

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ МАССИВОВ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ДИСПЕРСИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

ESTIMATION OF STABILITY OF THE ROCK MASSIFS BY THE METHOD OF ANALYZING THE DISPERSION OF SURFACE WAVES

ДОРОХИН К.А.

Аспирант Института комплексного освоения недр РАН, научный сотрудник ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург, d.k_a@mail.ru

DOROKHIN K.A.

Graduate student, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON), JSC Research, Design and Research Institute «Lenmetrogioprotrans», Saint Petersburg, d.k_a@mail.ru

Ключевые слова:

сейсмоакустические методы; оползневые деформации; горные выработки неглубокого подземного заложения; многоканальный анализ поверхностных волн; дисперсионные изображения.

Keywords:

seismoacoustic methods; landslide deformation; mining shallow underground foundations; multichannel analysis of surface waves; dispersion images.

Аннотация

В статье обосновывается значимость оценки устойчивости горных массивов сейсмоакустическими методами для раннего прогноза возникновения возможных аварийных ситуаций. Показана эффективность применения для мониторинга зоны, которая вмещает поверхность потенциального скольжения, для оценки устойчивости оползневых массивов. В работе упоминается, что для расчета динамических физико-механических характеристик грунтов необходимо наличие данных о скоростях распространения продольных и поперечных волн. К сожалению, в реальных условиях не всегда удается выделить на сейсмограммах волны поперечного типа, для решения этой проблемы необходимо применять дополнительные методики возбуждения волн поперечного типа и их приема, что увеличивает время выполнения работ. При проведении исследований через высокоскоростную обделку горной выработки возбуждение поперечных волн затруднительно. В то же время на сейсмограммах всегда присутствуют интенсивные, занимающие до 70% волнового поля, поверхностные волны. В работе приведены результаты дисперсионного анализа волновых полей, полученные при математическом моделировании оползневых процессов, результаты экспериментальных наблюдений как за оползневыми склонами, так и за вмещающими грунтами через высокоскоростную обделку горной выработки.

Abstract

This paper explains the importance of assessing the sustainability of mountain ranges acoustic methods for early prediction of occurrence of possible emergencies. The efficiency of the application for monitoring a zone, which accommodates the surface of potential slip, to assess the stability of the landslide slopes. In this paper it's mentioned that the calculating the dynamic physical and mechanical characteristics of soils, requires data on velocities of propagation of longitudinal and transverse waves. Unfortunately, in real conditions it's not always possible to allocate on seismograms of waves of transverse type, though for solution of this problem it is necessary to apply additional methods of excitation of transverse waves and their reception, which increases the time of execution. In conducting research through the high speed tunnel excavation excitation of transverse waves is difficult. At the same time on the seismograms there are always intense surface waves, offering up to 70% of the wave field. The paper presents the results of variance analysis of wave fields obtained by the mathematical modelling of the landslide processes, the results of experimental observations, both for the landslide slopes and the surrounding soil via the high-speed lining mining.

Введение

Значительная часть объектов транспортной и инженерной инфраструктуры неглубокого подземного заложения находится в условиях влияния процессов как экзогенного, так и эндогенного характера. Для проектирующих, строительных и эксплуатирующих организаций большое значение приобретают вопросы применения надежных и оперативных способов прогноза возможных аварийных ситуаций. Аварии в горных выработках неглубокого подземного заложения имеют свою специфику: они происходят в местах пересечения выработкой зон с неблагоприятными геологическими условиями. К таким зонам можно отнести породы с повышенной трещиноватостью, участки с активными оползневыми проявлениями и пр. Также они являются следствием длительных процессов деформирования конструкций обделки [4, 5, 6, 8].

Для оценки состояния массивов горных пород все чаще применяются сейсмоакустические методы в различных модификациях.

Динамические физико-механические характеристики грунтов связаны со скоростями распространения продольных и поперечных волн. Если регистрация продольных волн не вызывает сложностей, то регистрация волн поперечного типа, к сожалению, не всегда осуществима без применения специальных методик возбуждения и приема, что значительно может увеличивать время выполнения работ и их стоимость. Если работы ведутся через высокоскоростную обделку тоннеля, возбуждение поперечных волн технологически затруднительно [2]. В случае высокоскоростной обделки горной выработки импульс, возбуждаемый источником, передается в среду по нормали к поверхности, вследствие чего обменные волны (в частности, PSP) вообще не возникают [11]. Но при этом на регистрируемых сейсмограммах почти все-

гда присутствуют интенсивные поверхностные волны, которые занимают до 70% волнового поля.

