є дослідження властивостей структурно неоднорідних геологічних серед на прикладі гірських порід мезозойського віку, що складають оползневий масив Одеського узбережжя, методами акустичного зондування.

З точки зору фізичних і акустичних властивостей геологічних серед – це складні анізотропні утворення з власною внутрішньою структурою, ускладненою частотною залежністю параметрів хвильового розповсюдження і енергетичних втрат. Методи акустичного зондування є найбільш інформативними в дослідженнях таких неоднорідних серед, оскільки від складу, пористості, тріщинуватості, зернистості, водонасиченості і інших властивостей геологічної середі залежать характеристики акустичних хвильових полів, зокрема, швидкості розповсюдження продольних і поперечних звукових хвиль, коефіцієнти і декременти затухання і др.

Оскільки інформативність, наприклад, швидкості звуку свідчить про те, що виділені по різниці в швидкостях розповсюдження хвиль інтервали в надрах Землі відповідають породам певного складу і віку, а також з тими чи іншими змінами в властивостях порід певного складу або віку.

Як відомо [5, 6], швидкість продольних звукових хвиль в еластичній середі визначається виразом:

$$V_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}G}{\rho}}, \quad (1 \text{ а})$$

а швидкість поперечних (сдвигових) хвиль -

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (1 \text{ б})$$

где E – модуль Юнга;
 G – модуль сдвига;
 k – модуль объемного сжатия;
 ν – коэффициент Пуассона;
 ρ – плотность среды.

Помимо продольных и поперечных волн в структурно неоднородных средах возникают и более сложные типы волн, обусловленные различиями в упругих и иных характеристиках горных пород, их твердых и жидкостных фаз.

Наравне со скоростью распространения звуковых волн представляется весьма информативной характеристикой коэффициент поглощения. Различные по структурному и качественному составу породы характеризуются различным поглощением звука: коэффициент поглощения α в вязкой и теплопроводной среде определяется выражением:

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho V^2} \left[4/3\eta + \zeta + \chi \left(\frac{1}{C_V} - \frac{1}{C_P} \right) \right], \quad (2)$$

где ω – частота звука;
 η – коэффициент сдвиговой вязкости;
 ζ – коэффициент объемной вязкости;
 χ – коэффициент теплопроводности;
 V – скорость звука;
 C_V – теплоемкость при постоянном объеме;
 C_P – теплоемкость при постоянном давлении.

Поглощение упругих волн в горных породах, как правило, твердотельных, растёт с увеличением пористости, трещиноватости пород, с уменьшением глубины их залегания и водонасыщенности, возрастая с увеличением частоты почти по линейному закону [5, 6]. Знание особенностей влияния пористости и водонасыщенности на процессы распространения волновых полей также во многом определяет степень эффективности акустических методов исследования горных пород. Расчеты скоростей и коэффициентов затухания акустических колебаний согласно [7, 8] пока-

зывают, что скорость продольных волн в среде с пустотами, заполненными жидкостью, выше, чем с незаполненными, а суммарный коэффициент поглощения продольных волн в насыщенных жидкостью пористых средах – частотно зависим: на низких частотах он пропорционален квадрату частоты:

$$\alpha_n = \beta_1 B (\omega)^2 / \eta V_{11}, \quad (3 \text{ а})$$

а на высоких – корню квадратному из частоты:

$$\alpha_g = \beta_2 \sqrt{\frac{\omega \eta}{\rho_{ж}}} / V_{11} d, \quad (3 \text{ б})$$

где β_1 , β_2 – безразмерные коэффициенты, зависящие от плотности и пористости;

B – абсолютная проницаемость среды;

V_{11} – скорость продольной волны первого типа;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости;

d – средний размер пор.

При этом скорость звука с ростом пористости уменьшается, а коэффициент поглощения растет.

Сложность задач идентификации состава и свойств горных пород, неоднозначность интерпретации получаемых результатов стимулировали развитие новых подходов к изучению таких сред, новых методов их исследований.

В работе представлены результаты исследования физико-механических и акустических свойств образцов геотехнических отложений, полученных без нарушения структуры в виде монолитов из пространственно близких скважин первого оползневого амфитеатра г. Одесса с глубин 15 м, 16 м, 22 м, 28 м. Образцы с глубин 15 м, 16 м и 28 м состоят из серого заохренного суглинка полутвердой и твердой консистенции, причем на глубине 15 м проявляются тонкие прослойки песка с включением карбонатов. Образец с глубины 22 м – серая с охристыми пятнами глина, тяжелая, твердая, ожелезненная. Полученные в лабораторных условиях влажность, число пластичности, коэффициенты пористости и плотности этих пород приведены на рисунке 1 и рисунке 2.

