



Технология сейсмотомографических исследований грунтов в околотоннельном пространстве

Канарейкин Б.А., Сагайдачная О.М., Курбатский В.Н., Дунаева К.А., ФГУП "СНИИГиМС", г. Новосибирск

ИННОВАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Важнейшей задачей обеспечения экологической безопасности строительства и эксплуатации крупных техногенных объектов является детальное изучение техносферы системы, включающей геологическую среду и окружающие промышленные инфраструктуры, в том числе подземные и подземно-пазовые инженерные и транспортные сооружения. В условиях мегаполиса, каковым является Новосибирск, крупнейшей транспортной магистралью является метрополитен. При строительстве и эксплуатации метрополитена необходимо периодически проводить исследования (иначе говоря, мониторинг) состояния грунтового массива в околотоннельном пространстве с оценкой его физико-механических характеристик. Обнаружение сформировавшихся со временем локальных пустот и зон обводнённости в околотоннельном пространстве позволяет выработать адекватные технологические решения по их устранению и, следовательно, исключить возможность аварийных ситуаций и их последствий.

Известно [7], что сейсмотомографический способ позволяет получать непрерывное распределение значений скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн в произвольно заданной плоскости, которое можно использовать как непосредственно для оценки целостного состояния грунта, так и для оценки его физико-механических характеристик. Сейсмические работы по исследованию грунтов околотоннельной зоны строящегося перегона второй очереди Новосибирского метрополитена были выполнены по заказу Муниципалитета Новосибирска по личной инициативе и поддержке Н.Б. Хвана - начальника МУП "Управление заказчика по строительству подземных транспортных сооружений". Детальные инструментальные сейсмические наблюдения тоннеля были проведены в весенний (2003 г.) и в зимний (2003 - 2004 гг.) периоды после длительного простоя проходческого щита. К началу работ на исследуемом участке наблюдались и проседание грунта, и отдельные его провалы, наиболее крупный из них объемом около 400 м^3 вошел в левый тоннель примерно в 10 м - 12 м от фасада многоэтажной новостройки. При проходке правого тоннеля также произошел массовый сброс разжиженного грунта через забой в тоннель. Отмеченные явления обусловлены особенностями физико-механических свойств грунтов, уровнем их обводнённости и способностью водонасыщенных грунтов переходить в подвижное состояние под воздействием сильных динамических воздействий.

Грунтовой массив, вмещающий тоннель, в геоморфологическом отношении приурочен к правобережному Приобскому плато. В геологическом отношении верхняя часть разреза представлена аллювиально-делювиальными верхнечетвертичными отложениями. В зоне, прилегающей к своду тоннеля, грунты представлены твердыми лессовыми супесями и

влажными суглинками, а ниже оси тоннеля - супесями, насыщенными водой и находящимися в пластичном состоянии. Уровень грунтовых вод находится примерно на отметке $12 \text{ м} \pm 14 \text{ м}$.

Техническое обеспечение детальных сейсмических работ

Сейсмические работы были выполнены с использованием высокоточной 24-х разрядной отечественной многоканальной телеметрической сейсмостанцией СТС-24Р в портативном варианте APC [6]. В состав станции APC (до 120 каналов) входят переносные телеуправляемые шестиканальные регистраторы. Основные технические характеристики регистратора: частота дискретизации 0,25, 0,5, 1,0, 2,0, 4,0, 8,0, 16,0 мс; мгновенный динамический диапазон более 120 дБ; коэффициент нелинейных искажений менее 0,002%; потребляемая мощность на канал менее 0,33 Вт; источник питания - аккумулятор; масса менее 5 кг.

Регистрация упругих колебаний проводилась в реальном времени на открытом канале с частотой дискретизации 0,5 мс. Отметка момента реализована с использованием пьезодатчика, программно-аппаратное обеспечение позволяет выполнять в автоматическом режиме практически неограниченное количество накопленных. При регистрации сейсмических данных применялись одиночные вертикальные сеймоприемники GS20DX, количество каналов менялось от 18 до 72. Возбуждение упругих колебаний осуществлялось вертикально направленными ударами молота весом до 6 кг по металлической пластине, закреплённой на поверхности грунта, выполнялось накопление 4 - 8 сеансов.

