

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.83:528.8

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВРЕМЕННОЙ КРЕПИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТОННЕЛЯ, ПРОХОДИМОГО В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

**В. Н. Опарин^{1,3}, В. Ф. Юшкин¹, Г. Н. Полянкин²,
А. Н. Гришин², А. О. Кузнецов², Д. Е. Рублев¹**

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: 114@ngs.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
E-mail: gan66@mail.ru, ул. Дуси Ковальчук, 191, 630049, г. Новосибирск, Россия,

³Новосибирский государственный университет,
E-mail: oparin@misd.nsc.ru, ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия

Описан комплексный метод и результаты деформационно-волнового мониторинга временной крепи железнодорожного тоннеля, проходимого в сложных горно-геологических условиях юга Западной Сибири. Измерения пространственных геометрических параметров временной крепи осуществлены с помощью лазерного сканирования с интервалом 3 мес, что позволило сопоставить фактические трехмерные модели временной крепи и участка пород штроссы тоннеля. Данные, полученные в разные периоды времени наблюдений, позволили определить смещения немаркированных точек временной крепи, а также изменения формы стен и свода тоннеля. Благодаря высокой плотности сканирования, этот метод дает возможность дистанционно выявлять относительно небольшие зоны изменений структуры массива и состояния крепи. Рассмотрены особенности распространения упругих волновых пакетов на сопряжении временной арочно-бетонной крепи тоннеля с породным массивом. Выполненный анализ сейсмических колебаний пород при воздействии ударом бойка показал, что частоты максимумов спектральной плотности упругой волны в массиве обусловлены формированием низкочастотной (маятниковой) ее компоненты на сопряжении пород алевролита и угля, связаны с размерами их структурных отдельностей и механическими свойствами.

Блочный массив, временная крепь, обделка тоннеля, деформационный мониторинг, лазерное сканирование, сейсмическая волна, коэффициент крепости пород, спектральный анализ

ВВЕДЕНИЕ

Применение комбинированной технологии ведения проходческих и бетоноукладочных работ при строительстве железнодорожных тоннелей в сложных инженерно-геологических и геомеханических условиях породных массивов, особенно в тектонически активных районах

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке партнерского интеграционного проекта № 100 СО РАН, а также проекта ОНЗ РАН-3.1.

Сибири, требует предварительной подготовки и реализации мероприятий по обеспечению безопасности сооружений и конструкций его подземной инфраструктуры на весь срок эксплуатации. Это связано с необходимостью проведения оперативного и эффективного контроля деформационно-волновых процессов, происходящих как по контуру обделки тоннеля, так и на сопряжениях временной крепи с породным массивом с учетом сложности его геологического строения и гидрологического режима [1, 2].

Реализация инструментальных измерений, предназначенных для оперативного и периодического мониторинга состояния временной крепи и обделки тоннеля с целью своевременного принятия мер по поддержанию ее постоянно в безопасном рабочем состоянии, осложняется тем, что места сопряжения возводимой временной крепи с породным массивом по окончании строительства недоступны для визуального контроля, поэтому наряду с дистанционными методами лазерного сканирования поверхности обделки целесообразно использовать “внутренний” — сейсмоакустический — контроль устойчивости бортов тоннеля и выборочное глубинное деформационное зондирование мест сопряжения с массивом через скважины с помощью специализированных многоканальных продольных деформометров [3].

Районирование горного массива по фактору сдвижения породных толщ, выполняемое для различных подземных сооружений (рудников, шахт, транспортных тоннелей и т. д.), свидетельствует о том, что крепь тоннеля с расположенными на ней инженерными коммуникациями на сопряжении с вмещающим породным массивом будет неизбежно подвергаться процессам деформирования, вызванным как проходческими работами при строительстве тоннеля, так и действием горного давления вмещающих пород, гидрологическими факторами, температурными влияниями окружающей среды, характером сейсмических воздействий подвижного состава при его эксплуатации или от землетрясений. Для оперативного контроля абсолютных смещений и деформаций как контура обделки тоннеля, так и сопряжений временной крепи с массивом при ведении проходческих работ и в период эксплуатации тоннеля актуальны задачи:

— *обоснования инструментальных наблюдений и выбора мест размещения измерительных станций, обеспечивающих получение достоверной информации о контролируемых геомеханических процессах в породном массиве и крепи тоннеля с возможностью интерполирования получаемых результатов между точками измерений как в пространстве, так и во времени;*

— *выбора способов и аппаратуры “местного” и дистанционного контроля деформаций;*

— *организации геомеханического мониторинга, обеспечивающего измерения как внутри породного массива, так и на выбранных участках сканируемой поверхности тоннеля с заданной последовательностью, точностью и периодичностью.*

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТОМУСИНСКОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТОННЕЛЯ

Отработка элементов методологии геомеханического мониторинга временной крепи выполнена на примере Томусинского железнодорожного тоннеля, сооружаемого в Новокузнецком районе Кемеровской области на 106–107 км участка Артышта–Томусинская Западно-Сибирской железной дороги параллельно действующему. Тоннель расположен на участке перергона Курегеш–Карлык в 30–35 км северо-восточнее Новокузнецка. Ближайший населенный пункт (пос. Есаулка) находится в 5–6 км от этого тоннеля.

Тоннель пересекает хребет Осинвая Гора (водораздел рек Есаулка и Абашева, рис. 1а) в самом узком месте межгорной котловины. Западный портал находится на 105 км ПКЗ + 06.92, восточный — на 106 км ПК4 + 76.15 (рис. 1б, 2). Строительство включает создание в качестве

второго пути нового однопутного тоннеля длиной 1157,96 м и многофункциональной дренажно-технической штольни. Тоннель является самым протяженным на Западно-Сибирской железной дороге. Сроки строительства: начало — май 2012 г., окончание — октябрь 2015 г.

Участок Артышта – Томусинская связывает крупнейшие углепогрузочные станции Кузбасса с западом и востоком страны. Он соединяет южные районы Кузбасса и Южно-Сибирскую магистраль с железнодорожной сетью России в обход Новокузнецкого железнодорожного узла. Тоннель позволит увеличить скорость грузовых поездов до 90 км/ч. К концу 2015 г. ОАО «РЖД» планирует увеличить пропускную способность южного хода Транссиба вдвое — для этого в 2012–2014 гг. проведена реконструкция участка Междуреченск – Тайшет.

Старый тоннель длиной 1157 м, возведенный в 1967 г., планируется законсервировать. Неустойчивость мягких грунтов, в которых он построен, привела к подвижкам и образованию множества трещин в стенах и своде; отсутствие водоотвода и недостаточная гидроизоляция тоннеля при строительстве способствуют обводнению и усиливают разрушения. Излом обратного свода приводит к деформациям железнодорожного пути, что влечет ограничение скорости проходящих составов. Одновременно ОАО «РЖД» готовит обоснование строительства здесь двухпутного участка, что потребует проведения реконструкции старого тоннеля.

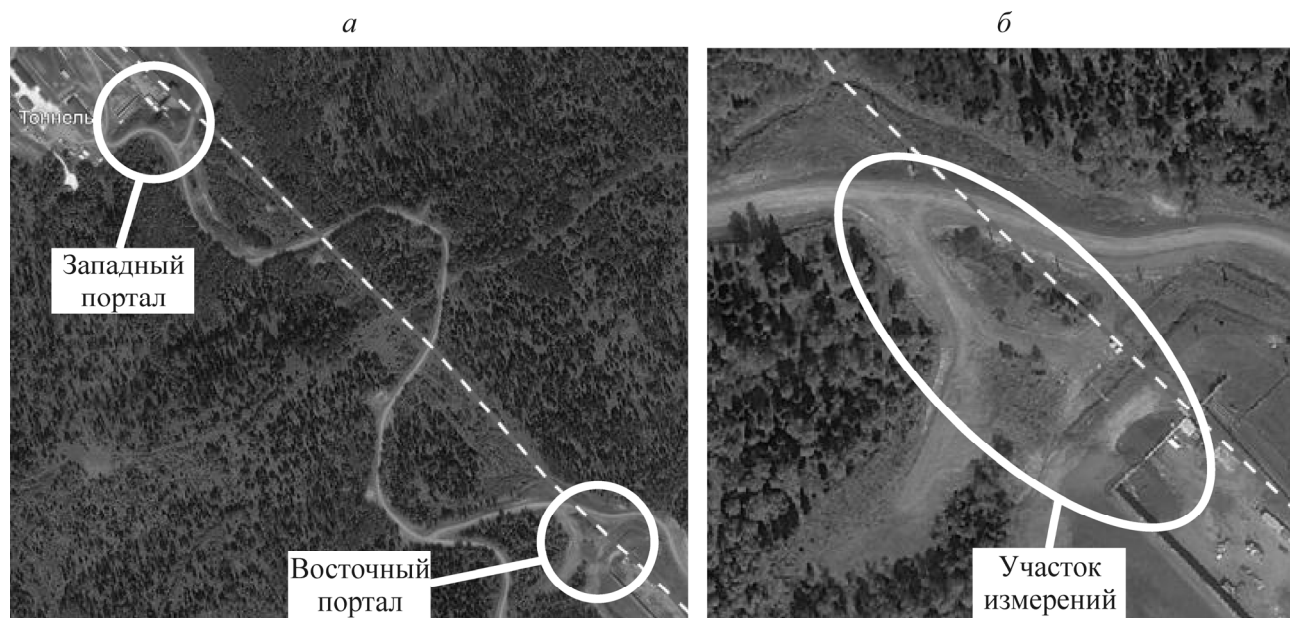


Рис. 1. План по карте Yandex пересечения строящимся Томусинским тоннелем хребта Осиновая Гора (а) и расположение его Восточного портала с указанием участка измерений (б). Штриховой линией обозначена железная дорога действующего тоннеля

ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫЕ, ТЕКТОНИЧЕСКИЕ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРОХОДКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТОННЕЛЯ

Геологическое строение правобережья р. Томь на юге Западной Сибири обусловлено длительным геологическим периодом формирования гор [2, 4]. Район к востоку от г. Новокузнецка Кемеровской области характеризуется залеганием плотных горных пород вблизи поверхности. В геологическом строении района принимают участие породы палеозойской группы пермской системы, представленные Ерунаковской свитой (P_2er). Его особенностью является наличие полезных ископаемых осадочного происхождения, формирующих месторождения антрацитов.