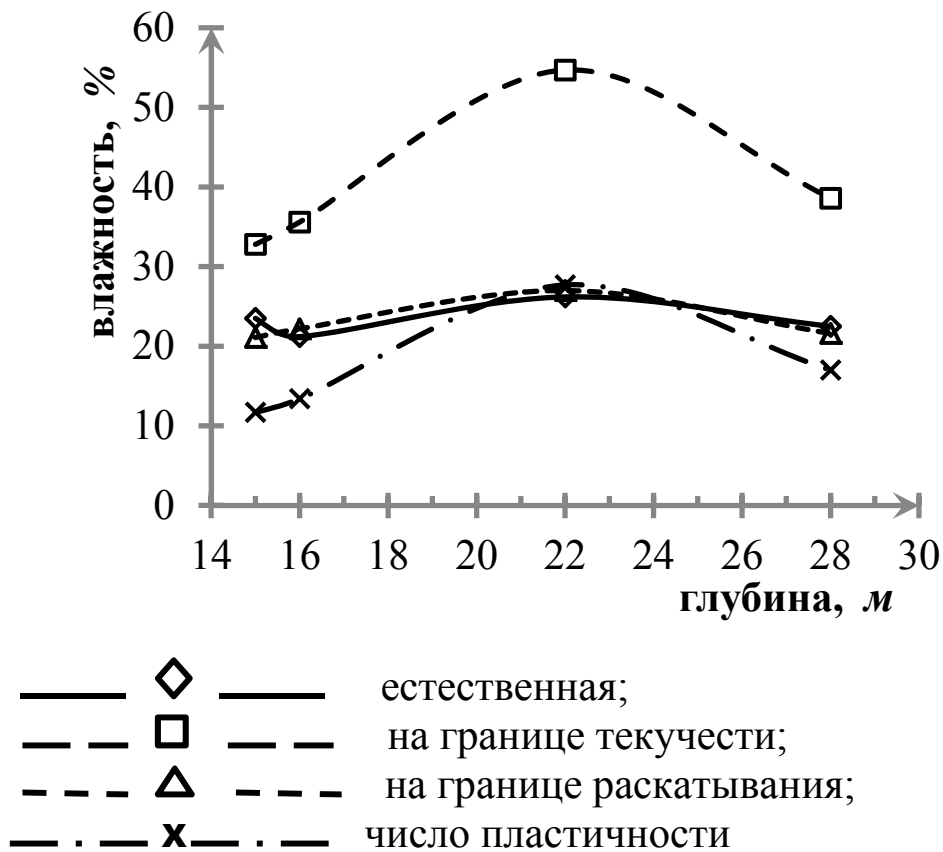


Рис. 1. Показатели влажности грунтов на разных глубинах

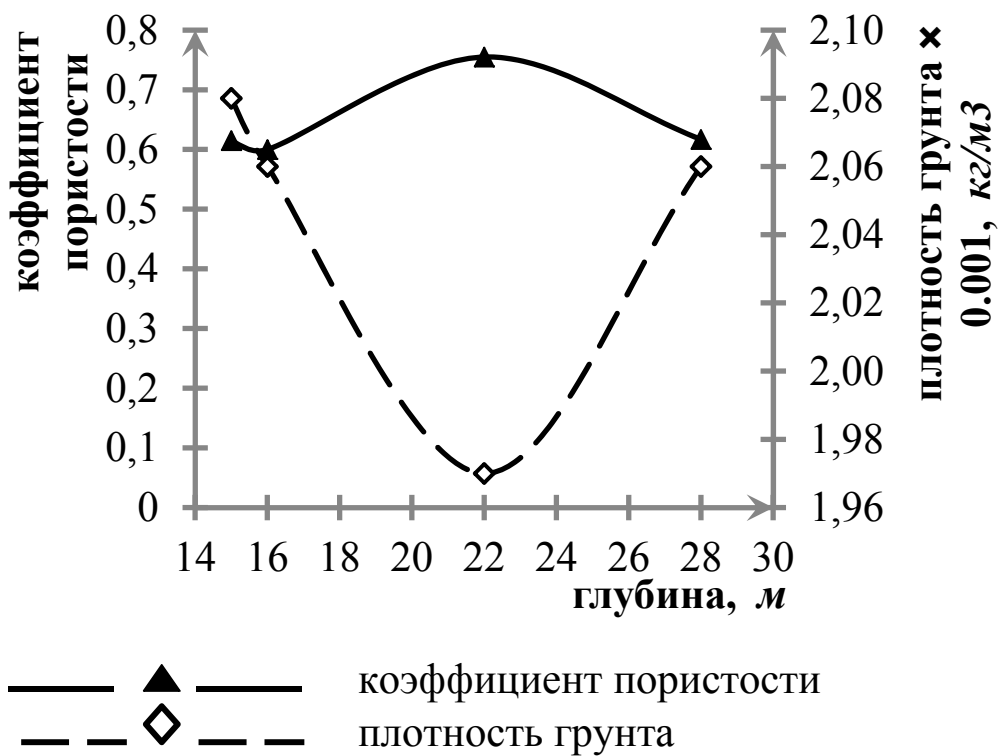


Рис. 2. Пористость и плотность грунтов на разных глубинах

Полученные значения физико-механических параметров приводят к заключению, что в целом породы в этом месте отличаются достаточно близкими значениями естественной влажности и влажности на границе раскатывания. Наибольшее отличие между этими параметрами составляет 2,4 % в первом рассматриваемом слое на глубине 15 м, а наименьшее, 0,8 % - в третьем слое на глубине 22 м.

