

УДК 550.9; 534.8

Е. В. Драгомирецкая, научный сотрудник

Л. М. Кузьмина, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

М. И. Скипа, канд. техн. наук, директор Отделения

Отделение гидроакустики Морского гидрофизического института НАН Украины,

ул. Преображенская, 3, Одесса, 65082, Украина

info@ogamgi.org.ua

ДИНАМИЧЕСКИЕ И РАВНОВЕСНЫЕ СВОЙСТВА НЕОДНОРОДНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

Приведены результаты исследований физико-механических и акустических свойств образцов мезотических отложений, отобранных с различных глубин залегания. На основе анализа изменений кинематических и динамических характеристик упругих волн при распространении в породах доказана перспективность акустических методов как одних из наиболее информативных в инженерно-геологической практике и решении задач геоконтроля.

Ключевые слова: структурно неоднородные среды, мезотические отложения, акустическое зондирование

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что прибрежные территории г. Одессы 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.

При освоении городской территории происходит выявление и идентификация неоднородностей, что, в свою очередь, оказывает влияние на выбор и осуществление инженерных мероприятий, определяемых 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 и до сих пор исследователи изучают различные аспекты возникновения этого типа оползней. Известно [4], что природные факторы, формирующие оползневые смещения на Черноморском побережье, –

литологические, структурные, абразионные гидрологические. В связи с этим, задачи мониторинга состояния оползневых склонов приобретают всё большую актуальность.

Основной деформируемый горизонт оползней выдавливания в рассматриваемом районе представлен весьма неоднородной толщей меотических отложений, состоящей из серо-зеленых глин, супесей и суглинков с прослоями песков и лигнитов, обладающих повышенной пластичностью и пониженными прочностными свойствами [6]. Установлено также [1, 7] существование зон дилатантного разуплотнения в породах меотического возраста.

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.

Традиционные методы выявления структурных неоднородностей в прибрежных зонах (бурение скважин, топографо-геодезические и гидрогеологические изыскания) ввиду сложности проведения исследований и неоднозначности интерпретации получаемой информации сильно уступают неконтактным методам, позволяющим осуществлять неразрушающий контроль территорий. К ним, в первую очередь, следует отнести не нарушающие структуру и свойства геологической среды акустические методы, использование которых до настоящего времени неадекватно их потенциальным возможностям.

В связи с несомненной актуальностью указанных теоретических и прикладных задач, предмет исследований настоящей работы – структурно-неоднородные среды, а в качестве объекта исследований выбраны образцы меотических отложений, полученные из монолитов, отобранных на различных глубинах в массиве пород составляющих основной деформируемый горизонт оползней выдавливания.

Целью данной работы является исследование свойств структурно неоднородных геологических сред на примере пород основного деформируемого горизонта оползней выдавливания Одесского побережья, методами акустического зондирования.

С точки зрения физических и акустических свойств геологические среды – это сложные анизотропные образования с собственной внутренней структурой, усложненной частотной зависимостью параметров волнового распространения и энергетических потерь. Методы акустического зондирования представляются наиболее информативными в исследованиях таких неоднородных сред, поскольку от состава, пористости, трещиноватости, зернистости, водонасыщенности и прочих свойств геологической среды зависят характеристики акустических волновых полей, в частности, скорости распространения продольных и поперечных звуковых волн, коэффициенты и декременты затухания и др.

О степени информативности, например, скорости звука свидетельствует то обстоятельство, что выделенные по различию в скоростях распространения волн интервалы в недрах Земли отождествляют с породами того или иного состава и возраста, а также с теми или иными изменениями в свойствах пород одного состава или возраста.

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

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как известно [5], скорость продольных звуковых волн в упругой среде определяется выражением:

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{\kappa + \frac{4}{3}G}{\rho}}, \quad (1a)$$

а скорость поперечных (сдвиговых) волн:

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

где E – модуль Юнга; G – модуль сдвига; κ – 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:

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

где ω – частота звука; η – коэффициент сдвиговой вязкости; ζ – коэффициент объемной вязкости; χ – коэффициент теплопроводности; c – скорость звука; C_V , C_P – теплоемкости при постоянном объеме и давлении соответственно.