Коренные породы повсеместно перекрыты чехлом рыхлых четвертичных отложений. Отложения Ерунаковской свиты характеризуются “циклическим” строением, выраженным в чередовании алевролитов, песчаников, аргиллитов и пластов каменного угля. Им присуща хорошо выраженная слоистость, обусловленная осадконакоплением в лагунных условиях. Доминируют в разрезе алевролиты. Угольные пласты и пропластки имеют подчиненное значение.

- *Алевролит* — углеродистый, аркозового состава. Структура микрозернистая, текстура массивная или микрослоистая. Обломочный материал представлен зернами полевого шпата, кварца, кварцита, слюды, обломками эффузивов и углистым материалом. Цемент карбонатный, порового типа. Цвет алевролитов от серого до темно-серого. Алевролиты чрезвычайно трещиноваты в массиве — до щебенистой отдельности, на воздухе превращаются в щебенисто-дресвяную и чешуйчато-глинистую массу. Мощность слоев алевролитов достигает 87.3 м.

- *Песчаник* также углеродистый, аркозового состава. Структура мелкозернистая, текстура слоистая, тонкослоистая, реже массивная. Состав обломочного материала аналогичен алевролитам, но с меньшим содержанием углистого материала. Цемент глинисто-карбонатный порового типа. Цвет песчаника серый, светло-серый. Мощность слоев песчаников достигает 12.7 м.

- *Аргиллиты* в подчиненном объеме приурочены к угольным прослоям мощностью до 2.5 м на участке строительных работ и 1 м на участке Западного портала.

- *Уголь каменный* образует пропластки мощностью от долей сантиметра до 0.5 м и пласты мощностью до 4.1 м; в зоне сильнотрещиноватых пород (до глубины 50 м) угли сажистые, ниже по глубине — крепкие, трещиноватые со стекляннным блеском.

Мощность Ерунаковской свиты составляет от 650 до 1286 м.

- *Четвертичные отложения* на участке работ представлены склоновыми элювиально-делювиальными, болотными, аллювиальными отложениями и техногенными грунтами.

- *Элювиально-делювиальные отложения* ($e - dQ_{III-IV}$) выполнены глинистыми тонко- и грубодисперсными продуктами разрушения коренных пород общей мощностью до 11.5 м (в перевальной части массива) и около 1 м на Западном портале (после срезки при строительстве).

- *Болотные отложения* представлены органоминеральными сапропелями мощностью до 1 м.

- *Аллювиальные отложения* встречаются в разрезе западной предпоратальной выемки, где они слагают шовную часть перекрытого делювием фрагмента надпойменной террасы р. Есаулки.

- *Техногенные грунты* являются продуктами земляных работ, проводимых при строительстве околотоннельной инфраструктуры, и представлены в основном суглинками со щебнем, дресвой и местами — дресвяными грунтами.

Гидрогеологический разрез участка работ — это сложное чередование водоносных и водоупорных горизонтов с весьма изменчивыми фильтрационными свойствами пород. В разрезе выделяются два водоносных горизонта, гидравлически связанных между собой: горизонт порово-пластовых вод рыхлых четвертичных отложений и горизонт трещинных вод в раздробленных и сильнотрещиноватых пермских алевролитах.

- *Водоносный горизонт четвертичных отложений* залегает на глубинах от 0.3 до 3.8 м. Водовмещающими породами являются суглинки и супеси. Коэффициент фильтрации этих пород изменяется от менее 0.001 до 0.4 м/сут. Питание водоносного горизонта происходит за счет атмосферных осадков, разгрузка — в виде мочажин и ключей.

- *Водоносный горизонт верхнепермских алевролитов* размещается в основном до глубины 100 м. Водопроницаемость коренных пород около 1 м/сут. Питание водоносного горизонта

происходит за счет инфильтрации дождевых и талых вод, перетекания из вышележащего водоносного горизонта четвертичных отложений. Разгрузка подземных вод происходит в тоннель, на рельеф и в долину р. Томь.

• По химическому составу воды обоих горизонтов гидрокарбонатно-кальциевые, магниевые, пресные до ультрапресных.

Тоннель сооружается в зоне активного водообмена, где приток воды в него заметно увеличивается после прохождения дождей и таяния снега (весенне-летний и осенний периоды). В зимний период уровень подземных вод над тоннелем понижается, а приток воды в тоннель происходит за счет “срабатывания” их запасов и существенно стабилизируется.

В гидрологическом отношении железнодорожный тоннель по пикетам 1063 + 70 ÷ 1063 + 90 (рис. 2) находится в благоприятных условиях. Подтверждением является слабая влажность пород и отсутствие скоплений вод при проходке тоннеля. В целом на участке ведения проходческих работ основное развитие имеет безнапорный горизонт трещинно-жильных вод. Горизонт +245.7 м (отметка лотка тоннеля) частично обводнен. Отвод воды осуществляется из сервисно-дренажной штольни, где уровень воды находится на абсолютной отметке +243.7 м, водоприток в этом интервале достигает 0.2 м³/ч. Максимальный приток с учетом ливневых вод и атмосферных осадков достигает в данном интервале тоннеля 1 – 3 м³/ч.

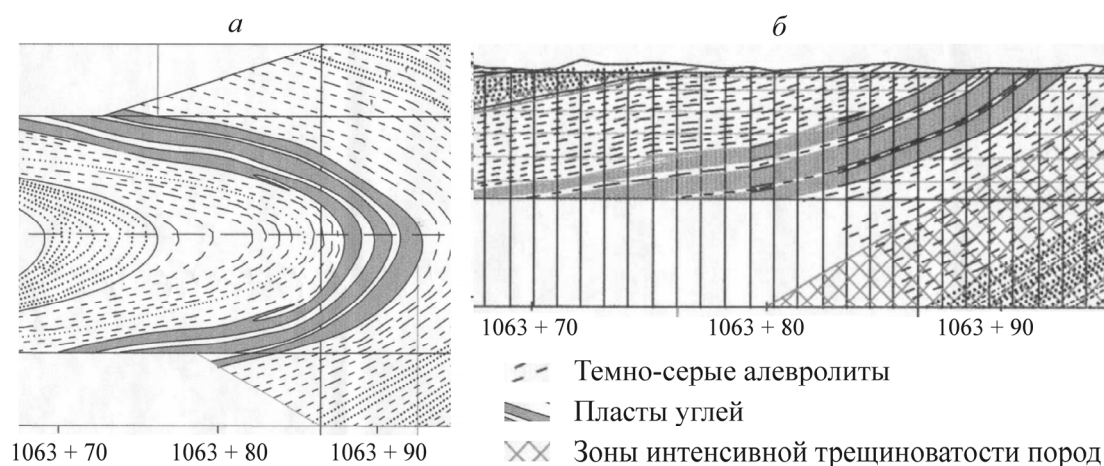


Рис. 2. План расположения пластов горных пород (а) и сечение массива по вертикали (б) над временной крепью по пикетам Восточного портала тоннеля

На надтоннельной поверхности происходят опасные природные процессы: овражная эрозия, оползни и сплывы. Овражной эрозией поражена практически вся надтоннельная поверхность. Овраги являются растущими, по их дну текут ручьи, размывающие грунтовый массив. Кроме того, на бортах оврагов происходят оползни и сплывы, из-за чего растет их ширина. Оползни и сплывы зафиксированы также на западном склоне гребня хребта Осиновая Гора, который трасса тоннеля пересекает на ПК 1058 – 1059. Вследствие сплывов перекрываются русла ручьев и образуются застойные водоемы, из которых вода фильтруется в тоннель.

Главное условие развития эрозионных процессов — большое количество атмосферных осадков, которых в районе тоннеля выпадает более 1000 мм в год.

В тектоническом плане район проходческих работ приурочен к южному выступу в структуре Томь-Терский мост между Присалаирским прогибом и Тутуясской впадиной Горно-Шорского прогиба, смыкающимся в районе г. Новокузнецка. На участке ведения работ отмечены проявления пликативных (северо-восточное крыло Байдаевской брахиосинклинали) и

дизъюнктивных (взбросы и сбросы) деформаций. Горный массив тоннельного пересечения представляет собой корытообразную складку угленосного флиша с северо-западным падением $5-7^\circ$ с крутыми бортами с обоих порталов до $35-45^\circ$, осложненную со стороны западного портала антиклинальной складкой.

Тектонические структуры алевролито-аргиллитовых толщ с пропластками угля изучены еще недостаточно. Разрывные нарушения в алевролитах и аргиллитах распространены достаточно широко и малоамплитудны. Амплитуда этих нарушений изменяется до нескольких метров. Им соответствуют широкие (в десятки метров) в основном послойные зоны дробления. Средне- и малоамплитудные разрывы в алевролито-аргиллитовой толще представлены различными морфологическими типами: преимущественно взбросами и надвигами, реже — сбросами и послойными перемещениями, проявляющимися в пропластках угля. Встречаются карстовые проявления, главным образом в приповерхностной части массива на контактах с осадочными грунтами.

Сейсмичность района проходческих работ оценивается в 7 баллов по “карте В” и 8 баллов по “карте С” согласно СНиП II-7-81 [5]. В структурном отношении породный массив, вмещающий железнодорожный тоннель, представляет собой моноклираль с азимутом падения 305° на северо-запад и углами падения $5-7^\circ$ [5], разбитую на блоки субвертикальными взбросо-сбросами субмеридианального простирания. Согласно приложению № 9 СНиП II-7-81 [5], сейсмичность района проходки тоннеля отнесена к 7-балльной.