Акустические свойства меотических отложений исследовались в лабораторных условиях методом прозвучивания отобранных образцов ультразвуковыми импульсами на частотах 25 кГц, 60 кГц, 100 кГц и 150 кГц.

Результаты экспериментов по прозвучиванию образцов на различных зондирующих частотах во взаимно перпендикулярных направлениях представлены на рисунке 3 и рисунке 4 и более детально для каждой породы на рисунках 5 – 7.

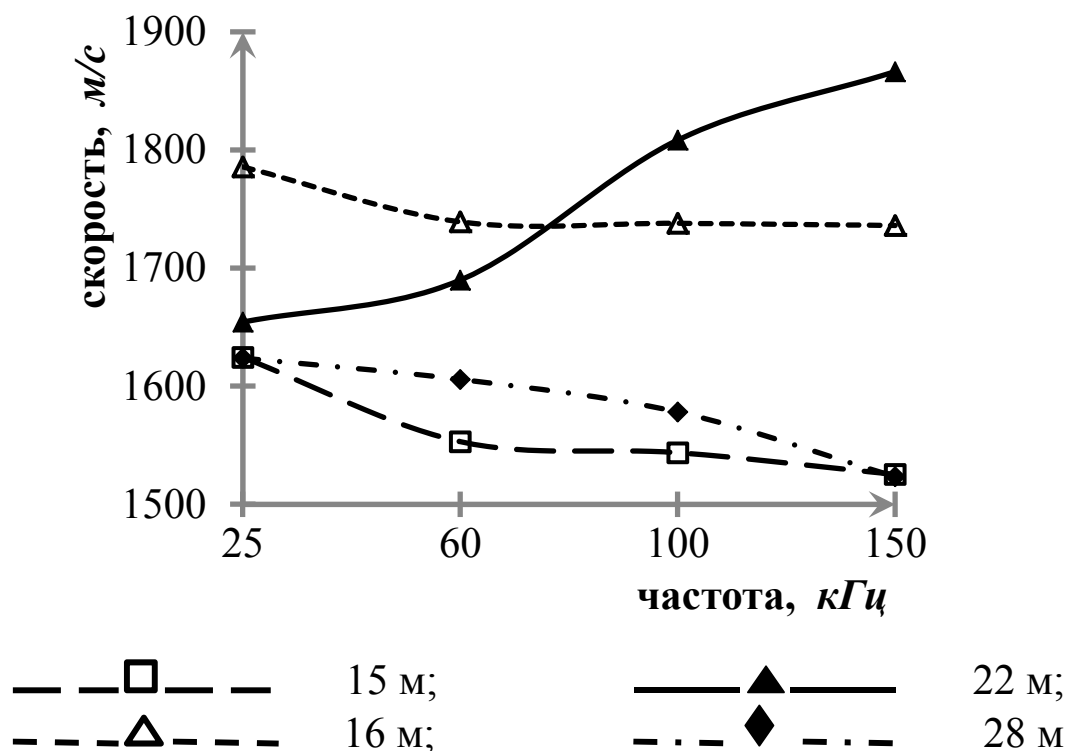


Рис. 3. Скорость звука в меотических отложениях в направлении, нормальном к слоям залегания пород, на разных частотах прозвучивания