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]. Знание особенностей влияния пористости и водонасыщенности на процессы распространения волновых полей также во мно-

гом определяет степень эффективности акустических методов исследования горных пород. Расчеты скоростей и коэффициентов затухания акустических колебаний показывают, 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:

$$\alpha_n = \beta_1 B (\omega)^2 / \eta c_{11}, \quad (3a)$$

а на высоких – корню квадратному из частоты:

$$\alpha_n = \frac{\beta_2}{c_{11} d} \sqrt{\frac{\omega \eta}{\rho_{ж}}} \quad (3б)$$

где β_1, β_2 – безразмерные коэффициенты, зависящие от плотности и пористости; B – абсолютная проницаемость среды; c_{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.

В работе исследованы физико-механические и акустические свойства образцов мейотических 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, в образце с глубины 15 м присутствуют 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 показали, что в целом породы в этом месте характеризуются достаточно близкими значениями естественной влажности и влажности на границе раскатывания. Наибольшее отличие между этими параметрами составляет 2,4% в первом рассматриваемом образце, полученном из монолита, отобранного на глубине 15 м, а наименьшее, 0,8% – в третьем образце с глубины 22 м соответственно.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Результаты экспериментов по прозвучиванию образцов на различных зондирующих частотах во взаимно перпендикулярных направлениях представлены на рис. 1 и рис. 2, и более детально для каждой породы – на рис. 3 – 5.

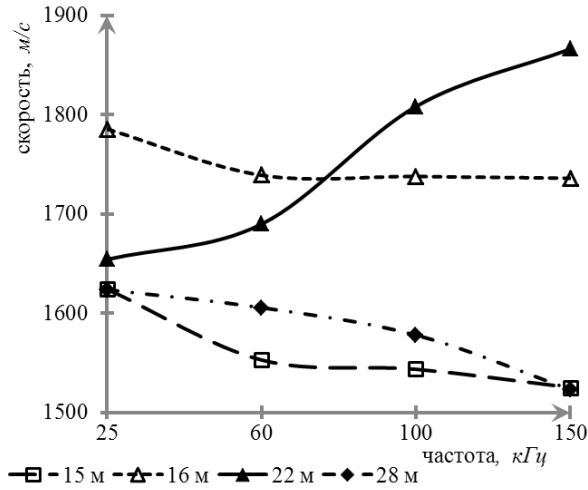


Рис. 1. Скорость звука в направлении, нормальном к слоям залегания пород, в образцах, отобранных с различных глубин, на разных частотах прозвучивания

Графики (см. рис. 1 и рис. 2) 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.

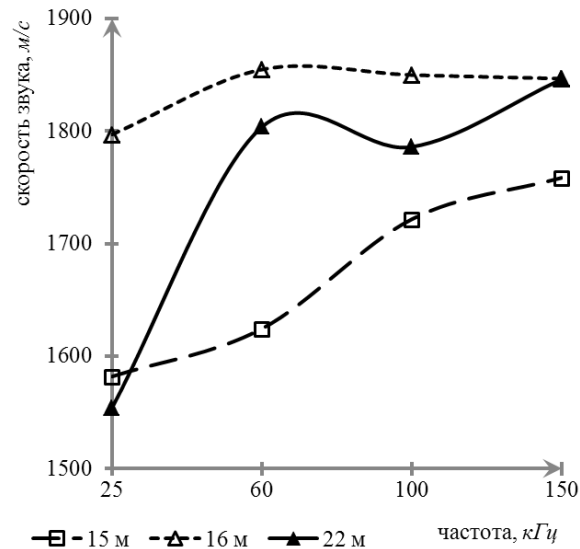


Рис. 2. Скорость звука вдоль слоев залегания в образцах геотических отложений

Заметим также, что при прозвучивании образцов вдоль залегания слоев пород (см. рис. 2) с увеличением частоты зондирования скорость продольных волн в образцах суглинков на глубинах 15 м и 16 м возрастает в соответствии с (1а), (1б) и (2). При этом, согласно данным лабораторных анализов, плотность в образцах суглинков с увеличением глубины уменьшается незначительно – на 0,96%, а образца глины – на 5,3% по сравнению с плотностью образца суглинка с глубины 15 м.

Скорость распространения акустических волн в направлении перпендикулярном поверхности залегания слоев (см. рис. 1) 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. 3 и рис. 4). Последнее отражает линейную частотную зависимость коэффициента поглощения в твердых телах [5] и приводит к заключению о близости величин внутреннего трения и теплопроводности пород на близких глубинах.