Поверхностные сейсмические волны в многослойной среде обладают свойством дисперсии. Это позволяет, используя дисперсионный анализ поверхностных волн, выделять отдельную фазу волны, при этом зная ее фазовую скорость и частоту, определять мощность слоя, который она характеризует. Известно, что дисперсионные кривые поверхностных волн имеют очень слабую зависимость от скорости распространения продольных волн и высокую зависимость от скорости распространения поперечных волн в среде [3]. В то же время скорость поперечных волн связана степенной функцией с модулем сдвига. Поэтому возникла идея по динамике изменения дисперсионных кривых поверхностных волн с использованием известных инструментов MASW [12, 13] установить процессы изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) в массиве, как по величине, так и определяя слой, в котором эти изменения происходят. При этом без использования данных о скоростях распространения скоростей продольного и поперечного типа.

Использование метода дисперсионного анализа для оценки устойчивости оползневых склонов

При проведении работ по оценке состояния оползневых склонов методами сейсморазведки необходимо отметить один ключевой момент: механизм смещения оползневого тела по поверхности смещения нельзя рассматривать отдельно от процесса формирования этой поверхности. Ведь в ходе развития деформаций в массиве происходит постепенное увеличение растягивающих касательных напряжений в пределах зоны, вмещающей поверхность смещения (рис. 1). Действующие напряжения являются одной из основных причин образования вторичной текстуры пород с выраженной трещиноватостью [10].

Главная идея применения сейсмических методов для мониторинга оползневых процессов заключается в том, что началу смещений всегда предшествует период изменения сейсмических характеристик среды. Это неоднократно подтверждалось экспериментально многими исследователями ранее [7, 9, 10].

В процессе экспериментальных исследований на оползнях сейсмическими методами была подтверждена эффективность контроля зоны, которая вмещает поверхность смещения. Для этих целей из массива сейсмических данных выделяются лишь данные, которые характеризуют вышеупомянутую зону. По зарегистрированным скоростным характеристикам рассчитываются динамические физико-механические характеристики вмещающих грунтов, в частности динамический модуль упругости (Ed, модуль Юнга).

Необходимо отметить, что на практике на сейсмотомографических разрезах поверхность смещения достаточно часто не выражена в явном виде. По этой причине выделение потенциальной поверхности смещения осуществляется аналитически по косвенным признакам, к которым, например, можно отнести характер распространения сейсмических лучей на разрезе, при совместном сопоставлении с данными бурения.

Динамика изменения выбранного параметра (в данном случае Ed) определяет устойчивость массива в це-

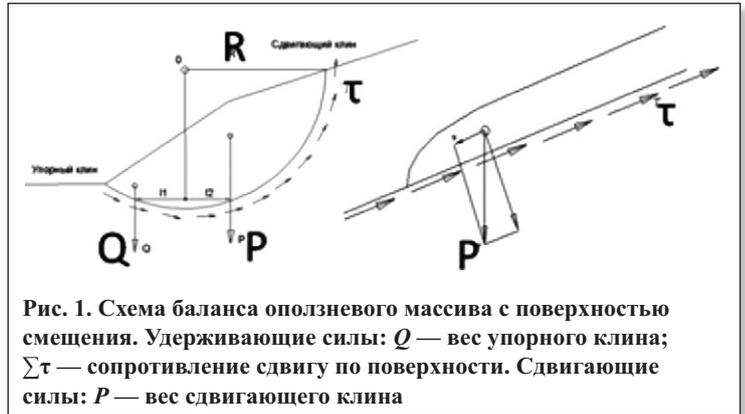


Рис. 1. Схема баланса оползневого массива с поверхностью смещения. Удерживающие силы: Q — вес упорного клина; Στ — сопротивление сдвигу по поверхности. Сдвигающие силы: P — вес сдвигающего клина

лом. Это подтверждают результаты проведенных экспериментальных мониторинговых наблюдений на оползневых склонах Северного Кавказа в течение двух лет. Исследуемые оползневые массивы вмещали транспортные тоннели, поэтому в рамках мониторинга помимо геофизических исследований проводились геомеханические исследования состояния обделки посредством датчиков НДС, установленных на обделку тоннелей.

В результате обработки материалов сейсмические данные были разбиты на слои:

- характеризующий верхний приповерхностный слой;
- характеризующий оползневое тело;
- характеризующий зону, вмещающую поверхность смещения.

Для каждого слоя рассчитывались значения Ed и строился график их изменения во времени (рис. 2).

По данным изменений параметра модуля упругости во времени можно отметить, что в слое, который характеризует поверхность смещения, происходят изменения более значительные, нежели в других структурных элементах массива. Тут необходимо отметить, что значения модуля упругости в слое, вмещающем поверхность смещения выше, чем в оползневом теле, лишь по причине захвата условного интервала массива данных, характеризующего сохранные подстилающие оползневое тело породы.

Результаты изменения НДС обделки тоннеля, которые были зарегистрированы в период мониторинга (рис. 3),



Рис. 2. Динамика изменения динамического модуля упругости для различных слоев оползневого массива (оползневый склон, поселок Хоста г. Сочи)



Рис. 3. Динамика изменения НДС обделки тоннеля (оползневый склон, поселок Хоста г. Сочи)

указывают на высокую корреляцию данных об изменении состояния зоны, вмещающей поверхность смещения и напряжений, возникающих на обделке тоннеля.