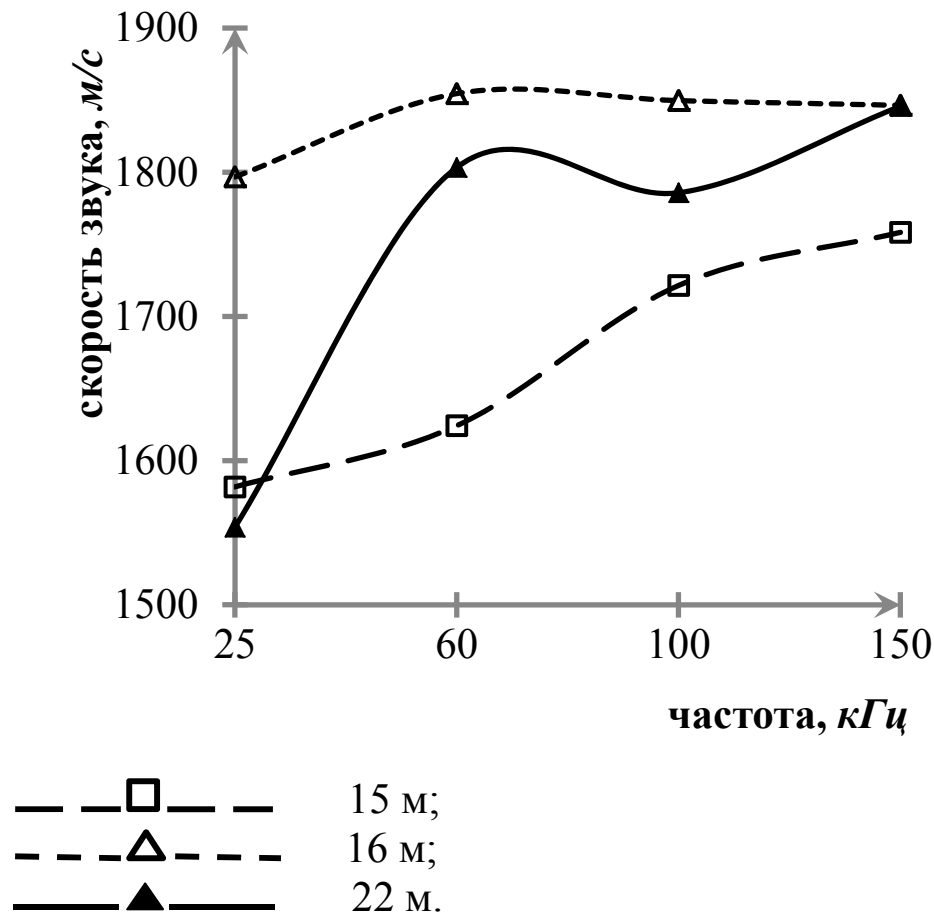


Рис. 4. Скорость звука вдоль слоев залегания меотических отложений на разных частотах

Графики (см. рис. 3 и рис. 4) иллюстрируют существенное различие поведения скоростей распространения акустических волн с разными частотами в зависимости от направления прозвучивания, что свидетельствует об анизотропии скоростей волнового распространения в осадочных породах (по нашим оценкам коэффициент анизотропии лежит в интервале 1,1–1,3) как прямого следствия собственной анизотропии геологических отложений.

Заметим также, что при прозвучивании вдоль залегания слоев пород (см. рис. 4) с увеличением частоты зондирования скорость продольных волн в суглинках на глубинах 15 м и 16 м возрастает в соответствии с (1) и (2), поскольку (см. рис. 2) с увеличением глубины залегания пород плотность грунтов уменьшается, а пористость возрастает.

Скорость распространения акустических волн в направлении перпендикулярном поверхности залегания слоев (см. рис. 3) с увеличением частоты зондирования уменьшается вследствие поглощения в процессах многократного перерасеяния на границах раздела. Причем на низких частотах изменение направления прозвучивания практически не влияет на величину скорости звука, а кривые, описывающие её поведение при увеличении частоты зондирования, в обоих случаях близки к параллельным (см. рис. 5 и рис. 6). Последнее отражает линейную частотную зависимость коэффициента поглощения в твердых телах [5, 6] и приводит к заключению о близости величин внутреннего трения и теплопроводности пород на близких глубинах.

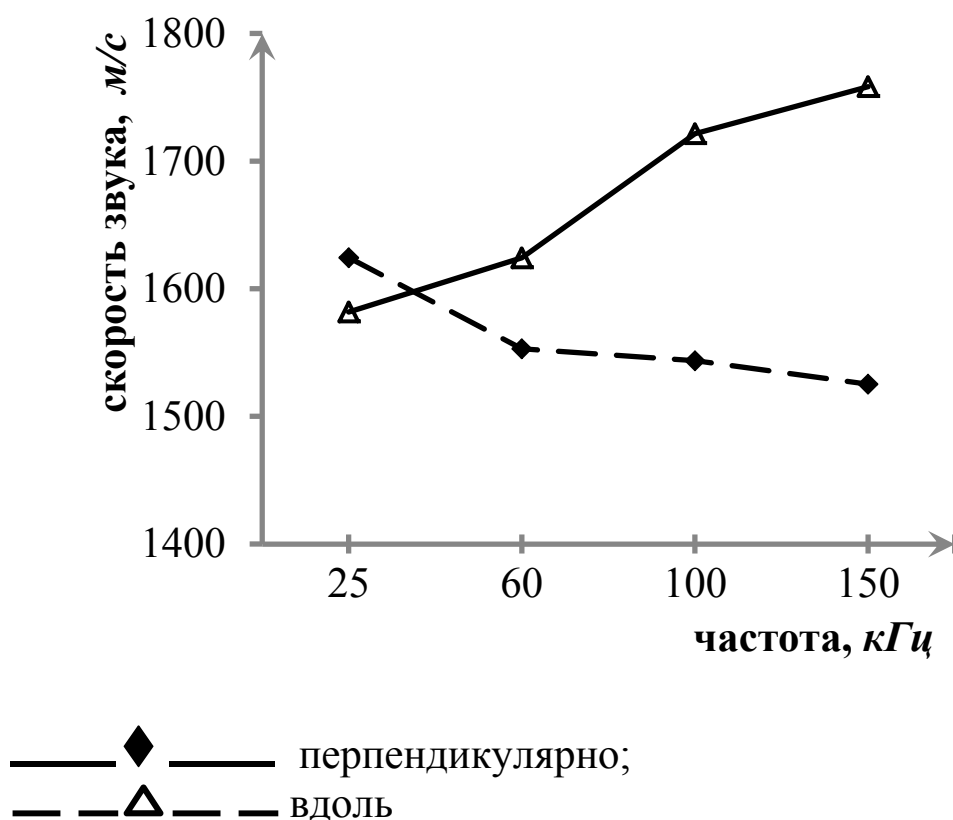


Рис. 5. Скорость звука в породе на глубине 15 м во взаимно перпендикулярных направлениях при разных частотах