Методика детальных сейсмических наблюдений

В основу технологии исследований был положен способ сейсмопросвечивания среды, обеспечивающий наиболее точное отождествление волн различного типа и траектории их распространения. Детальные сейсмические работы выполнялись по методике многократных перекрытий с использованием нескольких систем наблюдений: наземно-тоннельной

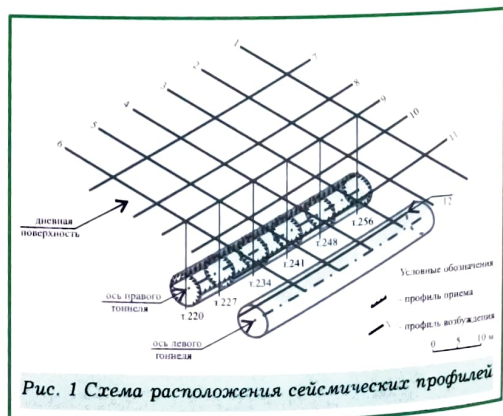


Рис. 1 Схема расположения сейсмических профилей

радиальной, наземно-тоннельной, продольной и межтоннельной продольной. Расстояния, как между пунктами приема, так и между пунктами возбуждения упругих колебаний составляли 1 м. Общая схема расположения сейсмических профилей приведена на рис. 1.

При наземно-тоннельной радиальной системе наблюдений прием упругих колебаний осуществлялся по окружности туннеля с расстоянием между сейсмоприемниками до 1.0 м. Возбуждение упругих колебаний проводилось по линейным профилям, расположенным на дневной поверхности. При этом линия приема по окружности туннеля и линия возбуждения упругих колебаний находились в единой вертикальной плоскости. Профиль возбуждения располагался перпендикулярно и симметрично относительно оси туннеля. Сейсмоприемники, оси максимальной чувствительности которых были ориентированы по радиальным направлениям, крепились к стенкам туннеля цилиндрической формы на специальных магнитах. Было отработано шесть поперечных сечений, плоскости которых пересекают туннели №№ 220, 227, 234, 241, 248, 256.

При наземно-тоннельной продольной системе наблюдений линия приема сейсмических волн располагалась внутри туннеля параллельно его образующей оси. Оси максимальной чувствительности сейсмоприемников были ориентированы перпендикулярно стенке туннеля. Профили возбуждения упругих колебаний располагались на дневной поверхности параллельно оси туннеля. Сейсмические наблюдения были выполнены по трем образующим линиям туннеля: двум боковым и одной верхней. При этом каждая расстановка сейсмоприемников обрабатывалась с трех линий возбуждения, что обеспечивало относительно равномерное освещение строения массива надтоннельных грунтов по ряду взаимопересекающихся наклонных плоскостей.

Межтоннельная продольная система наблюдений состояла из линии приема упругих колебаний, расположенной в правом туннеле, и профили возбуждения упругих колебаний, расположенного внутри левого туннеля. Линия приема и профиль возбуждения располагались на боковых образующих в единой горизонтальной плоскости. Ось максимальной чувствительности сейсмоприемников располагалась в горизонтальной плоскости (радиальная). Плоскость освещения грунтов располагалась горизонтально и включала центральные горизонтальные сечения туннелей.

Методика обработки и интерпретации детальных сейсмических наблюдений

На начальном этапе обработки сейсмических данных были подготовлены системы годографов однотипных волн, зарегистрированных в первых и последующих вступлениях на сейсмограммах, с использованием программного комплекса "СТС-оператор" [4] и программы построения годографов Godograph. Была проведена в интерактивном режиме коррекция прослеженных годографов и получены гладкие поля времен, вариации которых обусловлены особенностями строения среды. Полученные поля времен были обработаны с использованием специализированного программного комплекса, в котором реализован метод сейсмотомографической обработки [1]. Алгоритмический аппарат