Таким образом, эффективность контроля напряженно-деформированного состояния зоны, вмещающей поверхность смещения оползневого тела, сейсмическими методами очевидна. А если использовать свойства дисперсии поверхностных волн, появляется возможность проведения экспресс-оценки изменения состояния слоя, вмещающего потенциальную поверхность скольжения оползневого тела.

Результаты математического моделирования оползневого массива

Для того чтобы оценить отклик дисперсионной кривой поверхностных волн на изменения, происходящие в оползневом массиве, была создана сейсмогеотехническая модель оползневого массива асеквентного типа, в которой имитировались разные стадии оползневых процессов (рис. 4). Структурные элементы модели имели характеристики, наиболее приближенные к реальным оползневым массивам.

При поддержке коллег из Республиканского академического научно-исследовательского и проектно-конструкторского института горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ, г. Донецк) и с помощью специализированного программного обеспечения [1] были рассчитаны волновые поля, которые регистрируются при работах по методике метода преломленных волн (МПВ) ударным источником.

В процесс моделирования была заложена динамика изменения характеристик слоя, в котором образуется поверхность скольжения в результате влияния растягивающих касательных напряжений (доминирующих при оползневых деформациях).

По полученным в результате моделирования сейсмограммам рассчитывались дисперсионные изображения и пикировались дисперсионные кривые поверхностных волн (рис. 5).

В результате выделенные дисперсионные кривые были оцифрованы и представлены на общем изображении (рис. 6).

Рассчитанные дисперсионные кривые отображают процессы изменения параметров в структурных элементах модели. Здесь стоит отметить, что в реальных условиях разрешающей способности метода для определения наличия или отсутствия столь маломощного слоя в массиве скорее недостаточно. Но при мониторинговых многократных работах, когда исследования проводятся на абсолютно идентичном оборудовании с жестко закрепленными пунктами возбуждения и приема, изменения, которые происходят в исследуемом слое, будут влиять на общее волновое поле поверхностных волн и, соответственно, на параметры дисперсионного изображения, а этих данных вполне достаточно для проведения анализа изменений в состоянии среды.

Результаты экспериментальных наблюдений состояния оползневого массива методом дисперсионного анализа поверхностных волн

Работы по оценке устойчивости оползневого массива предложенной методикой проводились на реальном склоне. В результате были получены дисперсион-