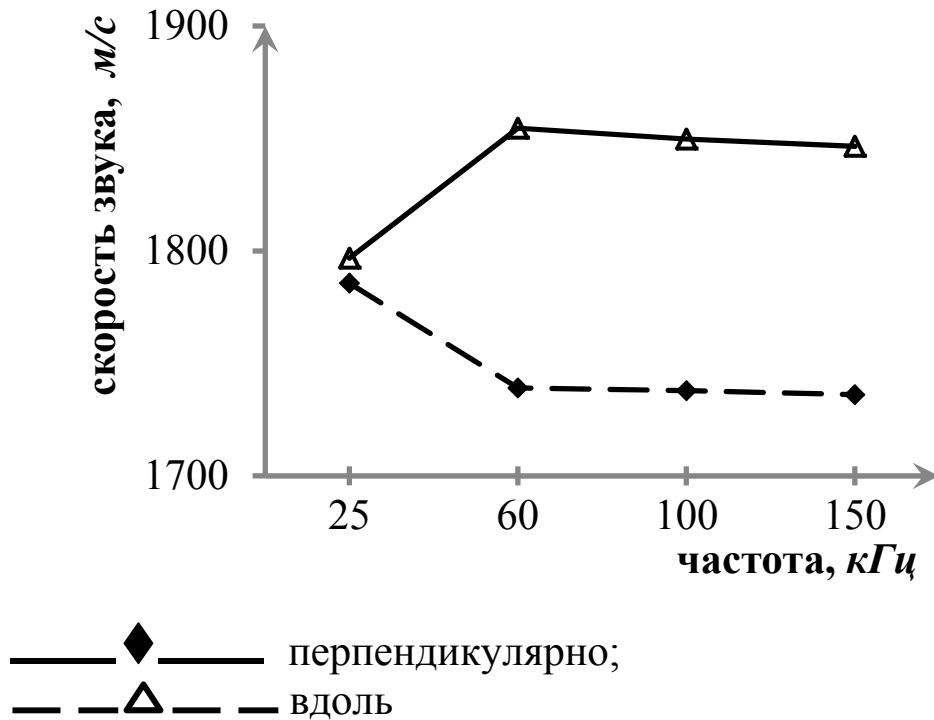


Рис. 6. Скорость звука в породе на глубине 16м во взаимно перпендикулярных направлениях на разных частотах

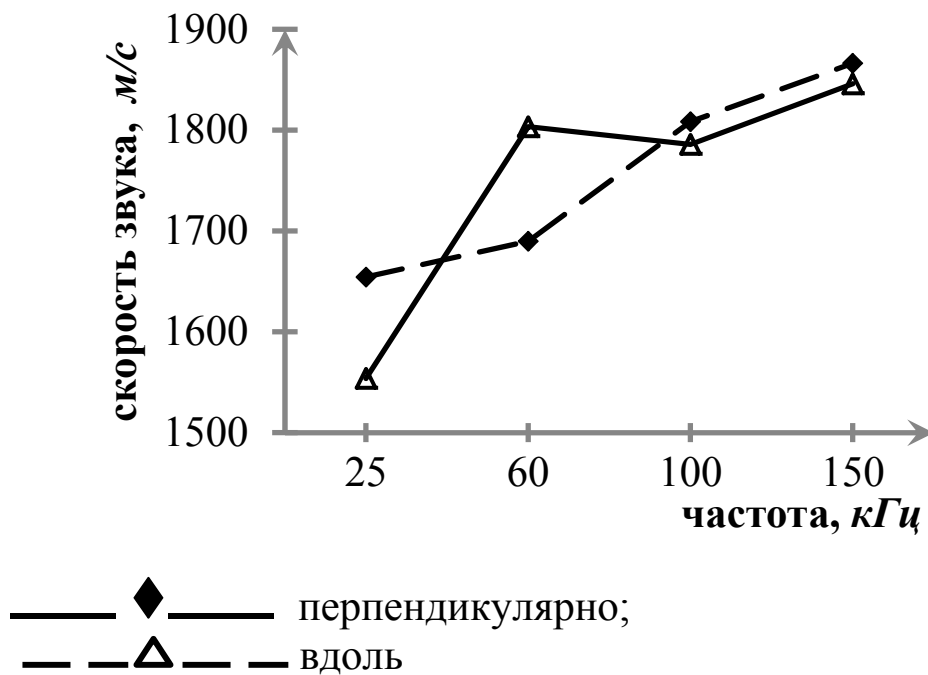


Рис. 7. Скорость звука в глинистой породе на глубине 22 м во взаимно перпендикулярных направлениях на разных частотах

Кардинально отличается от предыдущей частотная зависимость скорости звука в породе на глубине 22 м: независимо от направления прозвучивания скорость распространения продольной волны здесь возрастает с увеличением частоты зондирования (см. рис. 7).