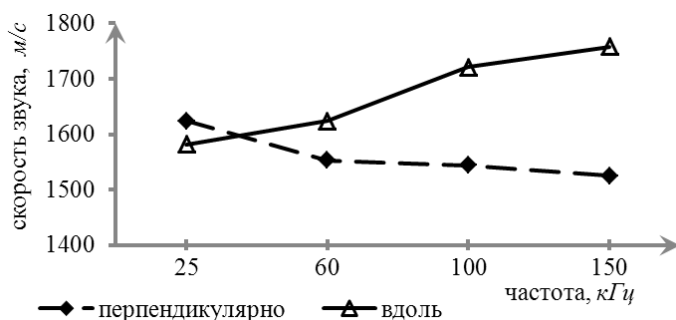


Рис. 3. Скорость звука в образце суглинка, отобранного на глубине 15 м, во взаимно перпендикулярных направлениях

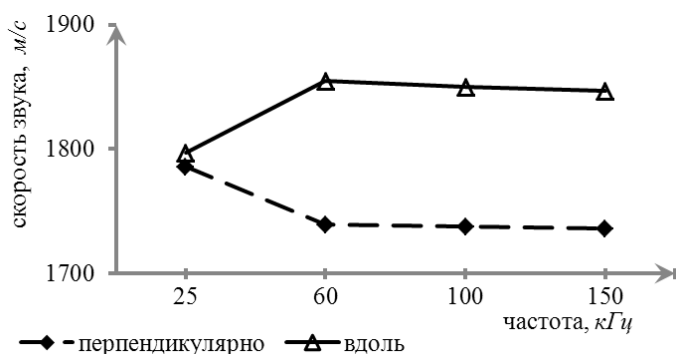


Рис. 4. Скорость звука в образце суглинка, отобранного на глубине 16 м, во взаимно перпендикулярных направлениях

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. 5).

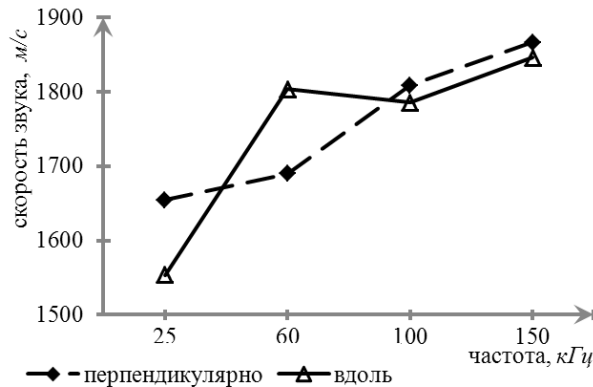


Рис. 5. Скорость звука в образце глины, отобранного на глубине 22 м, во взаимно перпендикулярных направлениях на разных частотах

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 рис.6 и рис. 7.

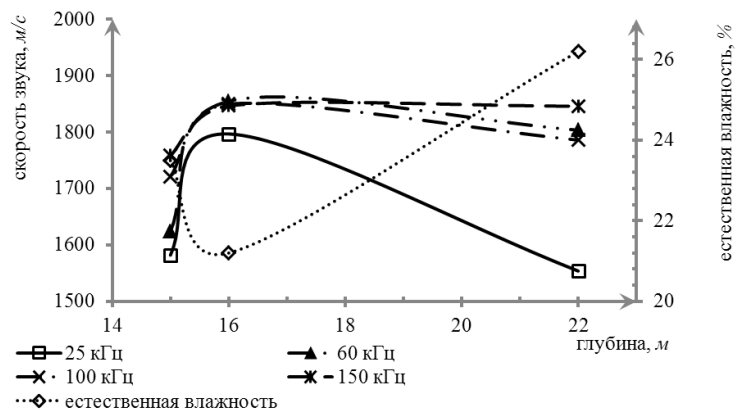


Рис. 6. Скорость распространения акустических волн с разными частотами вдоль залегания слоев пород и естественная влажность в образцах пород, отобранных на разных глубинах массива

Сопоставление скорости продольных волн и естественной влажности в образцах на разных частотах зондирования позволяет заключить, что в слое меоитических отложений на глубине 16 м расположен минимум естественной влажности и максимум скоростей продольных волн при прозвучивании образцов вдоль залегания слоев пород (см. рис. 6).