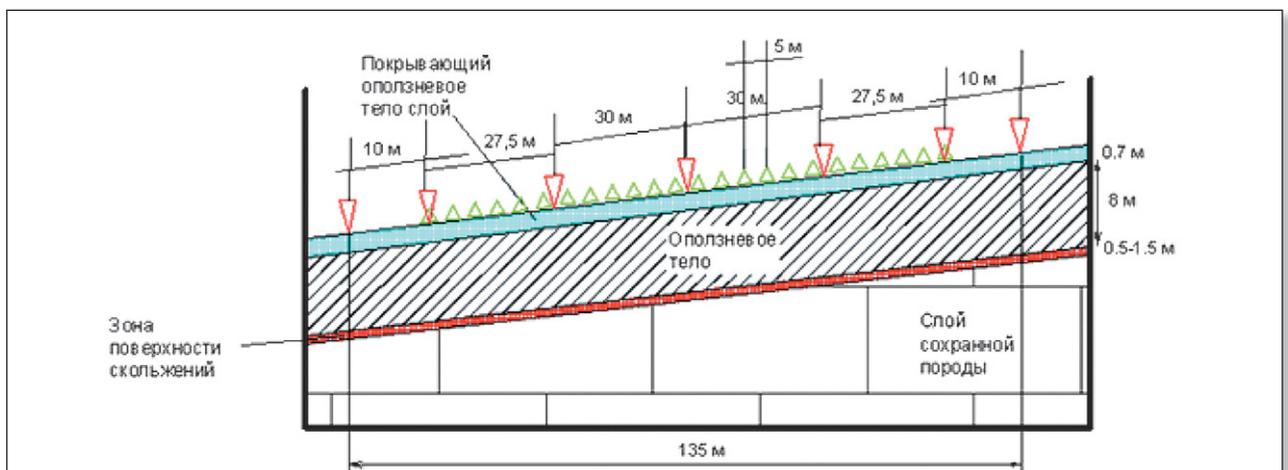
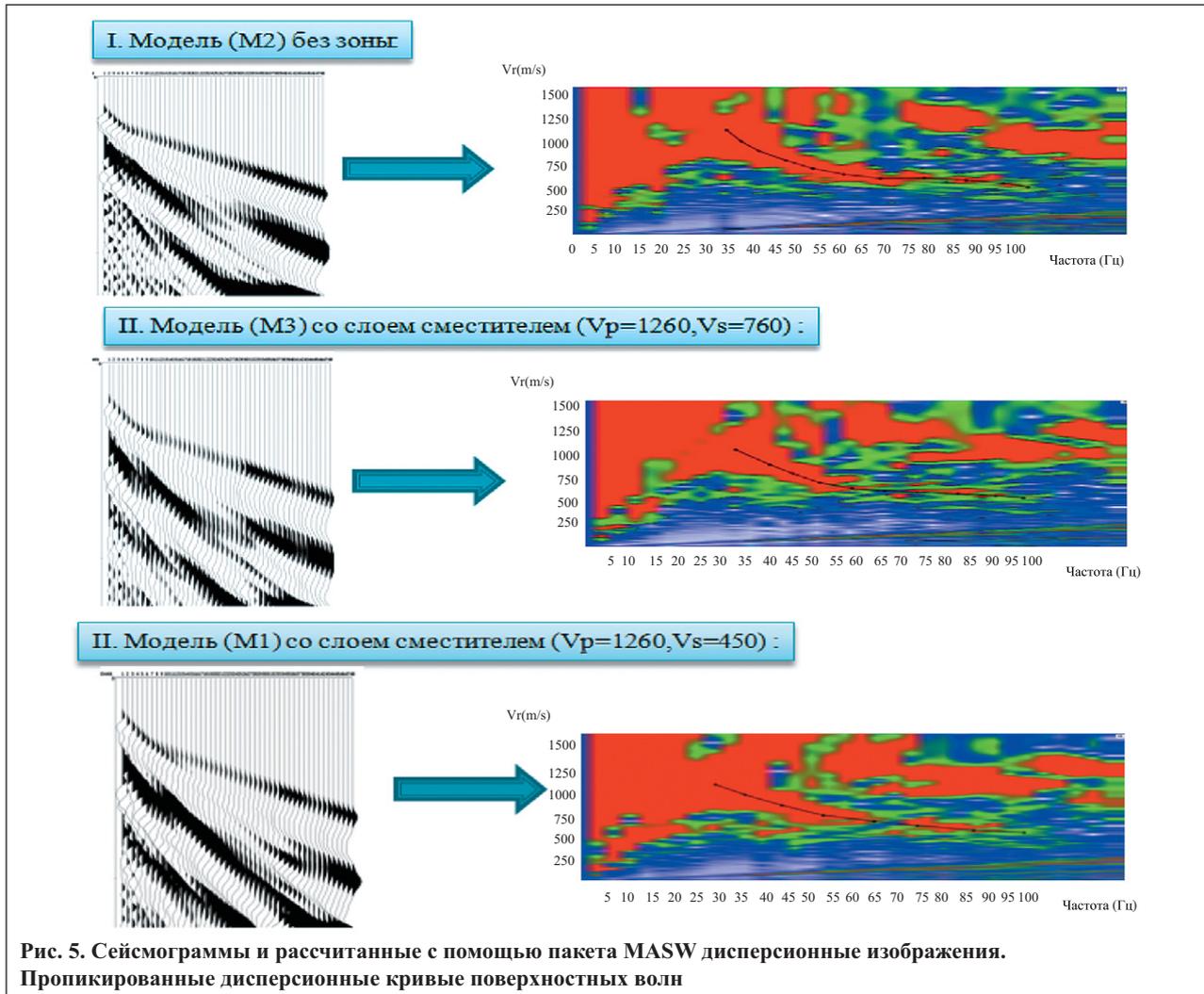


Рис. 4. Сейсмогеотехническая модель оползневого массива (асеквентного типа). Структурные элементы модели: 1 — покрывающий оползневое тело слой. Мощность слоя 0,7 м, $V_p = 300$ м/с, $V_s = 150$ м/с; 2 — оползневое тело. Мощность слоя 8 м, $V_p = 1400$ м/с, $V_s = 850$ м/с; 3 — сохраненные породы. Мощность слоя — полупространство, $V_p = 3000$ м/с, $V_s = 1600$ м/с



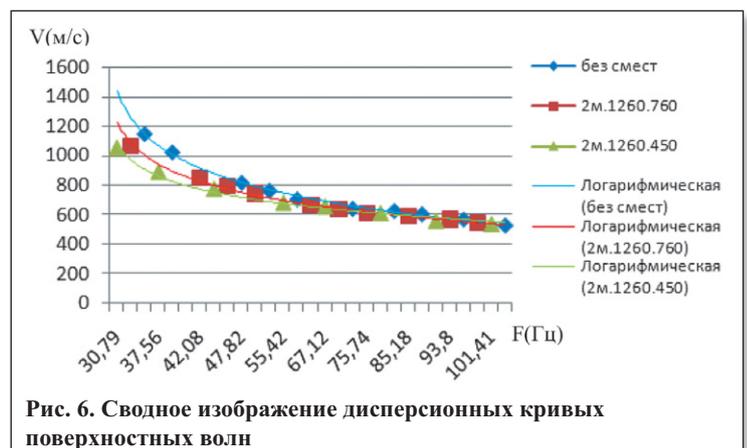
ные изображения за двухлетний период измерений с интервалом измерений 3 месяца. На рисунках 7 и 8 представлены не все дисперсионные изображения, а лишь характерные: начальная стадия измерений (устойчивое состояние массива); стадия понижения скоростных характеристик в слое-сместителе (переход массива в неустойчивое состояние).