Влияние изменения направления прозвучивания на величину скорости волнового распространения в глине мезотического возраста по нашим оценкам составляет от 6 % на низких частотах и до 12 % – на высоких.

Рассмотрим далее соотношения измеренной скорости распространения акустических волн и влажности рассматриваемых пород на разных глубинах, представленные на рисунках 8 и 9.

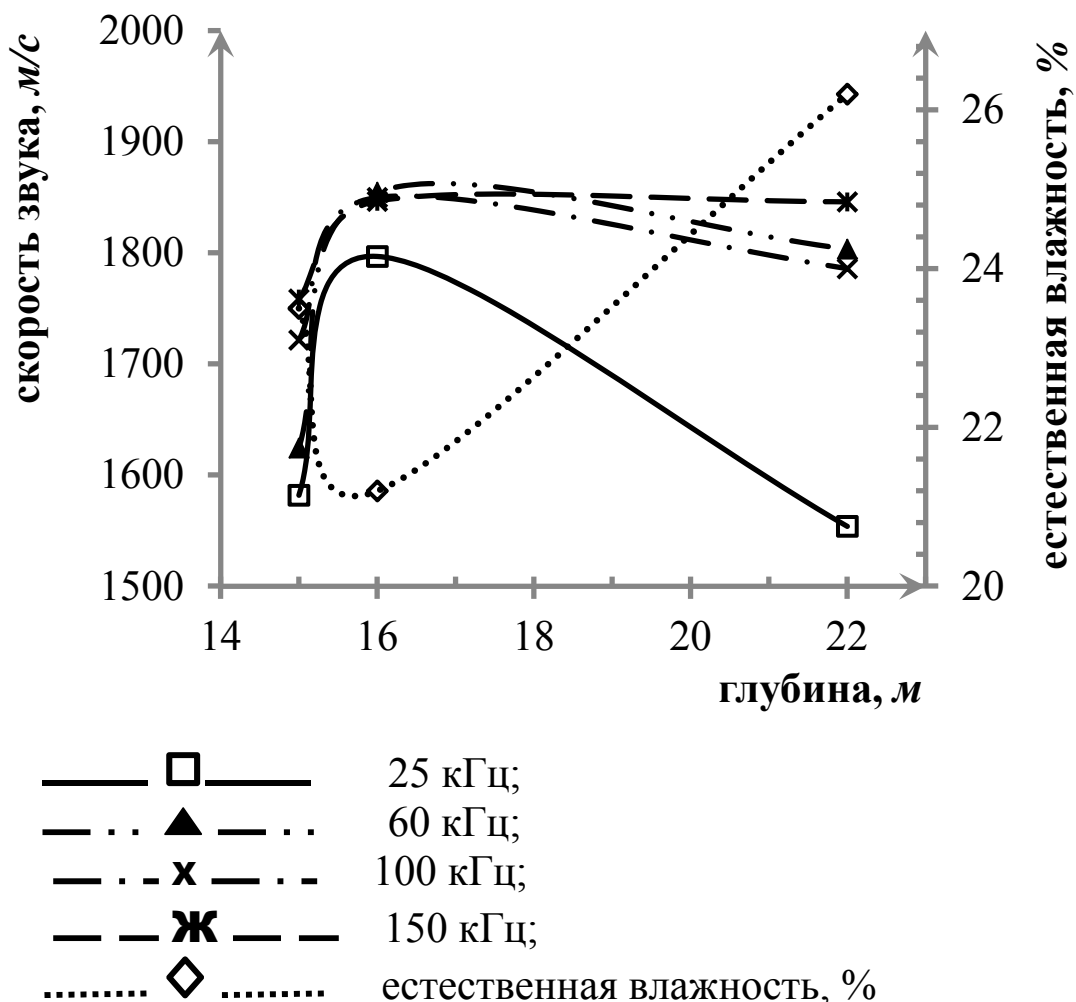


Рис. 8. Скорость распространения акустических волн с разными частотами вдоль залегания слоев пород и естественная влажность на разных глубинах массива

Сопоставление скорости продольных волн и естественной влажности в образцах на разных частотах зондирования позволяет заключить, что в слое мезотических отложений на глубине 16 м расположен минимум естественной влажности и максимум скоростей продольных волн при прозвучивании образцов вдоль залегания слоев пород (см. рис. 8).