Район работ по строительству тоннеля в соответствии с ВСН 190-78 (таблица 1) [6] относится к I группе сложности по инженерно-геологическим условиям.

Слагает моноклираль угленосный флиш Ерунаковской свиты, представленный алевролитами с прослоями песчаников, аргиллитов и углей. Тоннель проходит вкрест простирания к пологонаклонной моноклинали; напластование к стенкам выработок благоприятное.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРОКЛАДКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТОННЕЛЯ

Коренные породы верхнепермского возраста представлены угленосным флишем (алевролиты с прослоями песчаников, аргиллитов и углей). В интервале ПК 1056+50.0 — ПК 1064+35.5 тоннеля (II путь, I очередь) располагаются породы средней прочности с прослоями малой прочности, средней устойчивости, трещиноватые слабовыветрелые. Коэффициент крепости пород по шкале М. М. Протождяконова $f = 4$, категория по разработке V [1–2, 4–6].

Подсекаемую тоннелем толщу пород составляют в основном отложения Ерунаковской свиты, представленные в месте нахождения пикетов 1063+70–1063+90 темно-серыми и серыми алевролитами и аргиллитами, вмещающими три пласта угля общей мощностью 3.5 м с пропластками алевролитов 0.25–0.65 м. Угол падения пород выполаживается от 40 до $10-7^\circ$ по направлению проходки. Порода трещиноватая и сильнотрещиноватая по аргиллитам, средней прочности и устойчивости при проходке, $f = 2-4$ IV–V категории по разработке (65%), по углям $f = 1-1.5$ III категории (35%). Трещины разноориентированные, протяженные.

Горный массив расположения Восточного портала тоннеля разведан до горизонта +235.5 м. Горизонт проходки тоннеля имеет отметку +245.7 м. Налгающая породная толща сложена сравнительно однородными по механическим свойствам алевролитами и аргиллитами с крутым моноклиральным падением, перемежается пропластками угля с незначительными западинами. Кровля алевролито-аргиллитовой толщи имеет неровную поверхность.

Вскрыты три пласта каменного угля общей мощностью 2.8–3.35 м с пропластками аргиллитов и алевролитов от 0.25 до 0.65 м. Углы падения выполаживаются с $35-40$ до $5-7^\circ$ по ходу проходки. Угли трещиноватые и сильнотрещиноватые. В подошве угольных пластов — алевролиты и мелко-тонкозернистые песчаники, сильнотрещиноватые, до раздробленных.

Алевролиты по внешнему виду массивные, крепкие, с неровным изломом, мелкозернистые, текстура чешуйчатая из-за сложного расслоения, окраска изменчива — от темно-серой до бурой, в восточной части тоннеля распространены прослой бурого угля, иногда почти черного, тонкокристаллического, местами мелкокристаллической текстуры. На участках скрытокристаллического строения наблюдаются редкие прожилки белого крупнокристаллического кальцита.

О ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТОННЕЛЯ

Строительство железнодорожного тоннеля осуществляется классическим способом нижнего уступа: экскавация калотты высотой 5.3 м механизированным способом заходками по 1 м, экскавация штроссы высотой 4.5 м механизированным способом заходками 1 м сначала южной части с монтажом временной крепи, затем северной. Данный вариант достаточно широко распространен в практике тоннелестроения, особенно для тоннелей большого сечения и протяженностью более 1 км.

Такой способ проходки применяют в строительстве крупных тоннелей при высоте выработки более 10 м и с основанием в крепких скальных грунтах с коэффициентом крепости $f > 4$. Вариант нижнего уступа можно применять также в трещиноватых грунтах средней крепости ($2 < f < 4$) в связи с возможностью использования надежных конструкций временной крепи.

Разработку грунта калотты выполняют проходческим комбайном Sandvik MT-520 (рис. 3а) на всю длину тоннеля от Западного и Восточного порталов навстречу друг другу. Монтаж временной крепи осуществляют после экскавации грунта на длину назначенной заходки. После сбойки забоев приступают к экскавации грунта штроссы.

При удалении забоя штроссы от портала тоннеля на расстояние не менее 210 м производят постоянную обделку подковообразного очертания с отставанием бетонирования обратного свода от постоянной обделки на расстояние 70 м. Для бетонирования обделки используется передвижная металлическая опалубка “Сага-Когио” с захватом бетонирования 12 м. Две технологические тележки для устройства работ по монтажу гидроизоляции и арматурных каркасов постоянной обделки располагаются впереди опалубки.

В зависимости от инженерно-геологических условий применяют комбинации нескольких видов временных крепей в продольном и поперечном направлениях:

— *металлическая арка*, раскрепленная клинощелевыми анкерами (грунты с коэффициентом крепости $f > 4$). Пространство между арками заполняется бетоном;

— *нанесение набрызг-бетона* на забой и металлическая арка, раскрепленная клинощелевыми анкерами, в сочетании с опережающей анкерной крепью (рис. 3) и заполнением пространства между арками бетоном (в грунтах с коэффициентом крепости $1.5 < f < 2$).

На участке пикетов 1063 + 70.0 ÷ 1063 + 80.0 (см. рис. 2) аргиллиты и алевролиты (коэффициент крепости $f = 2 - 4$, плотность 2.56–2.6 т/м³) вмещают три пропластка угля (коэффициент крепости $f = 0.8 - 1.2$, плотность 1.27–1.33 т/м³). При проходке этого участка проведены мероприятия по устройству временной крепи из двутавровой металлической арки, раскрепленной анкерами с заполнением пространства между арками бетоном (как для грунта с коэффициентом крепости $f = 2 - 4$). При такой технологии монтажа временной крепи вывалов и обрушений в обнаженной выработке не было.

На участке пикетов 1064 + 03.00 ÷ 1064 + 16.00 транспортное сооружение расположено в слабоустойчивых грунтах с коэффициентом крепости $f = 1 - 2$. Временная крепь выполнена аналогично предыдущему примеру. На участке с использованием временной крепи произошел

вывал грунтового массива. Это свидетельствует о необходимости применения опережающего крепления грунтового массива (например, анкерной крепью), а также проведения геомеханического мониторинга в проблемных участках при строительстве тоннеля.

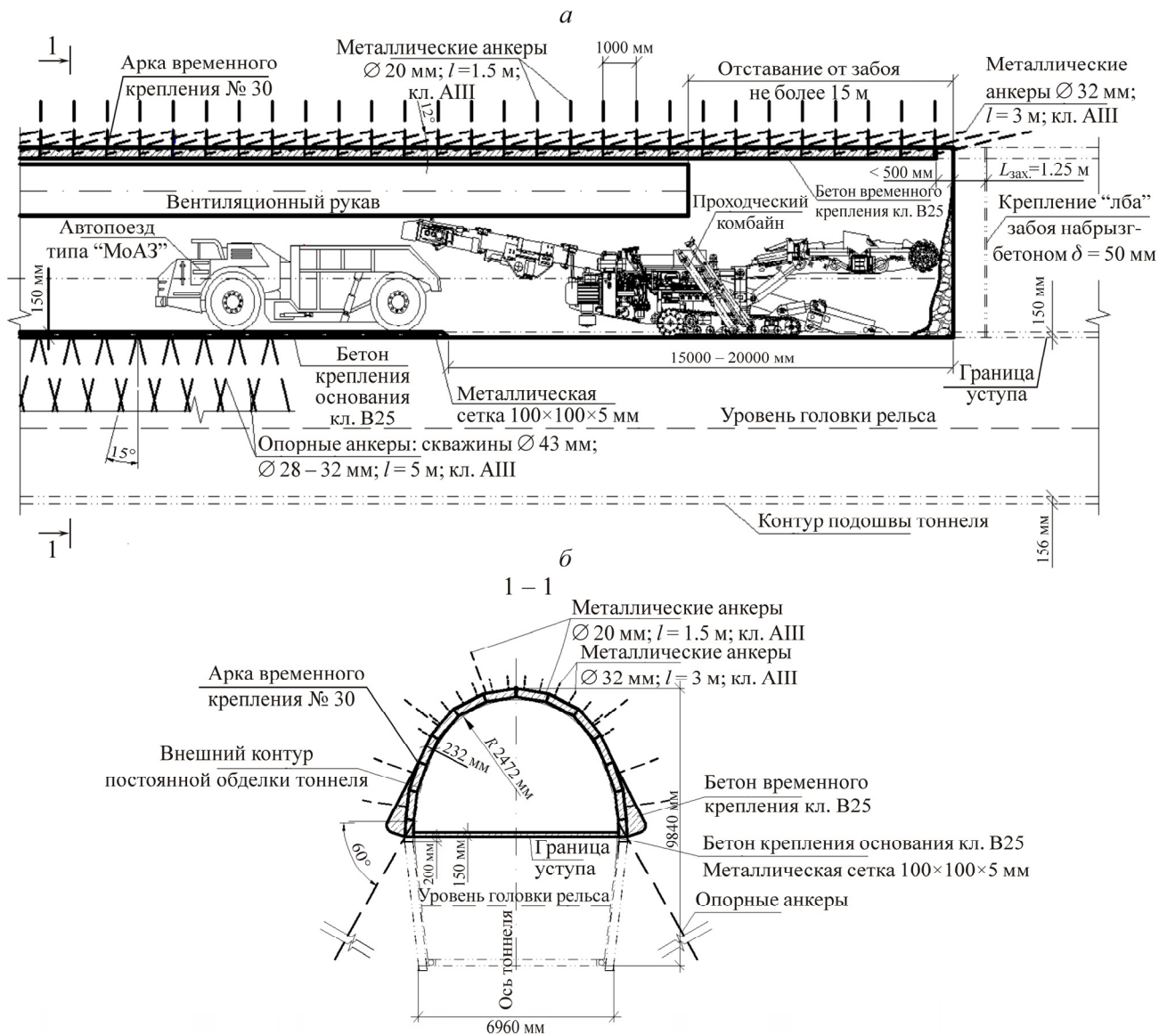


Рис. 3. Продольный разрез выработки по трассе тоннеля со схемой разработки калотты проходческим комбайном и подъездом автопоезда для выгрузки забоя (а); поперечный разрез выработки с определением зоны сопряжения калотты и штроссы, дополнительно закрепляемой бетоном для стабилизации пород по внешнему контуру временной крепи (б)

Следует отметить, что при выполнении проходческих работ в условиях изменения инженерно-геологических условий необходимо особое внимание уделять безопасности проходки от процессов, вызванных изменением напряженно-деформированного состояния грунтового массива (вывалообразование, горные удары и т. п.). Такие процессы могут являться следствием влияния на грунтовой массив внешних факторов (например, строительство в условиях геодинамически активных зон Кузбасса, нахождение в непосредственной близости от объекта строительства железнодорожных путей с высокой пропускной способностью и преимущественно грузовым подвижным составом и др.).