Данные по изменению средних величин фазовых скоростей в окне мониторинга за двухлетний период исследований представлены на графике (рис. 9).

По результатам экспериментальных наблюдений на оползневом склоне было зафиксировано понижение скоростных характеристик в слое-сместителе, которое началось с 02.2012 и продолжалось плавно снижаться до 08.2012. В период с 08.2012 по 11.2012 были зафиксированы более значительные снижения скоростного режима в слое. А в период с 11.2012 по 05.2013 были отмечены визуальные признаки подвижки тела оползня в виде отрывов на поверхности склона. Масштабы смещения оползня были незначительными, и к 05.2013 скорости, характеризующие исследуемый слой, восстановились до уровня средних значений двухгодичного цикла наблюдений. Следует отметить, что по данным датчиков НДС обделки тоннеля, который пересекал контролируемый массив, с 12.2012 отмечаются достаточно ощутимые изменения (рис. 10). Эти изменения обусловлены перераспределением напряжений во вмещающем массиве в результате оползневых деформаций.

Результаты экспериментальных наблюдений за изменением состояния вмещающего массива в заобделочном пространстве горной выработки методом дисперсионного анализа поверхностных волн

Экспериментальные работы проводились в перегонном тоннеле метрополитена. Данный участок мониторинга был выбран для последующего контроля в связи с возможным влиянием на обделку тоннеля мульды проседания, через которую проходила ось трассы тоннеля (рис. 11). При геологической оценке участка было решено, что при развитии мульды может



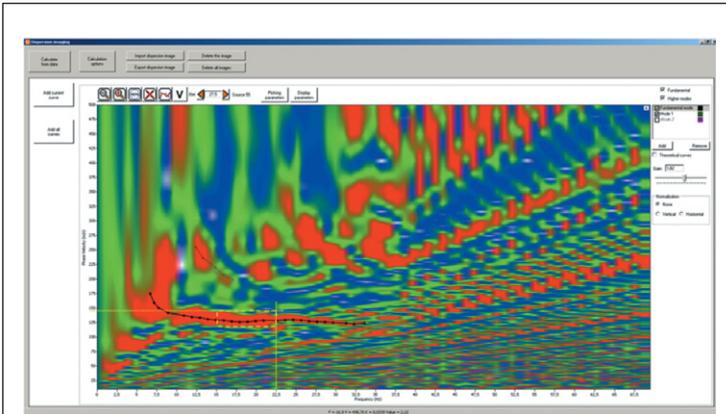


Рис. 7. Дисперсионное изображение, полученное 10.2011. Процикированная дисперсионная кривая поверхностной волны. Выделение окна мониторинга

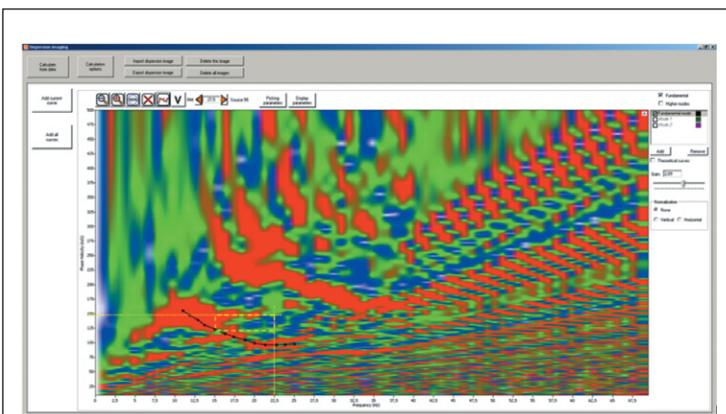


Рис. 8. Дисперсионное изображение, полученное 10.2011. Процикированная дисперсионная кривая поверхностной волны



Рис. 9. График изменения средних значений фазовых скоростей поверхностных волн в окне мониторинга



Рис. 10. График изменения напряжения на обделке тоннеля

происходит разжижение — разбухание глинистых грунтов в устойчивой части массива. Поэтому необходимо вести контроль состояния заобделочного пространства тоннеля в процессе его эксплуатации, чтобы избежать возможных аварийных ситуаций.

Для мониторинга состояния заобделочного пространства были проведены работы по предложенной методике дисперсионного анализа поверхностных волн.

При работах в тоннелях с высокоскоростной обделкой случай с инверсией скорости достаточно частое явление. В этих случаях волна рэлеевского типа (псевдорэлеевская волна) вблизи от источника имеет скорость, равную скорости рэлеевской волны в слое высокоскоростной обделки, и величину длины волны, не превышающую мощности слоя (высокая частота). По мере удаления от источника высокие частоты затухают, частота сигнала падает, увеличивается длина волны — она захватывает все больший объем низкоскоростных вмещающих пород — ее скорость падает. Когда величина длины волны рэлеевского типа превышает на порядок и более мощность слоя высокоскоростной обделки, ее видимая скорость практически не отличается от скорости рэлеевской (псевдорэлеевской) волны во вмещающих породах.