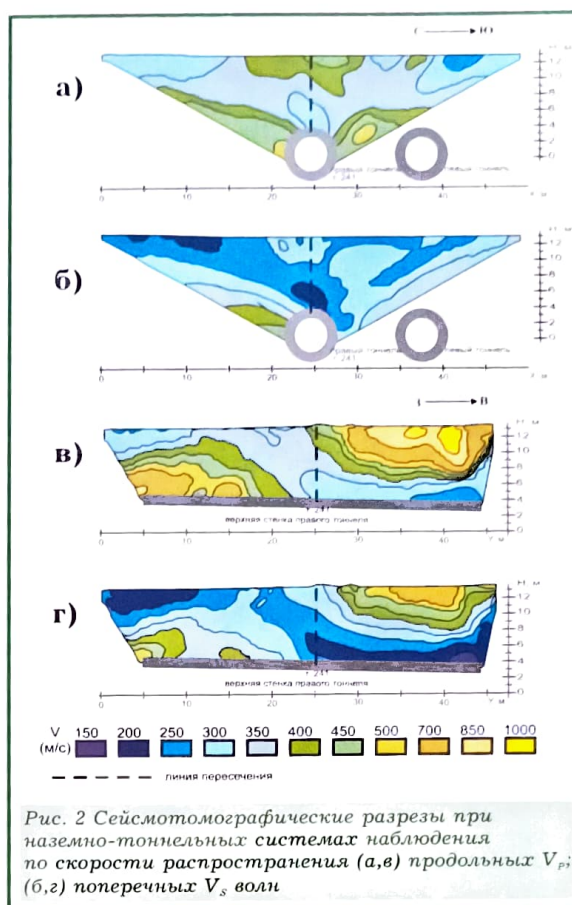


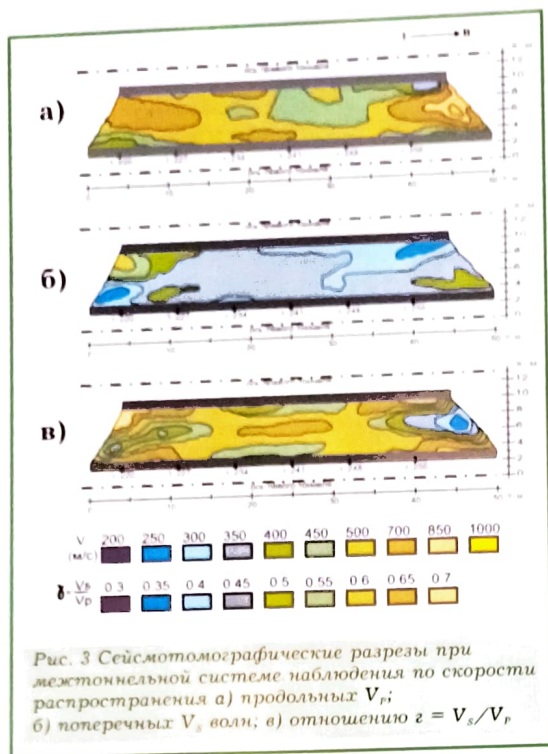
Рис. 2 Сейсмотомографические разрезы при наземно-тоннельных системах наблюдений по скорости распространения (а,в) продольных V_p ; (б,г) поперечных V_s волн

лучевой сейсмотомографии построен на автоматическом итерационном подборе скоростной модели среды с условием минимизации разности времен между наблюдаемыми и теоретическими годографами во всех точках наблюдения. Общее решение задачи сводится к решению системы линейных уравнений с большим количеством неизвестных, которое достигается способом алгебраической реконструкции.

Результатом обработки являются плоскостные (вертикальные, наклонные, горизонтальные) сейсмотомографические разрезы по скоростям распространения продольных V_p и поперечных V_s волн. Сейсмотомографические разрезы (см. рис. 2, 3) по параметрам V_p и V_s , а также их отношению - параметру $\gamma = V_s/V_p$, который, как известно, с высокой достоверностью характеризует степень водонасыщенности грунтов [3, 5], используются для начальной оценки характеристик грунтов. Затем эти разрезы с помощью известных [2] и уточненных корреляционных зависимостей между скоростями распространения упругих волн V_p и V_s и физико-механическими свойствами грунтов пересчитывались в томографические разрезы по другим параметрам: плотности ρ , естественной влажности W , модуля деформации E , удельного сцепления C .

Результаты сейсмотомографических исследований

Анализ всех сейсмотомографических материалов позволил получить целостную характеристику состояния грунтов в пределах исследуемого участка (прикабойной части правого туннеля и околотоннельного пространства).