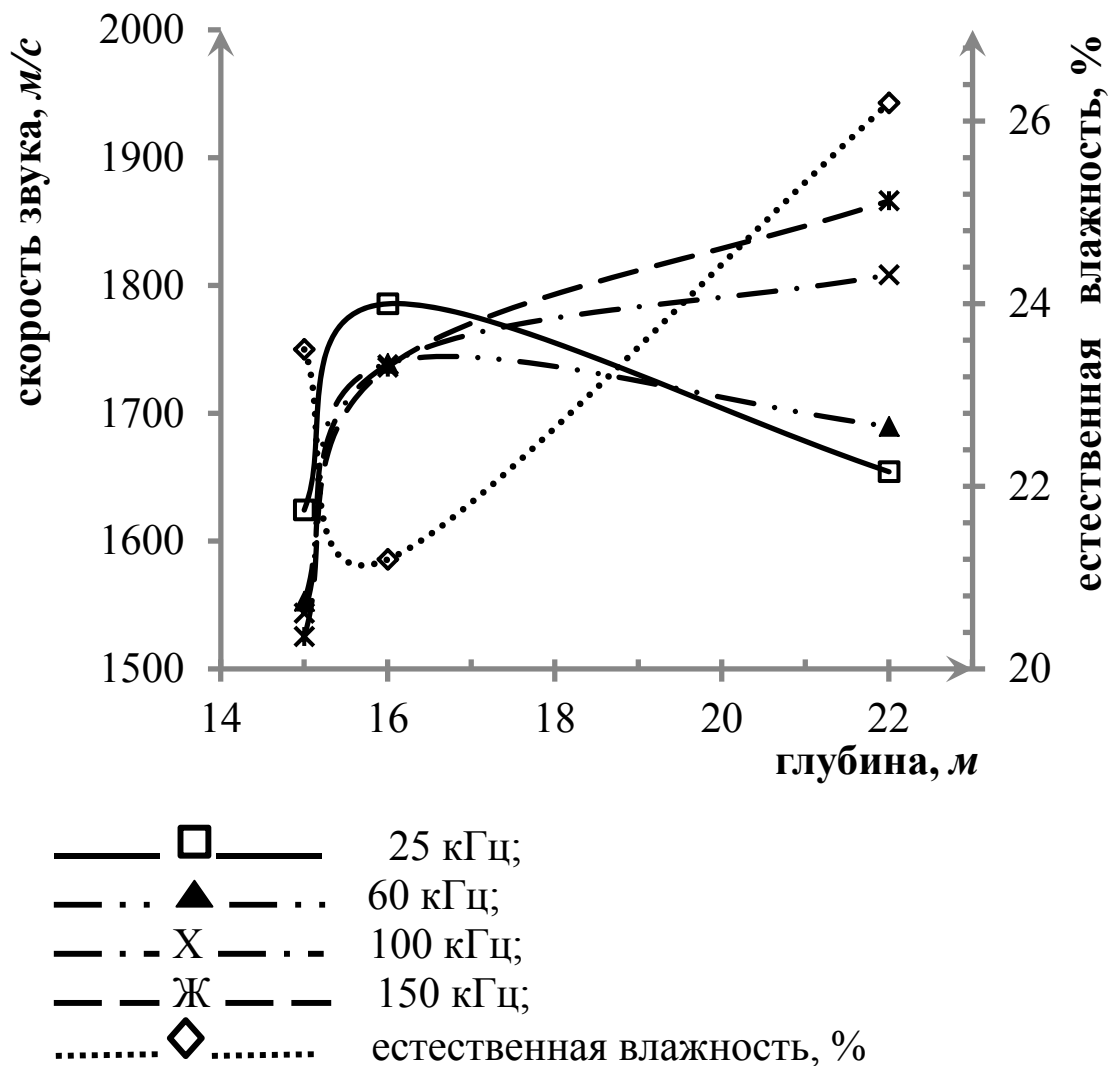


Рис. 9. Скорость распространения акустических волн с разными частотами в направлении, перпендикулярном залеганию слоев пород и естественная влажность на разных глубинах массива

При прозвучивании в перпендикулярном к горизонту залегания слоев направлении (см. рис. 9) на частотах 25 кГц и 60 кГц

соотношение скоростей продольных волн в породах с их естественной влажностью такое же, как в предыдущем случае (см. рис. 8). Наиболее существенное отличие наблюдается в слое мео-тических глин (глубина 22 м), где с увеличением зондирующей частоты до 150 кГц скорость продольных волн возрастает.

Следует отметить также хорошее согласие сопоставления полученных результатов прозвучивания пород и их пористости (см. рис. 2), с выражениями (3) для частотной зависимости скорости звука и коэффициента поглощения в пористых средах. Из приведенных результатов следует на первый взгляд аномальное, при различных соотношениях прочих параметров, поведение скорости звука в слое глины на глубине 22 м. Порода на этой глубине отличается определенными экстремумами своих характеристик (см. рис. 1 и рис. 2): влажностные параметры достигают максимума, плотность – минимума, коэффициент пористости - 0,755 – максимального значения, превышающего значение аналогичного параметра в слое на глубине 16 м на 20,5 %, т.е. в этом слое находится разуплотненная, водонасыщенная, пористая глина.

Известно из инженерно-геологической практики [9], что глины представляют собой высокодисперсные тонкозернистые осадочные породы и часто рассматриваются как трехфазная система минеральный компонент – вода – газовая составляющая [10]. Общая их особенность – наличие в структуре компонент с резко контрастирующими с однородной средой-матрицей упругими свойствами как, например, микро- и макротрещины, межзеренные контакты, поры. Существующие в настоящее время физические и реологические модели микронеоднородных сред показывают [11, 12], что даже наличие очень малых концентраций высокосжимаемых дефектов приводит к многократному возрастанию величин нелинейных акустических параметров при практически неизменной величине линейных упругих модулей.