Стоит иметь в виду, что вокруг горной выработки формируется зона ослабленных в результате проходки грунтов. Также на некотором удалении от обделки тоннеля формируются зоны повышенного горного давления (ЗПГД), которые вносят свой вклад в неоднородность массива.

Это позволяет расценивать на первый взгляд однородный вмещающий горную выработку массив градиентным по скоростным характеристикам [2].

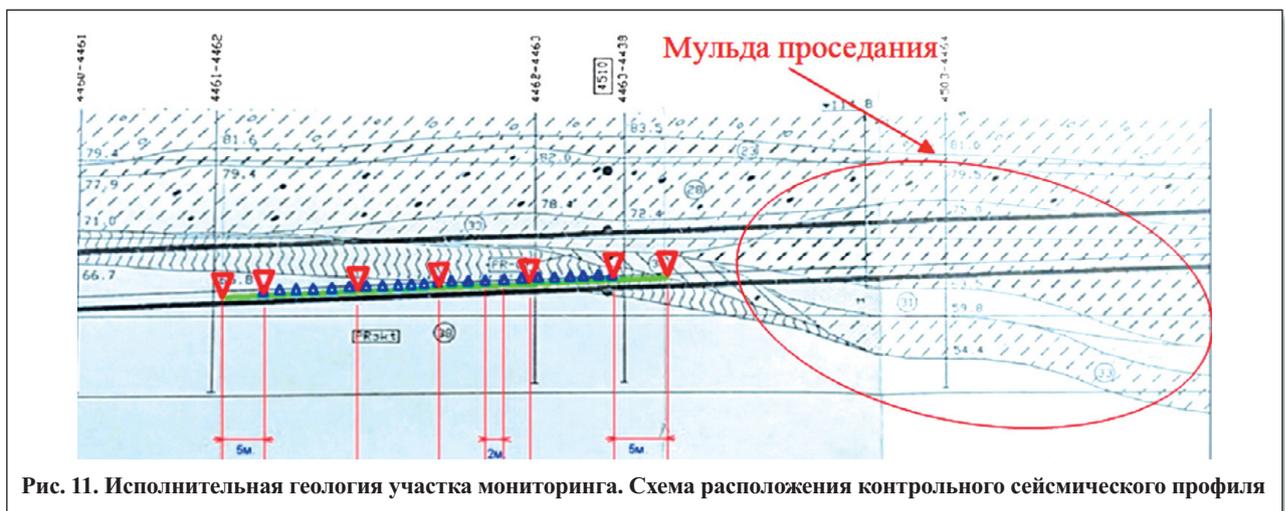


Рис. 11. Исполнительная геология участка мониторинга. Схема расположения контрольного сейсмического профиля

Волновые поля регистрировались приемной линией, закрепленной на обделке тоннеля в соответствии с рис. 11. По полученным материалам рассчитывались дисперсионные изображения. На рис. 12 представлены дисперсионные изображения с пропикированными кривыми поверхностных волн за шестилетний период наблюдений с полугодовым циклом измерений.

Для анализа состояния вмещающего массива по данным дисперсионного анализа было решено использовать оконный мониторинг с интервалом 0–5 метров, то есть скоростные характеристики учитывались максимум до 5 метров от высокоскоростной обделки тоннеля.

В результате был построен график изменения значений средних фазовых скоростей поверхностных волн, входящих в окно мониторинга (рис. 13).

На данном участке мониторинга в процессе исследований снимались показания напряжений на обделке тоннеля с установленных в обделку датчиков НДС. Графики изменения НДС (МПа) на обделке тоннеля представлены на рис. 14.

В результате экспериментальных работ отмечена высокая корреляция данных изменений характеристик вмещающих грунтов и данных напряженно-деформированного состояния обделки тоннеля. Что касается состояния заобделочного пространства, то можно сделать вывод, что в ближней зоне к обделке тоннеля происходят изменения физико-механических свойств вмещающих грунтов в результате разжижения — разбухания глинистых грунтов, которое, скорее всего, усугубляется вибрационными воздействиями проходящих электропоездов.