С этой целью по трассе пикетов 1063 + 70.00 ÷ 1063 + 90.00 методом лазерного сканирования на месте строительства железнодорожного тоннеля проведен пробный мониторинг поверхности временной крепи. Подобное сканирование позволяет своевременно определить деформации, вызванные разрушением грунтового массива в ее окрестности, и выполнить предупредительные мероприятия для предотвращения возрастания этих деформаций. Метод лазерного сканирования требует сохранения маркируемых опорных точек в тоннеле.

МЕТОД ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ КАК ЭЛЕМЕНТ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Исходя из требуемой точности измерений деформаций в привязке к структурному строению горных пород, в качестве основного метода при геомеханическом мониторинге поверхности обделки тоннеля в современных условиях следует применять периодическое лазерное сканирование, что в сочетании с тахеометрическим контролем смещений разнесенных в пространстве опорных точек (меток) сканирования относительно геодезических реперов позволяет создавать достаточно точную объемную цифровую модель объекта съемки, представляя его набором точек с пространственными координатами в жесткой привязке к маркшейдерским координатам. Накопление экспериментальных данных об изменениях поверхности обделки тоннеля с требуемой периодичностью и в сочетании с сейсмическими, а также деформационными измерениями дает возможность контролировать техническое состояние тоннеля.

Метод лазерного сканирования основан на измерении расстояния до объекта и двух углов — горизонтального и вертикального, позволяющих вычислять пространственные координаты каждой его точки. Излучатель лазерного сканера генерирует пучок когерентных электромагнитных волн оптического диапазона, который отражается от поверхности снимаемого объекта и возвращается в приемник (рис. 4а). Одновременно с генерацией оптического сигнала излучатель посылает сигнал “старт”, который поступает в электронный блок обработки оптических сигналов; в этот же блок поступает сигнал “стоп” от приемника, когда он получает отраженный от объекта сигнал. Излученный и принятый сигналы сравниваются, и по скорости света и времени “задержки” вычисляется фактическое расстояние до каждой точки объекта [7].

На рис. 4б показана точечная цифровая модель поверхности внутреннего контура временной крепи тоннеля при его проходке, представленная набором точек сканирования с шагом 50 мм; пространственные координаты определены с точностью в первые миллиметры.

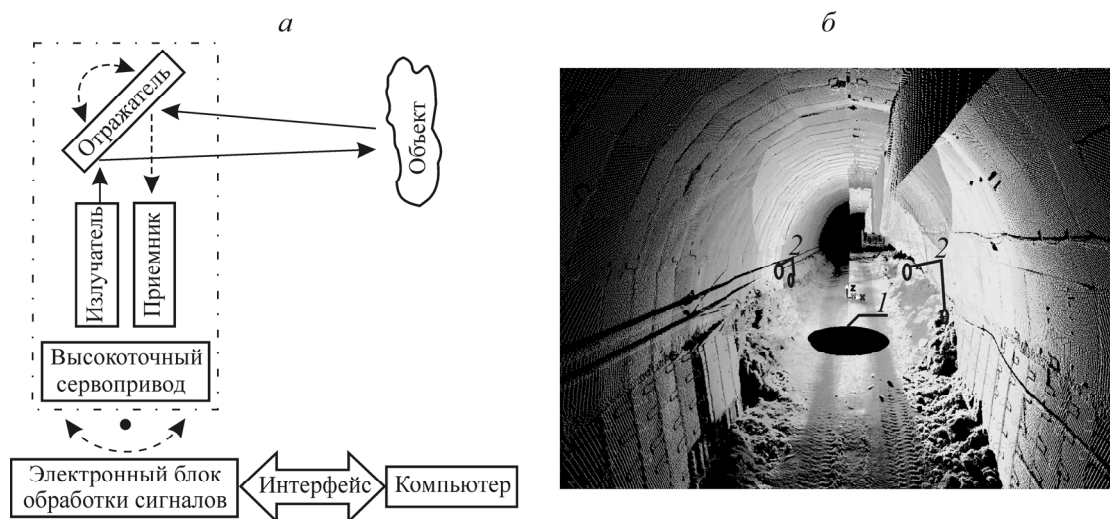


Рис. 4. Принцип работы лазерного сканера (а) и организация сканирования порталного участка тоннеля на сопряжении временной крепи с породами штроссы (б): 1 — станция стояния сканера в тоннеле; 2 — места размещения маркируемых опорных точек 1–4 на поверхности крепи

Достоинство этого метода заключается в том, что дистанционное лазерное сканирование позволяет создавать первоначальную “маску” объекта, так как в перспективе он может оказаться скрытым. Использование этой “маски” обеспечивает в дальнейшем сопоставление новых сканов и определение фактических смещений и деформаций видимого контура объекта относительно исходной “маски”. При этом для последующих сканирований следует сохранять реперы и маркируемые опорные точки, привязанные к маркшейдерским координатам.

Мониторинг геометрических параметров поверхности обделки тоннеля методом лазерного сканирования позволяет путем сопоставления фактических трехмерных моделей контролируемых участков крепи, полученных в различных сериях наблюдений, определять произошедшие за период времени между наблюдениями смещения немаркированных точек и выделять зоны “аномальных” изменений формы поверхности крепи. Схему такого контроля иллюстрирует рис. 5, где показано совмещение контуров обделки и временной крепи. С учетом привязки к маркшейдерским координатам это дает возможность выявлять фактические отклонения геометрических форм от проектных при осадке бетона во время строительства. Таким образом, регулярное сканирование обделки в процессе строительства и эксплуатации тоннеля обеспечивает периодический контроль ее смещений и позволяет локализовать зоны возможных обрушений.



Рис. 5. Пример совмещения сканов поперечного контура обделки и временной крепи для контроля осадки бетона

Весь процесс съемки сканером автоматизирован, оператор вводит параметры сканирования: граничные углы в вертикальной и горизонтальной плоскостях, задает дискретность съемки. Данные измерений записываются в компьютер и отображаются на мониторе. Сканирование позволяет получать объемную цифровую фотореалистичную модель на расстояниях от нескольких до 130 м (сканер Scan Station 2 фирмы Leica, Швейцария) за время от первых до сотен минут — в зависимости от требуемой плотности точек для выбранной станции стояния. Результатом является массив точек сканирования с пространственными координатами в системе, направление осей которой определяется конструкцией прибора и его ориентацией в пространстве.

Для обеспечения съемки в тоннеле и во избежание появления теневых зон, обусловленных выступающими элементами объекта, сканирование проводится с двух и более станций стояния [8, 9]. Связь данных сканирования основана на использовании системы постоянных опорных меток, устанавливаемых на поверхности крепи в соответствии с планом размещения станций стояния сканера в тоннеле. При объединении данных, полученных с разных станций стояния, увеличивается плотность массива точек за счет перекрытия сканов. Увеличение плотности измерений позволяет после фильтрации и разрежения данных в процессе обработки получить массив точек, достаточно точно и полно описывающий поверхность крепи.

Поскольку сканирование в тоннеле производится с нескольких станций стояния, перед началом съемочных работ их совместно с опорными метками необходимо закоординировать в принятой на объекте системе координат. Передача координат на станции лазерного сканирования может осуществляться с использованием опорной маркшейдерской сети (ОМС) [9, 10]. По окончании работ по сканированию объекта выполняется камеральная обработка данных.

С разных точек стояния сканера получают по одному и более скану — массиву точек в трехмерной системе координат. Все сканы, таким образом, получаются в разных системах координат и каждый описывает только часть поверхности снимаемого объекта. На первом этапе обработки необходимо ориентировать все сканы в единую внешнюю систему координат, чтобы иметь представление об объекте в целом и обрабатывать данные со всех станций совместно.

Для мониторинга за деформированием обделки тоннеля размещение станций стояния сканера производится с использованием уже принятых маркируемых опорных точек, расположенных в области сканирования с привязкой к маркшейдерским реперам. В зависимости от принятой системы сканирования сшивка сканов в единую цифровую модель проводится с помощью общих маркируемых опорных точек — плоских и сферических меток или мишеней.

Плоские мишени устанавливаются на смежные со станцией сканирования реперы, координаты которых определены с высокой точностью. Сферические мишени расставляются вблизи объекта сканирования таким образом, чтобы с каждой станции обеспечивалась видимость не менее четырех мишеней. В результате сшивка производится по общим точкам на соседних перекрывающихся сканах по сферическим мишеням. Для центрирования и ориентирования сшитой модели в пространстве используются плоские мишени с известными координатами.

ИЗМЕРЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ВРЕМЕННОЙ КРЕПИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ИЕРАРХИИ БЛОКОВ НА СОПРЯЖЕНИИ С ПОРОДНЫМ МАССИВОМ

Результатом измерений, выполненных с интервалом 3 мес в период строительства, являются две объемные цифровые модели порталного участка восточной части тоннеля, с которыми можно производить различные математические операции. “Вычитание” объемных моделей по схеме, показанной на рис. 5, позволяет, например, определить характер деформирования поверхности обделки в процессе усадки бетона, что важно для решения возникающих геомеханических задач по обеспечению безопасной эксплуатации железнодорожного тоннеля.

Данные сканирования тоннеля анализировались с помощью программы I-Site Studio, обеспечивающей распознавание структурных нарушений и их визуальное отображение посредством цветовых раскрашиваний поверхностей с различной “интенсивностью” значений отклонений, углов падений и простираций. Количество сканированных точек при этом может составлять от сотен тысяч до миллионов. Окрашивание, согласно отклонениям точек сканируемых поверхностей, позволяет идентифицировать и отображать трещины и другие нарушения сплошности, образовавшиеся в структуре контролируемого объекта за период наблюдений.

Результаты расчета отклонений поверхности участка тоннеля, сканированной с интервалом 3 мес, показаны на рис. 6. Объемная модель поверхности разделена на северный и южный борт и сравнивалась по фрагментам. Триангуляция бортов выполнена сферической. Второе сканирование проведено с большей плотностью, чем первое, поэтому экспериментальные данные прорежены до плотности, принятой при первом сканировании. Иначе получалась “тяжелая” триангуляция, и компьютер не справлялся с анализом. В результате значимые отклонения зафиксированы на открытых участках массива в пределах от –200 до +200 мм, а геометрические изменения поверхности пород по штрассе связаны с отделением блоков.

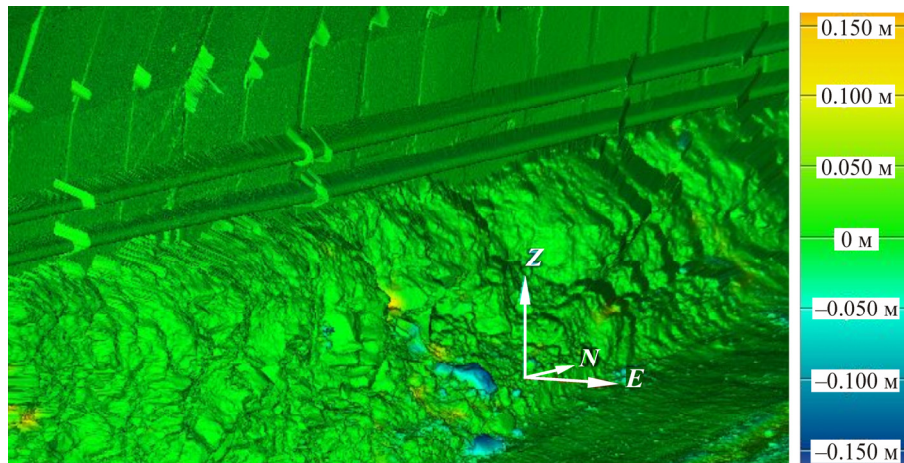


Рис. 6. Карта отклонений в положении поверхности южного борта железнодорожного тоннеля, сканированной с интервалом 3 мес. На цветовой шкале показан масштаб линейных отклонений

На поверхности временной крепи порталного участка тоннеля значимых отклонений не зафиксировано, что свидетельствует об ее устойчивости по отношению к действующему уровню горного давления со стороны массива и качественном выполнении строительных работ.

Используемая в данном случае система деформационного мониторинга и выполненные на основе измерений расчеты позволяют определять направления падений и простирания отдельных породных слоев и трещин в массиве, прогнозировать ожидаемое их развитие по глубине законтурного пространства при разработке штроссы (составлять диаграммы углов падений по алевролиту и углю, наблюдать стабильность состояния обделки при эксплуатации тоннеля).

Анализ проведенных изменений позволяет оценить как величину, так и скорость перемещений точек поверхности временной крепи во времени, создавая цветовую карту отклонений текущей геометрии поверхности от ранее сканированной, а также экспортировать полученные данные для дальнейшего анализа в другие информационные системы [10, 11].

Карта геометрических отклонений поверхности, сканированной в разные периоды времени, дает возможность установить зоны поверхности временной крепи тоннеля и сопрягаемого массива, которые маркируют отклонения, превышающие заданный критический уровень. Для большей достоверности проводимого анализа сканирование следует вести последовательно с нескольких станций стояния, так как по краевым участкам получаются обычно большие отклонения, приводящие к некоторым искажениям. При этом масштаб сканирования необходимо выбирать с учетом минимизации искажений и выдерживать одинаковым.

При лазерном сканировании исходный — «опорный» цикл измерений геомеханического состояния временной крепи тоннеля целесообразно проводить в уплотненном режиме. Съемку необходимо выполнять от центральной оси тоннеля, а расстояние между станциями стояния и опорными метками по длине тоннеля выбирать в пределах 30 м, обеспечивая перекрытие сканов не менее 25 %; рабочую плотность сканирования в «опорном» цикле принимать 5×5 мм на предельных расстояниях в соответствии с максимальной точностью сканера. Это обеспечивает формирование «маски» скрытого объекта (в данном случае временной крепи), которая в дальнейшем используется для подробного анализа механического состояния обделки тоннеля.

Последующие (рабочие) серии измерений могут проводиться по программе исходной серии наблюдений, но по более разреженной (например, 50×50 мм) измерительной сетке. Операции по разрежению точек, вычитанию цифровых моделей и визуализации выполняют с помо-

щью программ обработки Cyclone и I-Site Studio. Результаты измерений могут быть представлены графически в различных видах: сечения по поперечным и радиальным плоскостям; объемная деформационная модель; отдельные изолинии; изменения объема, сечений и др.

Для оценки отклонений мест установки маркируемых опорных точек сканирования проведена тахеометрическая проверка их маркшейдерских координат при первом сканировании (замер 1) и через 3 мес (замер 2). Результаты измерений приведены в табл. 1, где E , N , Z — оси координат по карте отклонений на рис. 6. Сравнение полученных данных показало, что измеренные отклонения находятся в пределах погрешности и не оказывают существенного влияния на эксплуатационную надежность тоннеля.

ТАБЛИЦА 1. Результаты измерений координат маркируемых опорных точек сканирования

Номер замера	Координата	Координаты репера, м			
		1	2	3	4
1	E	–1444.745	–1435.257	–1438.874	–1444.034
	N	2501.440	2495.363	2489.381	2492.765
	Z	248.112	249.494	248.992	249.713
2	E	–1444.744	–1435.259	–1438.874	–1444.033
	N	2501.439	2495.365	2489.381	2492.767
	Z	248.114	249.497	248.996	249.715

По данным лазерного сканирования штроссы, полученным с шагом 5×5 мм, определены и показаны на рис. 7а линейные размеры выделенных структурных блоков по алевролиту и углю, слагающих породный массив в месте проходки Восточного портала тоннеля, а на рис. 7б — графики, характеризующие их блочное строение (N_{Δ} — количество блоков i -й породы данного линейного размера, встречающихся при измерениях; Δ — линейный размер блока, см). На рис. 7в приведено группирование структурных блоков по линейным размерам, тяготеющим с 15 % “погрешностью” к канонической шкале их иерархических представлений [8, 12].

Из сравнения гистограмм распределений рис. 7б, в следует, что модальные значения размеров соответствующих структурных блоков по алевролитам и углю различаются примерно в 2–2.3 раза (~ 14 см против ~ 6 см — по максимумам соответствующих выборок).

Таким образом, проведение натуральных наблюдений за изменениями пространственных геометрических параметров временной крепи и обделки железнодорожного тоннеля методом лазерного сканирования позволяет путем сопоставления фактических моделей поверхности, полученных в отстоящие во времени периоды наблюдений (3 мес), определить смещения немаркированных ее точек и изменений формы обделки тоннеля в целом.

Полученные в результате сканирования трехмерные модели временной крепи и обделки тоннеля предполагается в дальнейшем использовать для решения следующих задач:

— детальное изучение структурно-иерархического строения горных пород, слагающих массив, с определением характера геомеханических проявлений выделяемых тектонических нарушений по данным сканирования штроссы;

— мониторинг деформаций обделки тоннеля в процессе строительства (с получением отклонений ее поверхности от исходного положения при усадке) и мониторинг проблемных участков обделки на стадии последующей эксплуатации тоннеля (с получением параметров реального деформирования в виде объемной модели, плотность которой, в отличие от дискретной по реперам наблюдательных станций, может варьировать в широких пределах).