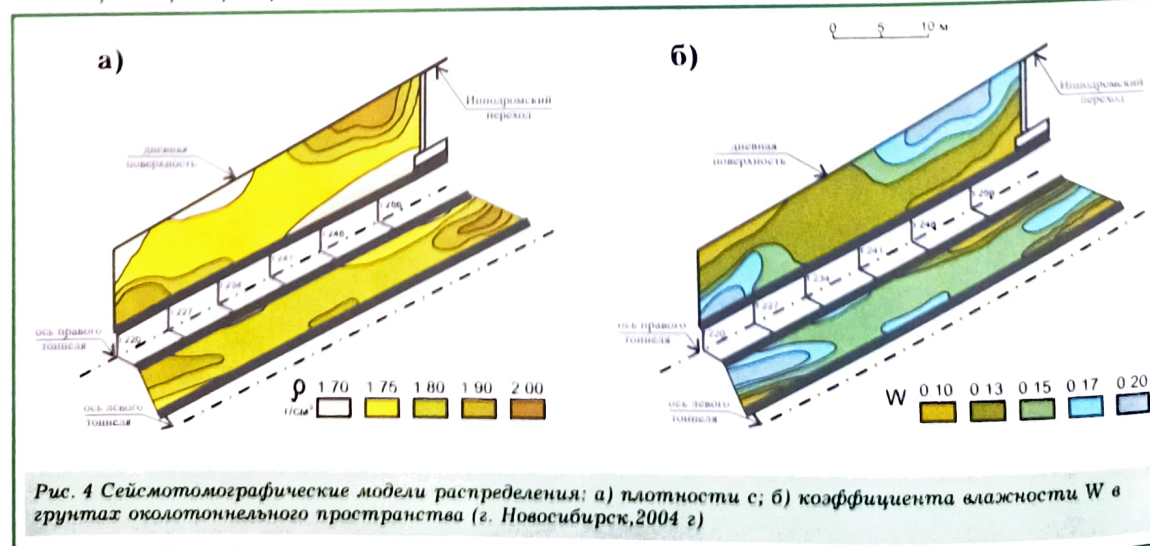


Сейсмотомографические разрезы по скоростным параметрам V_p и V_s свидетельствует о достаточно сложном распределении значений скоростей распространения продольных и поперечных волн во вмещающих грунтах. В качестве примера на рис. 2а и 2б показаны полученные при наземно-тоннельной радиальной системе разрезы по скоростным параметрам V_p , V_s для профиля возбуждения №3 и линии приема, расположенной по окружности туннеля №241. Значения скорости распространения продольных волн V_p изменяются в пределах от 250 м/с до 550 м/с. В нижней части надтоннельного пространства имеется локальная аномалия пониженных значений скоростей, которая, вероятнее всего, обусловлена разуплотнением грунта при проходке туннеля. Локальное повышение в приповерхностной зоне над туннелем может быть связано с уплотнением грунтов под действием наземного транспорта, а также с особенностями зимнего промерзания грунтов. Сейсмотомографический разрез значений скорости распространения поперечных волн

V_s дает аналогичную конфигурацию аномалии. Однако здесь более выражено проявление асимметрии в характеристиках грунтов, прилегающих к боковым стенкам туннеля со стороны левого туннеля, отмечаются более низкие значения V_s .

На рисунках 2в, 2г показаны полученные при наземно-тоннельной продольной системе наблюдений сейсмотомографические разрезы по скоростным параметрам V_p , V_s для профиля возбуждения №9 и линии приема, расположенной на верхней стенке правого туннеля параллельно его оси. В восточной части профиля наблюдаются аномально пониженные скорости V_p , V_s в грунтах прилегающих к туннелю. Эта аномалия обусловлена техногенными причинами, вызвавшими разуплотнение грунтов при проходке туннеля. Контрастно выраженные высокоскоростные аномалии V_p , V_s в приповерхностной части профиля можно объяснить промерзанием влажных насыпных грунтов, прилегающих к железобетонной стенке Ипподромского переезда. В западной части профиля над верхней стенкой туннеля фиксируется высокоскоростная аномалия V_p . Сходная, но менее выраженная, аномалия выделяется в этой части и по значениям скоростей распространения поперечных волн V_s . Наблюдаемая аномалия по скоростным характеристикам, вероятно, связана с повышенной влажностью грунтов этого участка, обусловленной утечкой воды из тепловодоцентралей, расположенных рядом.

При межтоннельной системе сейсмических наблюдений строение грунтов освещалось в горизонтальной плоскости. Диапазон изменения скорости распространения продольных волн V_p на сейсмотомографическом сечении составляет 300 м/с ÷ 1000 м/с, преобладающие значения V_p = 400 м/с ÷ 550 м/с (рис. 3а). В восточной части профиля отмечается повышение значений V_p до 1000 м/с. В этой же части профиля на участке, прилегающем к левой стенке правого туннеля фиксируются аномально пониженные значения V_p = 300 м/с ÷ 350 м/с. Значения скорости распространения поперечных волн V_s на сейсмотомографическом сечении изменяются в диапазоне 200 м/с ÷ 500 м/с (рис. 3б). Наиболее низкие значения V_s наблюдаются в восточной части профиля вблизи левой стенки правого туннеля и в западной части профиля вблизи



правой стенки левого тоннеля. Значения $\gamma = V/V_p$ изменяются в пределах от 0.35 до 0.7. Преобладающие значения γ составляют 0.5 - 0.65 и соответствуют грунтам с пониженной влажностью (рис. 3в). В восточной части профиля располагается участок с аномально низкими значениями $\gamma = 0.35-0.4$. Эту особенность можно связать с повышением влажности грунтов из-за погружения тоннеля и приближения плоскости наблюдения к водоносному горизонту. Аномально высокие значения γ до 0.7 получены на отдельных участках вблизи стенок тоннеля, что может свидетельствовать о наличии сухих и, возможно, разуплотненных грунтов.