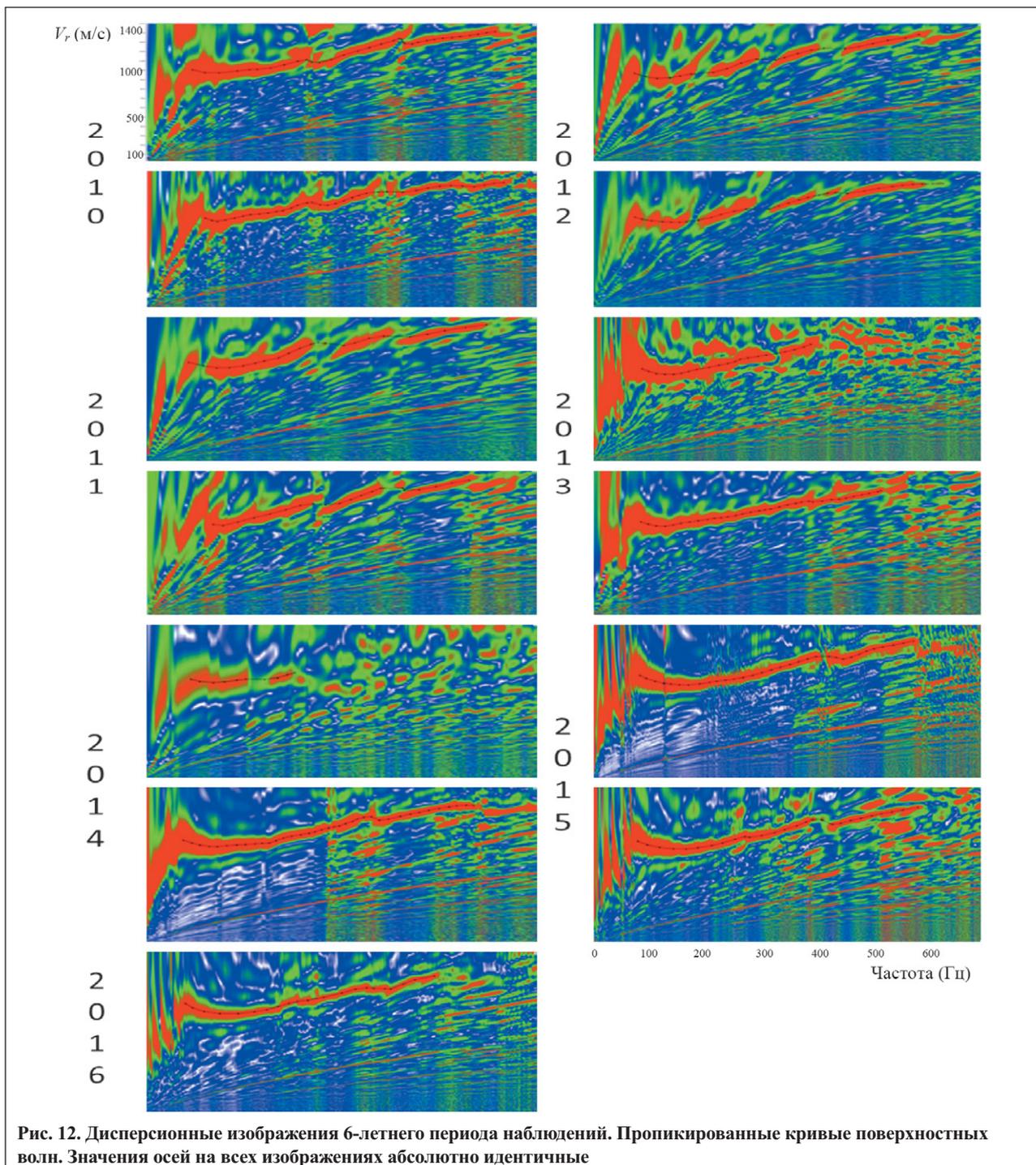


Рис. 12. Дисперсионные изображения 6-летнего периода наблюдений. Пропикированные кривые поверхностных волн. Значения осей на всех изображениях абсолютно идентичны

Выводы

Геофизические поля реагируют на изменения напряженно-деформированного состояния массива гораздо раньше, чем проявляются какие-либо первые признаки разрушения, которые можно зарегистрировать прямыми методами контроля.

Для контроля устойчивости массива и определения тенденции развития деформационных процессов в массиве эффективнее контролировать зону, вмещающую поверхность скольжения.

С помощью метода анализа поверхностных волн удается производить экспресс-оценку состояния вмещающего массива без привлечения традиционных скоростных характеристик объемных волн (это важно, когда регистрация объемных волн затруднена или неосуществима).

Можно отметить, что характеристики дисперсионной кривой реагируют на изменения в слоях, в которых происходят деформации, даже при условии, если они перекрыты более высокоскоростными грунтами (в случае инверсных разрезов). 

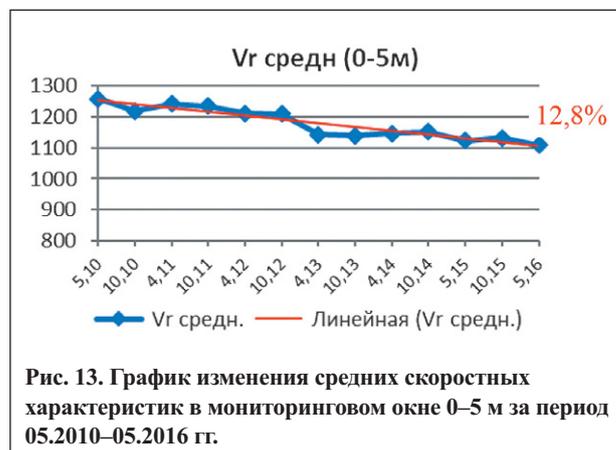


Рис. 13. График изменения средних скоростных характеристик в мониторинговом окне 0–5 м за период 05.2010–05.2016 гг.