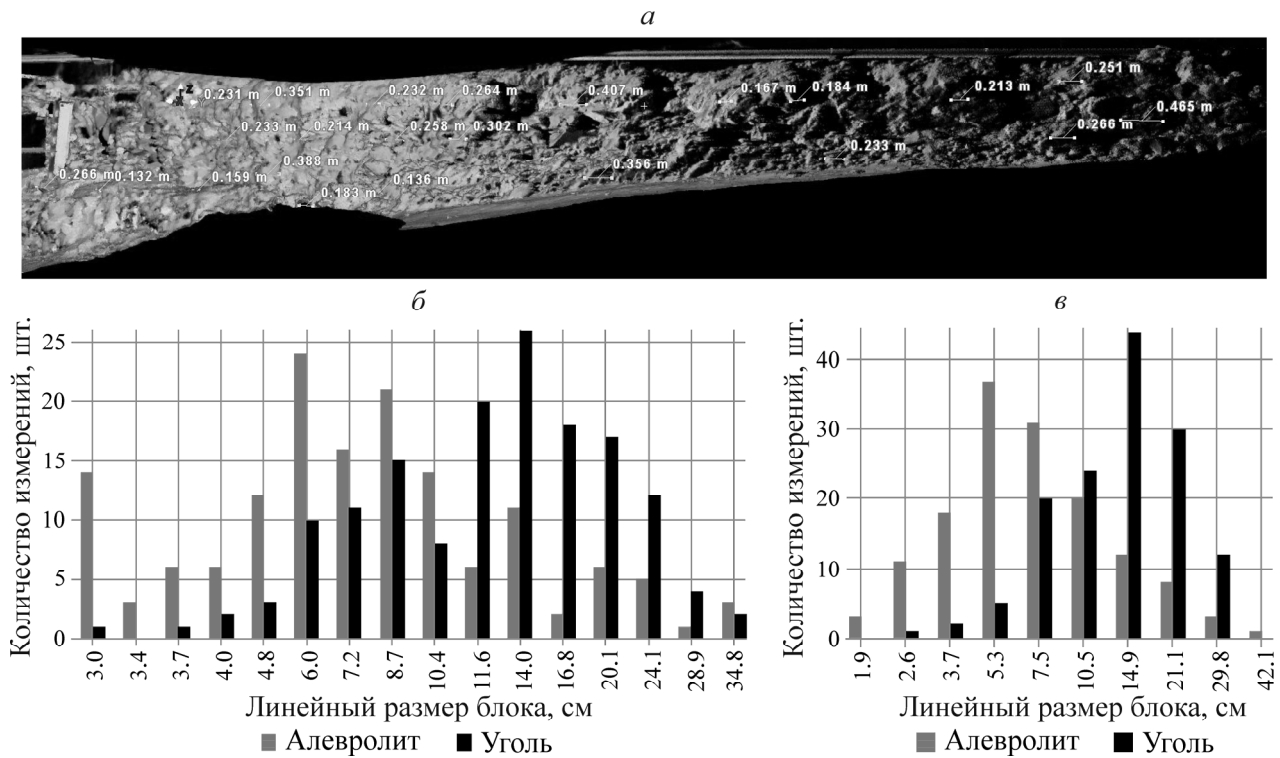


Рис. 7. Фрагмент сканированной поверхности борта тоннеля с выделением линейных размеров блоков по штрессе (а); гистограммы распределения выделенных блоков по линейным размерам для алевролита и угля (б) и группирование их по линейным размерам, тяготеющим с 15 % погрешностью к канонической шкале по [12] (в)

СЕЙСМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ С ВРЕМЕННОЙ КРЕПЬЮ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТОННЕЛЯ

Условия эксплуатации железнодорожного тоннеля существенно влияют на напряженно-деформированное состояние его крепи на сопряжении с породным массивом и могут сказываться на интенсивности проявлений сопутствующих отрицательных эффектов при действии горного давления в налегающих породах. Высота налегающих пород в месте проведения эксперимента у Восточного портала достигает 30 м; максимальное превышение пород при длине тоннеля 1260 м составляет 120 м. Это относится не только к деформированию контура обделки тоннеля, но и к нарушениям сплошности массива вне этого контура в пределах свода обрушения (согласно [1]), вызванным динамическими воздействиями при движении железнодорожного состава и их проявлениями на поверхности контакта временной крепи с породой.

Для диагностики геомеханического состояния отмеченной зоны использовались полученные в эксперименте динамико-кинематические характеристики упругих колебаний, вызванных импульсными воздействиями в зоне контакта временной крепи с породой. Параметры распространения сейсмических колебаний в породном массиве в пределах свода обрушения представляют также значительный интерес и при контроле устойчивости устанавливаемой конструкции крепи транспортного тоннеля на действие динамических нагрузок разного уровня.

При эксплуатации тоннеля нарушения временной крепи на сопряжении с породами массива от динамических воздействий подвижного состава могут выявляться с помощью глубинного сейсмического зондирования на основе анализа характера распространения сейсмических волн в конкретных горнотехнических условиях [1, 5] с учетом доступности измерений в породном

массиве. Между тем задача повышения устойчивости временной крепи и обделки тоннеля требует более общего методического подхода к решению данного вопроса. Это возможно на основе изучения реального механизма разрушения окрестных горных пород. Здесь существенное значение имеет экспериментальная оценка параметров распространения сейсмических волновых пакетов на сопряжении временной бетонной крепи тоннеля с массивом пород.

Для получения натурной информации о параметрах распространения сейсмических волн в структурных геосредах необходимо определить влияние на их динамико-кинематические характеристики энергии механического возбуждения, наличия зоны разрушения и естественной трещиноватости пород. Ниже представлены результаты такого анализа на примере импульсного источника сейсмической волны, генерируемой тарированными по энергии ударами бойка по временной бетонной крепи на сопряжении с алевролитами и угольным пропластком штрассы.

Схема эксперимента и измерительная аппаратура. Для оценки влияния динамических воздействий при движении железнодорожного состава на механическое состояние временной крепи и постоянной обделки транспортного тоннеля сейсмическим методом в эксперименте изучались особенности эволюции динамико-кинематических характеристик распространения упругих волновых пакетов на сопряжении крепи с породами массива различной плотности на примере южной стены порталного участка Томусинского тоннеля на отметке гор. +245.7 м (рис. 8а — внешний вид временной крепи тоннеля). Здесь горизонт штрассы по породам представлен алевролитами, сопряженными с выположенными пропластками угля. Такие пропластки имеют мелкозернистую структуру, “спрессованы” горным давлением и при механических воздействиях легко разрушаются, становясь достаточно рыхлыми. Характеристики крепости пород приведены выше.

На рис. 8б показана схема расстановки сейсмоприемников в эксперименте с измерением сейсмических сигналов от ударов бойком с кинетической энергией 34 Дж по бетонной крепи. Запись упругих колебаний выполнялась сеймостанцией “Лакколит 24-М” [13] с использованием сейсмоприемников GS20-DX в количестве 6 шт., установленных по бетону стены временной крепи тоннеля (сейсмоприемники 1, 2), бетону временного крепления на сопряжении с алевролитом (сейсмоприемник 3) и породам массива (сейсмоприемники 4, 5 — алевролит; 6 — уголь) с ориентацией оси максимальной чувствительности вертикально к почве и интервалами расстояний в метрах. Длина трассы измерений составила 25.8 м.

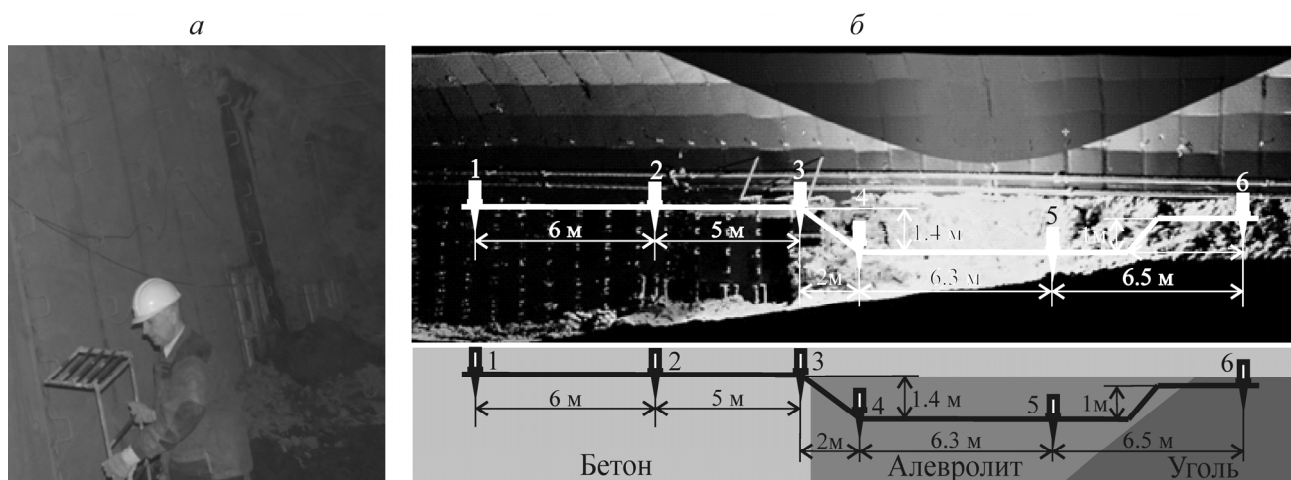


Рис. 8. Фотография временной крепи Восточного порталного участка железнодорожного тоннеля “Томусинский” вблизи сопряжения с породами (а) и скан сопряжения крепи с породным массивом, совмещенный со схемой расстановки сейсмоприемников (б)

Анализ сейсмических волновых пакетов. Принятая ориентация сейсмоприемников позволяет регистрировать вертикальную компоненту сейсмической волны. Возбуждения упругих волновых пакетов производились ударом бойка по армированной бетонной площадке стены временной крепи на расстоянии ~ 6 м слева от сейсмоприемника 1. Как показано в работе [12], наиболее качественные записи сейсмических сигналов от источников импульсного типа для расстояний порядка 30–50 м обеспечивают удары с энергией ~ 34 Дж и более. На рис. 9 приведены натурные сейсмограммы с соответствующим годографом первых вступлений волнового пакета. Записи масштабированы с указанием модуля максимальной амплитуды скорости колебаний по каждому каналу. Годограф определен по первым вступлениям волны и показан ломаной линией. Для связи со схемой на рис. 8б приведена шкала расстояний от точки нанесения удара до каждого из соответствующих сейсмоприемников по трассе измерений.

На записи сейсмограмм видно, что по мере распространения упругого волнового пакета с удалением от места нанесения удара по временной крепи на участке между сейсмоприемниками 1, 2 амплитуда сигнала снижается в 6–8 раз (для повторных ударов используемой энергии этот показатель слабо варьирует в указанных пределах и обусловлен образованием “наклепа” на бетоне во время удара). При этом на участке между сейсмоприемниками 2, 3 амплитуда сейсмического сигнала снижается от 1.2 до 2.6 раз. Следует отметить, что бетон временного крепления (см. рис. 3б), на который установлен сейсмоприемник 3, прочно соединен с массивом алевролита и бетонной секцией временной крепи на переходе к породам штрассы.