Главной особенностью массива грунтов околотоннельного пространства является наличие в прибойной части правого тоннеля зоны разуплотненных грунтов (до 1.75 г/см^3) и аномалии пониженных значений влажности (до 0.1) (рис. 4), которые практически совпадают. Кроме того, в верхней части разреза над правым тоннелем на участке, примыкающем к железобетонной стенке Ипподромского перехода, выделены грунты с аномально повышенными плотностями (до 2.00 г/см^3). Повышенная плотность грунтов на этом участке, скорее всего, обусловлена их промерзанием. Слабо контрастная аномалия пониженной влажности фиксируется в верхней части вертикального разреза в западной части разреза (тюбинг №220 - №227). Аномальные зоны повышенной влажности (до 0.2) выделяются в верхней части разреза на участке, примыкающем к Ипподромскому проезду, и в нижней части разреза в интервале между тюбингами №220 и №227. Верхняя аномальная зона повышенной влажности может быть соотнесена с зоной мерзлых грунтов. Зона повышенной влажности в нижней части разреза имеет, вероятнее всего, техногенную природу и связана с утечкой воды из расположенных рядом водоводов или теплоцентралей.

Полученные результаты являются убедительной иллюстрацией эффективности технологии диагностики состояния грунтовых массивов с применением способа сейсмотомографии. Проведение сейсмотомографических исследований в формате просвечивания с использованием наземно-тоннельных и межтоннельных наблюдений позволило с высокой степенью детальности получить представление об особенностях строения грунтов в околотоннельном пространстве, выявить аномальные зоны, связанные как с техногенными причинами, так и сезонными изменениями физико-механических характеристик грунтов в результате их промерзания. Сейсмотомографические приемы изучения техносферы являются высоко технологичными и экологически безопасными, не связаны с нарушениями объекта исследований, и могут успешно применяться при строительстве и эксплуатации (в режиме мониторинга) инженерных и транспортных объектов, наземных и подземных коммуникаций, гидротехнических сооружений и т.п.

Литература

1. Канарейкин Б.А., Курбатский В.Н., Ким А.Ф. Опыт использования сейсмотомографии при изучении строения железнодорожных насыпей. - Известия вузов (строительство). Вып.1, 1993.
2. Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами. - М.: Главтранспроект, 1985.
3. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. М.: МГУ, 1981.
4. Птицына Т.С., Сагайдачный А.В. Комплекс программ "СТС - оператор". /Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2002610574 от 22.04.2002.
5. Пузырев Н.Н. Методы сейсмических исследований. - Новосибирск: Наука, 1992.
6. Сагайдачная О.М., Шмыков А.Н., Сагайдачный А.В. и др. Отечественная многоканальная телеметрическая станция СТС-24Р для сейсмических исследований. Геофизический вестник ЕАГО, №10, 2002.
7. Сейсмическая томография. С приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике: /Под ред. Нолета Г. М.: Мир, 1990.

ПОДПИШИСЬ

Персональная информация о подписчике/Почтовый адрес организации

ФАМИЛИЯ		ИМЯ		ОТЧЕСТВО	
ПОЛНОЕ НАИМЕНОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ					
ОТДЕЛ/ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ			ДОЛЖНОСТЬ		
ИНДЕКС	СТРАНА	ГОРОД	ОБЛАСТЬ/РАЙОН		
АДРЕС					
КОД ГОРОДА	ТЕЛЕФОН	ФАКС	E-MAIL		
Россия, 410019, г. Саратов, ул. Крайняя 129, СО "ЕАГО" - в редакцию "Приборы и системы разведочной физики"					

Стоимость годовой подписки (с почтовой пересылкой и НДС - 10%)

Наименование издания	1 комплект	2 комплекта	3 комплекта	4 комплекта
Журнал "Приборы и системы разведочной геофизики"	1200 руб.	2300 руб.	3350 руб.	4400 руб.