Автор выражает искреннюю благодарность рецензентам за обоснованные замечания и значимые дополнения к возможностям и недостаткам метода дисперсионного анализа поверхностных волн при оценке устойчивости горных массивов, а также за возможность обсудить проблемные места в исследовании.

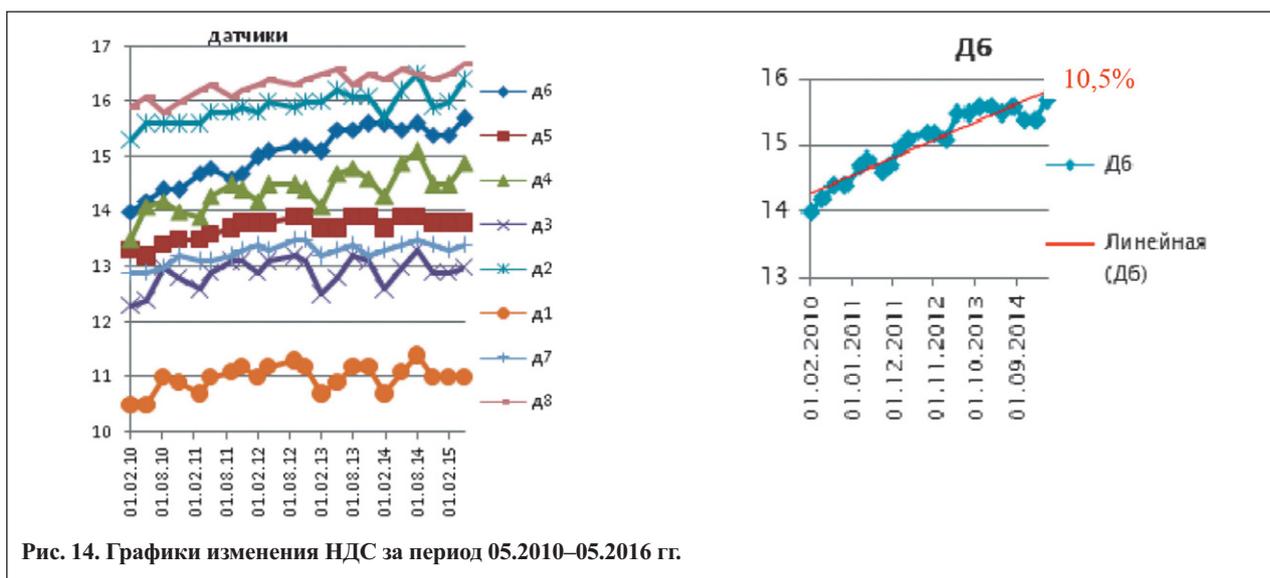


Рис. 14. Графики изменения НДС за период 05.2010–05.2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциферов А.В., Захаров В.Н., Глухов А.А. Комплект программ моделирования процесса распространения сейсмических волн в угленосной толще // Каталог прогр. средств. № 50910000379. М.: ГосФАП, 1991.
2. Бойко О.В. Определение упругих характеристик низкоскоростных пород, перекрытых высокоскоростным слоем обделки тоннеля, по материалам сейсморазведки. Диссертация. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Санкт-Петербург, 2015. 135 с.
3. Бондарев В.И. Сейсмический метод определения физико-механических свойств нескальных грунтов. Екатеринбург, 1997. 220 с.
4. Борьба с оползнями, обвалами и размывами на железных дорогах Кавказа / под ред. В.С. Безручко. М.: Всесоюзное издательско-полиграфическое объединение Министерства путей сообщения, 1961. 161 с.
5. Власов С.Н. Аварийные ситуации при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов / Власов С.Н., Маковский Л.В., Меркин В.Е. М.: Изд. «ТИМР», 2000. 193 с.
6. Гинзбург Л.К. Противооползневые удерживающие конструкции. М.: Стройиздат, 1979. 78 с.
7. Горяинов Н.Н. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1992. 256 с.
8. Дорман И.Я. Сейсмостойкость транспортных тоннелей. М.: Транспорт, 1986. 170 с.
9. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. М.: Изд-во Московского университета, 1981. 176 с.
10. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 501 с.
11. Пузырев Н.Н. Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн / Пузырев Н.Н., Тригубов А.В., Бродов Л.Ю. М.: Недра, 1985. 277 с.
12. Park C.B., Müller R.D., Xia J., Ivanov J. Multichannel analysis of surface waves (MASW) — active and passive methods. Kansas Geological Survey, Lawrence, USA. 2007. P. 800–808.