На участке между сейсмоприемниками 3, 4 алевролит сильно трещиноват (это связано с проходкой Восточного порталного участка в начале строительства с помощью взрывов); здесь амплитуда сейсмического сигнала снижается приблизительно в 4 раза. По породам алевролита и при переходе в угольный пропласток изменение амплитуды сигнала не превышает 1.7 раза.

По годографу сейсмического сигнала на рис. 9 вычислены кинематические параметры скорости распространения “вертикальной” компоненты упругого волнового пакета в бетоне временной крепи и сопряженном породном массиве по алевролиту и углю. В табл. 2 представлены ее значения как на интервалах между сейсмоприемниками, так и вдоль трассы измерений в целом.

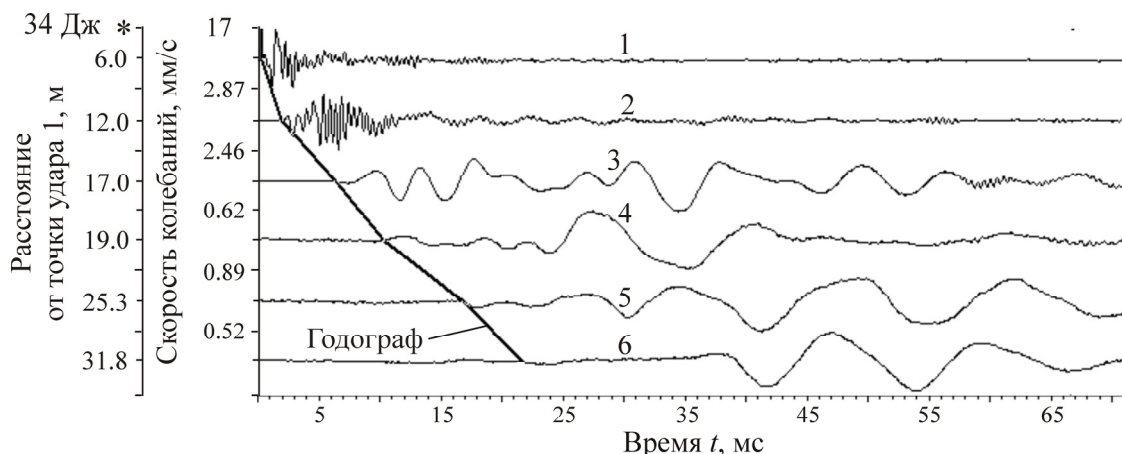


Рис. 9. Сейсмические сигналы, зарегистрированные в тоннеле сейсмоприемниками 1–6 при ударе бойком с кинетической энергией 34 Дж по бетонной стене временной крепи на удалении 6 м от сейсмоприемника 1 (*); скорость колебаний на расстоянии 6 м от точки удара 17 мм/с

“Эффективная” скорость упругого волнового пакета вдоль трассы с удалением от места нанесения удара снижается приблизительно в 3.5 раза. Скорость на интервалах между сейсмоприемниками также (немонотонно) снижается, но существеннее, приблизительно в 7.8 раза. Это

объясняется как различием физико-механических свойств бетона временной крепи (класс В25) и материала сопрягаемых горных пород, так и наличием граничных переходов между относительно высокоскоростной (бетон) и низкоскоростной (трещиноватые алевролиты, уголь) средой, причем в совокупности на изменение интервальной скорости эти факторы влияют сильнее, чем на скорость распространения волнового пакета вдоль трассы.

ТАБЛИЦА 2. Результаты определения скорости распространения упругого волнового пакета по трассе расстановки сейсмоприемников в целом и на отдельных измерительных интервалах

Номер канала	Время вступления волны, мс	Расстояние по трассе, м	Время по трассе, мс	Скорость волны по трассе, км/с	Длина интервала, м	Время на интервале, мс	Скорость волны на интервале, км/с
1	4.8	0	0	—	0	0	—
2	6.5	6	1.7	3.53	6	1.7	3.53
3	11	11	6.2	1.77	5	4.5	1.11
4	15.4	13	10.6	1.23	2	4.4	0.45
5	20.7	19.3	15.9	1.21	6.3	5.3	1.19
6	30.1	25.8	25.3	1.02	6.5	9.8	0.66

Таким образом, при переходе упругим волновым пакетом границы сопрягаемой с породами массива поверхности временной крепи тоннеля наблюдаются, подобно выявленным в модельных экспериментах [14, 15], “ступенчатые” изменения скорости его распространения.

Сейсмические колебания в породах от удара бойком с кинетической энергией 34 Дж представляют нестационарный процесс, имеющий “сплошной” спектр с преобладанием отдельных периодов, индивидуальных для каждого измерительного канала (рис. 10). Спектр сейсмических сигналов определялся с помощью преобразования Фурье [16]. При анализе колебаний, возбуждаемых ударом, следует учитывать, что функция, описывающая эти колебания, существует в конечном интервале времени и главная часть ее спектра лежит в области частот $(0, F)$, где F — максимальная частота, выделяемая в рассматриваемом спектре. Поэтому интегрирование спектра выполнялось от момента начала колебаний и до их затухания в области частот от 0 до F .

Для определения спектрального состава регистрируемого пакета сейсмической волны при ударе бойком в качестве исходной функции принималась скорость смещений в породах (см. рис. 9) в соответствии с принятым при записи интервалом дискретизации. Считывание ординат с интервалом 0.5 мс позволило, согласно [16], выявить значимые составляющие спектра в диапазоне частот до 2750 Гц. Амплитудно-частотные спектры определены по всем каналам и показаны с отображением по каналам 3–6 (см. рис. 10*в–е*) значимой части с порогом 10 %.

Так как значения спектральных плотностей на отдельных интервалах исходной записи неодинаковы вследствие различий физико-механических свойств геосреды, в которой распространялся волновой пакет, то для графической сопоставимости по оси ординат откладывались не абсолютные значения спектральной плотности амплитуд каждой гармоник, а их отношение к максимальному значению этой плотности. Построение графиков в относительных величинах позволяет сравнить распределение спектров по оси частот независимо от абсолютного значения скорости смещений.

Амплитудно-частотный спектр записи скорости смещений, регистрируемой сейсмоприемником 1 по бетону временной крепи, показан на рис. 10*а*. Максимум спектра соответствует частоте 270 Гц. Значения спектральной плотности, превышающие 25 % от максимальной, наблюдаются на частотах, близких к 60, 270, 580, 640, 1830, 2360 и 2460 Гц. Область частот, в которой значения спектральной плотности скорости смещений по амплитуде больше 0.7, ограни-

чена пределами 240–300 и 630–640 Гц. Области спектральной плотности, выделяемые на частотах 1810–1840, превышают по амплитуде 0,5, а на частотах 2340–2380 и 2450–2480 Гц — 0,4 от максимума. Всплески до уровня 0,2–0,3 от максимума отмечены в диапазоне частот 40–90, 150–180, 570–600 и 1640–1660 Гц. Максимумы на частотах выше 2700 Гц не превышают 0,05.

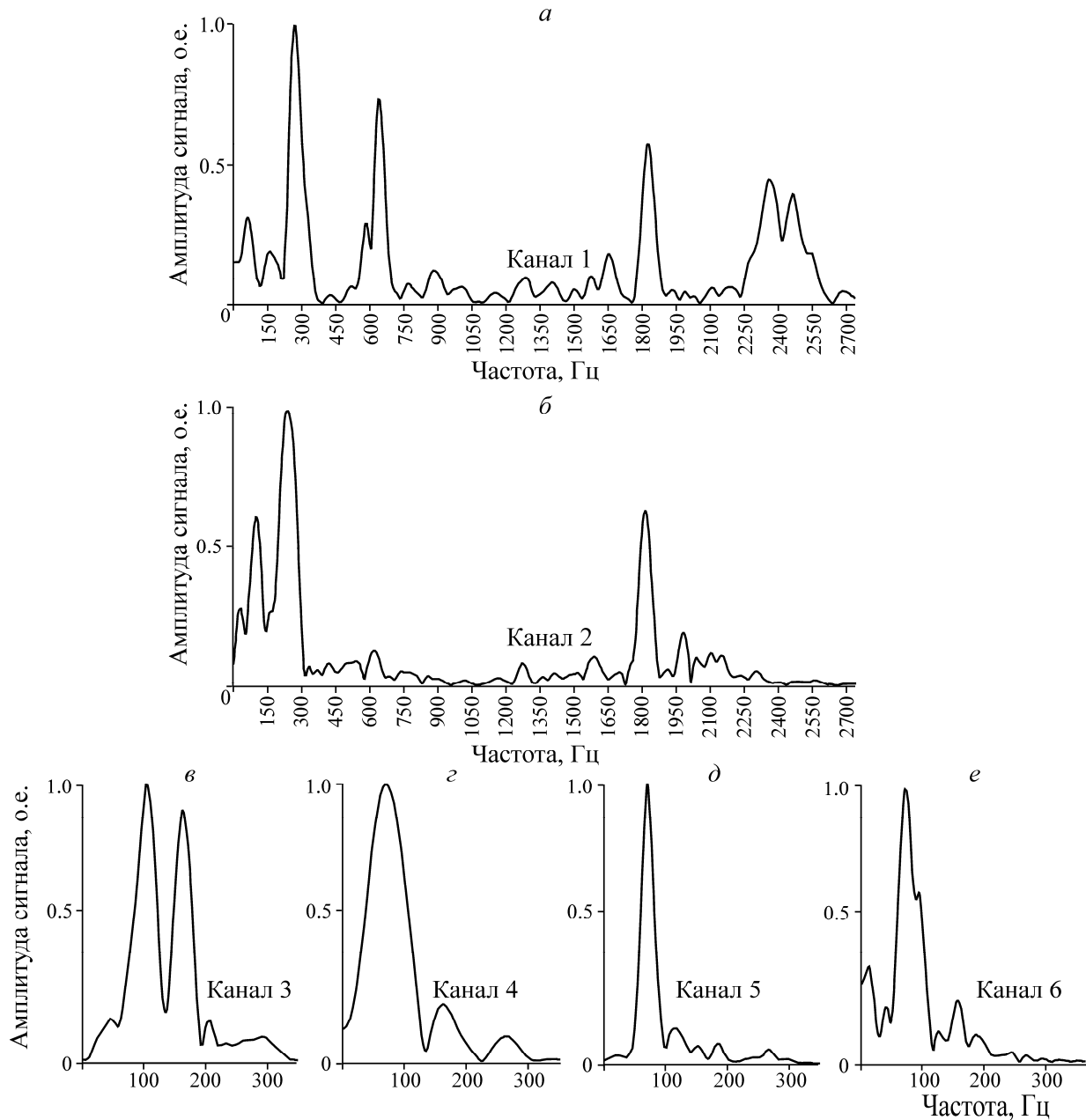


Рис. 10. Нормированные спектры записей скорости смещений в крепи и породах массива по каналам сейсмических измерений при ударе бойком по бетонному борту временной крепи тоннеля с энергией 34 Дж: *а* — канал 1 (бетон); *б* — канал 2 (бетон); *в* — канал 3 (бетон, алевролит); *г* — канал 4 (алевролит); *д* — канал 5 (алевролит); *е* — канал 6 (уголь)