В нашем случае глинистая порода на глубине 22 м представляет собой гранулированную среду с высокой влажностью и пористостью, и ее механические свойства и характер распространения акустического сигнала определяются главным образом контактами между гранулами. Концентрация энергии упругой

деформации в области контактов приводит к аномально высоким значениям нелинейных акустических характеристик, т.н. структурно обусловленной нелинейности, определяющей сложный характер распространения акустического волнового поля [13]. Поэтому результаты прозвучивания образцов глинистой породы на разных частотах мы рассматриваем как свидетельство нелинейно-акустических проявлений структурных неоднородностей, в том числе изменения качественного характера нелинейности – выраженной частотной зависимости.

В целом, полученные результаты показали результативность акустических методов в задачах изучения внутренней структуры и свойств геологических сред, определения устойчивых информативных признаков, характеризующих горные породы, их напряженно-деформированное состояние.

Поскольку причиной сильного возрастания акустической нелинейности в неоднородных геологических средах в большинстве случаев является наличие в их структуре компонент с резко контрастными линейными упругими свойствами, что проявляется в аномальном поведении измеряемых акустических характеристик, в частности, скорости звука, то такая структурная зависимость нелинейных свойств может быть использована в акустической диагностике. По измеренной в результате прозвучивания скорости звука можно судить о нелинейных параметрах, изменения которых интерпретировать как проявления единого в основе структурного механизма возрастания нелинейности, из чего следуют выводы о составе, состоянии и свойствах горных пород, позволяющие решать задачи оперативного геоконтроля, в том числе при прогнозах опасных геодинамических явлений.

Акустические параметры обладают высокой чувствительностью к изменениям, происходящим в грунтах различного состава и напряженно-деформированного состояния, следовательно, возможно использование кинематических и динамических параметров упругих волн для оценки устойчивости склонов и прогнозирования активизации оползневых явлений, установления характерных эффектов, являющихся ранними предвестниками разрушения.

Представленные результаты свидетельствуют также о возможности идентификации акустических и структурных предвестников разрушений в задачах мониторинга состояния горных пород, в т.ч. метастабильных состояний в геодинамически активных областях, акустическими методами с расширенными диагностическими возможностями, обеспечивающими получение качественно новой информации о структурных превращениях в горных породах.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Оползни северо-западного побережья Черного моря, их изучение и прогноз / [Зелинский И. П., Корженевский Б. А., Черкез Е. А. и др.]. — К. : Наукова думка, 1993. — 227 с.
2. Черкез Е. А. Оползни северо-западного побережья Черного моря (моделирование, прогноз устойчивости склонов и оценка эффективности противооползневых мероприятий): автореф. дис. на соискание научной степени доктора геол.-мин. наук: спец. 04.00.07 “Инженерная геология” / Е. А. Черкез. — Одесса, 1994. — 36 с.
3. Черкез Є. А. Гідрогеомеханічні особливості формування зсувів випору північно-західного узбережжя Чорного моря / Є. А. Черкез, О. В. Драгомирецька, Г. М. Біч // Вісник Одеського національного університету. — 2003. — Т. 8. — С. 180—188. — (Серія “Географічні та геологічні науки”; вип. 5).
4. Бич Г. М. О взаимосвязи дилатансии и сопротивления сдвигу грунта / Г. М. Бич, А. И. Боскин // Прогрессивные технологии, материалы, конструкции и методы исследований для строительства в прибрежной зоне моря. — М. : В/О “Морте-хинформреклама”. — 1991. — С. 48—50.
5. Бреховских Л. М. Акустика неоднородных сред / Л. М. Бреховских, О. А. Годин. — М. : Наука, 2007. — 834 с.
6. Ландау Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М. : Наука, 1965. — 203 с.
7. Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated Porous Solid / Biot M. A. // J. Acoust. Soc. Amer. — 1956. — V. 28. — P. 168—181.

8. Механика пористых насыщенных сред / [Николаевский В. Н., Басниев К. С., Горбунов А. Т., Зотов Г. А.]. — М. : Недра, 1970. — 335 с.
9. Гольдберг В. М. Проницаемость и фильтрация в глинах / В. М. Гольдберг, Н. П. Скворцов. — М. : Недра, 1986. — 160 с.
10. Бондарик Г. К. Текстура и деформация глинистых пород / Г. К. Бондарик, А. М. Царева, В. В. Пономарева. — М. : Недра, 1975. — 135 с.
11. Зайцев В. Ю. Нелинейные акустические явления в структурно-неоднородных средах. Эксперименты и модели / В. Ю. Зайцев, С. Н. Гурбатов, Н. В. Прончатов-Рубцов. — Н. Новгород : ИПФ РАН, 2009. — 354 с.
12. Назаров В. Е. Нелинейные волновые процессы в упругих микронеоднородных средах / В. Е. Назаров, А. В. Радостин. — Н. Новгород, 2007. — 265 с.
13. Беляева И. Ю. Нелинейные акустоупругие свойства зернистых сред / И. Ю. Беляева., В. Ю. Зайцев, Л. А. Островский // Акустический журнал. — 1993. — Т. 39. — № 1. — С. 25—32.