При прозвучивании образцов в направлении перпендикулярном к горизонту залегания слоев (см. рис. 7) 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. 6).

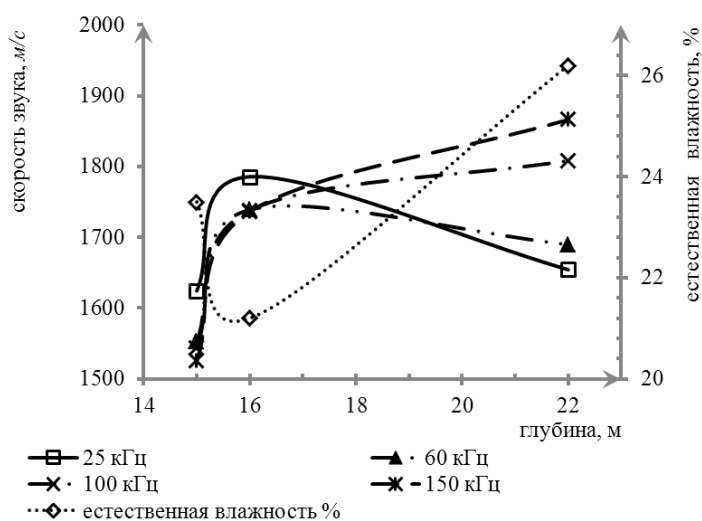


Рис. 7. Скорость распространения акустических волн с разными частотами в направлении, перпендикулярном залеганию слоев пород и естественная влажность в образцах пород, отобранных на разных глубинах массива.

Наиболее существенное отличие наблюдается в слое меоитических глин (глибина 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 с выражениями (3а) и (3б) для частотной зависимости скорости звука и коэффициента поглощения в пористых средах. Из приведенных результатов следует на первый взгляд anomальное, при различных соотношениях прочих параметров, поведение скорости звука в слое глины на глубине 22 м. Порода на этой глубине отличается определенными экстремумами своих характеристик: 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, что глины представляют собой высокодисперсные тонкозернистые осадочные породы и часто рассматриваются как трехфазная система минеральный компонент – вода – газовая составляющая [2]. 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 микронероводных сред показывают [3], 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 [3]. 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.

ВЫВОДЫ

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

Высокая чувствительность акустических параметров к изменениям, происходящим в грунтах различного состава и напряженно-деформированного состояния определяет возможности использования кинематических и динамических параметров упругих волн для прогнозирования активизации оползневых явлений.

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 с дальнейшей интерпретацией их изменений как проявления единого структурного механизма возрастания нелинейности, из чего

следуют выводы о составе, состоянии и свойствах горных пород, позволяющие производить оперативный геоконтроль, в том числе при прогнозах опасных геодинамических явлений.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бич Г. М. О взаимосвязи дилатансии и сопротивления сдвигу грунта [Текст] / Г. М. Бич, А. И. Боскин // Прогрессивные технологии, материалы, конструкции и методы исследований для строительства в прибрежной зоне моря. – М.: В/О “Мортехинформреклама”. – 1991. – С. 48-50.
2. Бондарик Г. К. Текстура и деформация глинистых пород [Текст] / Г. К. Бондарик, А. М. Царева, В. В. Пonomарева. – М.: Недра, 1975. – 135с.
3. Зайцев В. Ю. Нелинейные акустические явления в структурно-неоднородных средах. Эксперименты и модели [Текст] / В. Ю. Зайцев, С. Н. Гурбатов, Н. В. Прончатов-Рубцов. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 2009. – 354 с.
4. Зелинский И. П., Оползни северо-западного побережья Черного моря, их изучение и прогноз [Текст] / И. П. Зелинский, Б. А. Корженевский, Е. А. Черкез [и др]. – К.: Наукова думка, 1993. – 227 с.
5. Ландау Л. Д. Теория упругости [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1965. – 203 с.
6. Черкез Е. А. Оползни северо-западного побережья Черного моря (моделирование, прогноз устойчивости склонов и оценка эффективности противооползневых мероприятий): автореф. дис. ... доктора геол.-мин. наук: 04.00.07 [Текст] / Е. А. Черкез. – Одесса, 1994. – 36 с.
7. Черкез Е.А. Гідрогео механічні особливості формування зсувів випору північно-західного узбережжя Чорного моря [Текст] / Е. 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).

REFERENCES

1. Bich, G.M., Boskin, A.I. (1991), “On the interconnection dilatancy and shear resistance of the soil”, [“O vzaimosvyazi dilatansii i soprotivleniya sdvigu grunta”], *Innovative technologies, materials, designs and research methods for construction in the coastal area*, pp. 48-50.
2. Bondarik, G.K., Tsareva, A.M., Ponomareva, V.V. (1975), *Texture and deformation of clay rock*, [Текстура і деформати́я глини́стих порід], Nedra, Moscow, 135 p.
3. Zaytsev, V.Yu., Gurbatov, S.N., Pronchatov-Rubtsov, N.V., (2009), *Nonlinear acoustic phenomena in structurally inhomogeneous media. Experiments and models*, [Нелинейные акустические явления в структурно-неоднородных средах. Эксперименты и модели], IPF RAN, N. Novgorod, 354 p.
4. Zelinskiy, I.P., Korzhenevskiy, B.A., Cherkez, E.A. [et al.], (1993), *Landslides of Black Sea north-western coast, their study and prognosis*, [Оползни северо-западного побережья Черного моря, их изучение и прогноз], Naukova dumka, Kiev, 227 p.
5. Landau, L.D., Lifshits, E.M., (1965), *Elasticity theory*, [Теория упругости], Nauka, Moscow, 203 p.
6. Cherkez, E.A. (1994), *Landslides northwestern coast of the Black Sea (modeling, slope stability prediction and evaluation of landslide events): Author's thesis*, [Оползни северо-западного побережья Черного моря (моделирование, прогноз устойчивости склонов и оценка эффективности противооползневых мероприятий): автореф. дис. ... doct. geol.-min. nauk], Odessa, 36 p.
7. Cherkez, E.A., Dragomyretska, O.V., Bich, G.M. (2003), “Hydrogeomechanical features of squeezing landslides of Black Sea north-western coast”, [“Гідрогео механічні особливості формування зсувів випору північно-західного узбережжя Чорного моря”], *Bulletin of the Odessa National University*, Vol. 8, No 5, pp. 180-188.

Поступила 15.07.2014

О.В. Драгомирецька, науковий співробітник
Л.М. Кузьміна, канд. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник
М.І. Скіпа, канд. техн. наук, директор Відділення
Відділення гідроакустики Морського гідрофізичного інституту НАН України,
вул. Преображенська, 3, Одеса, 65082, Україна
info@ogamgi.org.ua

ДИНАМІЧНІ ТА РІВНОВАЖНІ ВЛАСТИВОСТІ НЕОДНОРІДНИХ ГЕОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

Резюме

Наведено результати досліджень фізико-механічних і акустичних властивостей зразків меотичних відкладень добутих з різних глибин 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.

Ключові слова: структурно неоднорідні середовища, меотичні відкладення, акустичне зондування

O.V. Dragomyretska, scientist
L.M. Kuz'mina, candidate of physico-mathematical sciences, senior researcher,
M.I. Skipa, candidate of technical sciences, the Branch principal
Hydroacoustic Branch of the Mariny Hydrophysical Institute, National Academy of
Sciences of Ukraine, 3 Preobrazenska str. 65082, Odessa, Ukraine
info@ogamgi.org.ua

DYNAMIC AND EQUILIBRIUM PROPERTIES OF THE INHOMOGENEOUS GEOLOGICAL ENVIRONMENT

Abstract

Purpose. The goal of this work is to study the properties of structurally heterogeneous geological mediums by the example of Meotian sediments which form landslide areas of the Odessa coast.

Methodology. Acoustic properties of Meotian sediments were investigated in laboratory conditions by sounding of selected samples by ultrasonic pulses at different frequencies.

Finding. The results of researches of physical-mechanical and acoustic properties of the samples of Meotian sediments at various depths of occurrence are given.

A good co-ordination between the results of sounding rocks and their physical and mechanical properties with the results of theoretical studies of the frequency dependence of the sound velocity and absorption coefficient in heterogeneous media was obtained.

The revealed anomalies have indicated that structural nonlinearities determine a character of propagation of the acoustic field in such media.

Results. 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.

Keywords: structurally inhomogeneous media, Meotian deposits, acoustic sounding