Амплитудно-частотный спектр записи скорости смещений, регистрируемой сейсмоприемником 2 также по бетону временной крепи, показан на рис. 10б. Максимум спектра соответствует частоте 240 Гц. Значения спектральной плотности, превышающие 25 % от максимальной, наблюдаются на частотах, близких к 40, 100, 240, 1820 и 2000 Гц. Область частот, в которой

значения спектра по амплитуде больше 0.7, ограничена пределами 190–280 Гц. Области, выделяемые на частотах 60–120 и 1800–1840 Гц, превышают по амплитуде 0.5 от максимума спектральной плотности. Всплески до уровня 0.2–0.3 от максимума отмечены в диапазоне частот 20–40 и 1980–2000 Гц. Максимумы на частотах выше 2700 Гц не превышают 0.05.

Амплитудно-частотный спектр записи скорости смещений, регистрируемой сейсмоприемником 3 по бетону на контакте крепи с алевролитом, показан на рис. 10в. Максимум спектра соответствует частоте 105 Гц. Значения спектральной плотности, превышающие 25 % от максимальной, наблюдаются на частотах, близких к 105 и 160 Гц. Область частот, в которой значения спектральной плотности по амплитуде больше 0.7, ограничена пределами 90–120 Гц. Области, выделяемые на частотах 90–120 и 150–170 Гц, превышают по амплитуде 0.5 от максимума спектральной плотности. Всплески до уровня 0.2 от максимума отмечены в диапазоне частот 40–50 и 200–210 Гц. Максимумы на частотах выше 300 Гц не превышают 0.05.

Амплитудно-частотный спектр записи скорости смещений, регистрируемой сейсмоприемником 4 по алевролиту (сильнотрещиноватая порода), показан на рис. 10г. Максимум спектра соответствует частоте 70 Гц. Область частот, в которой значения спектральной плотности по амплитуде больше 0.7, ограничена пределами 40–100 Гц. Области, выделяемые вблизи частот 160 и 260 Гц, не превышают по амплитуде 0.2 от максимального значения.

Амплитудно-частотный спектр записи скорости смещений, регистрируемой сейсмоприемником 5 также по алевролиту (здесь трещиноватость существенно ниже), показан на рис. 10д. Максимум спектра соответствует частоте 70 Гц. Область частот, в которой значения спектральной плотности по амплитуде больше 0.7, ограничена пределами 60–75 Гц. Области, выделяемые вблизи частот 110 и 180 Гц, не превышают по амплитуде 0.2 от максимального значения.

Амплитудно-частотный спектр записи скорости смещений, регистрируемой сейсмоприемником 6 по углю, показан на рис. 10е. Максимум спектра соответствует частоте 70 Гц. Область частот, в которой значения спектральной плотности по амплитуде больше 0.7, ограничена пределами 60–80 Гц. Области, выделяемые вблизи частот 60–80 и 95 Гц, превышают по амплитуде 0.5 от максимума спектральной плотности. Области, выделяемые вблизи частот 10, 40 и 155 Гц, не превышают по амплитуде 0.3 от максимума. Максимумы на частотах выше 210 Гц не превышают 0.05.

Для установления закономерностей распределения выделяемых значений частот, соответствующих максимальным амплитудам спектральной плотности, графики на рис. 10 для бетона и слагающих горных пород сопряженного массива обработаны по методике, аналогичной приведенной в [17]. Определены значения частот, соответствующие локальным максимумам спектральной плотности в рассматриваемом диапазоне частот до 2750 Гц и сформирован набор данных, содержащий 221 их численное значение. Выборка частот для каждого из каналов представлена в табл. 3 по бетону (98 значений) и породам сопряженного массива (67 значений по алевролиту, 56 — по углю) с указанием соответствующих им коэффициентов крепости.

Выборка значений частот в табл. 3 проведена поочередным перебором всех выделяемых максимумов амплитуд спектра, при этом для набора статистики значения частот выделялись также для максимумов, не превышающих значимой части в 10 % (не показанной на рис. 10в–е). Ограничения касались лишь предельных значений выбранного диапазона частот; данные округлялись с точностью до 5 Гц. В дальнейшем целесообразно рассматривать значения условно выделяемых частот в диапазоне до 650 Гц как область “длиннопериодных”, а значения частот выше 1750 Гц — как область “короткопериодных” составляющих колебаний.

ТАБЛИЦА 3. Результаты определения значений частот выделяемых максимумов спектральной плотности в области “длинно-” и “короткопериодных” составляющих колебаний

Номер канала	Расстояние по трассе, м	Коэффициент крепости, о.е.	Выделенные частоты, Гц
1		6–7 бетон 27 значений	60 (0.3), 165 (0.2), 270 (1), 425, 520, 585 (0.3), 640 (0.7), 770, 885 (0.1), 1005, 1080, 1105, 1290, 1410 (0.1), 1500, 1575 (0.1), 1650 (0.2), 1830 (0.55), 1935, 1990, 2025, 2105, 2190, 2365 (0.45), 2460 (0.4), 2550 (0.2), 2690
2	6	6–7 бетон 36 значений	35 (0.3), 100 (0.6), 240 (1), 340, 375, 425, 510, 550, 625 (0.1), 690, 740, 780, 865, 915, 1025, 1175, 1280 (0.1), 1370, 1420, 1520, 1600 (0.1), 1710, 1820 (0.65), 1920, 1990 (0.2), 2050, 2110 (0.1), 2160 (0.1), 2250, 2310, 2415, 2470, 2510, 2570, 2640, 2720
3	11	6–7 бетон 2–4 алевролит 35 значений	45 (0.15), 105 (1), 162 (0.9), 205 (0.15), 235, 265, 360, 395, 430, 450, 510, 540, 590, 700, 740, 800, 960, 1035, 1485, 1525, 1620, 1715, 1755, 1810, 1860, 1900, 2000, 2070, 2170, 2280, 2415, 2500, 2580, 2690
4	13	2–4 алевролит 28 значений	70 (1), 160 (0.2), 260 (0.1), 335, 425, 470, 525, 600, 700, 800, 935, 1050, 1200, 1260, 1290, 1425, 1510, 1580, 1830, 1945, 2060, 2130, 2170, 2215, 2295, 2340, 2430, 2680
5	19.3	2–4 алевролит 39 значений	23, 68 (1), 112 (0.1), 150, 184, 240, 265, 292, 410, 450, 515, 545, 570, 590, 624, 665, 730, 790, 850, 882, 930, 970, 1000, 1100, 1140, 1230, 1275, 1365, 1450, 1510, 1560, 1650, 1720, 1780, 1860, 1950, 2160, 2250, 2400, 2700
6	25.8	0.8–1.2 уголь 56 значений	10 (0.35), 40, 70 (1), 90 (0.6), 125, 155 (0.2), 187, 245, 268, 292, 320, 350, 380, 410, 437, 462, 490, 525, 575, 600, 640, 665, 700, 740, 765, 820, 860, 895, 920, 995, 1020, 1040, 1100, 1160, 1210, 1245, 1280, 1330, 1370, 1440, 1470, 1485, 1530, 1560, 1600, 1750, 1790, 1920, 2060, 2130, 2230, 2340, 2490, 2670, 2720, 2740

Пр и м е ч а н и е. В скобках (жирно) указаны значимые максимумы амплитуд спектральной плотности

Первый шаг обработки данных табл. 3 заключался в выделении значений частот, канонически сопряженных по $(\sqrt{2})^i$, где $i=1,2,3,\dots$ — показатель степенного ряда, аналогичный принятому в работе [17] для описания блочной структуры массива пород. В качестве первого члена ряда, исходного для группирования экспериментальных значений частот выбрано численное значение $\omega_p \approx 70$ Гц, соответствующее максимуму спектральной плотности для “длиннопериодных” колебаний по алевролиту и углю как породам, определяющим прохождение сейсмической волны в сопрягаемом массиве. Остальные члены ряда соответствуют каноническому спуску до наибольшего экспериментального значения частоты ω_s из диапазона значений частот, представленных в табл. 3 по бетону, алевролиту и углю. По этим данным выбирались упорядоченные численные значения ω_s , практически совпадающие с ω_p : по разности между ω_p и ω_s вычислялось расхождение (в %) как $|\omega_p - \omega_s| \cdot 100 / \omega_p$. Выделенные таким образом ряды частот приведены в столбцах 3–11 табл. 4.

Из табл. 4 следует, что если в качестве доверительного интервала принять 10 % для исходных данных (см. табл. 3) относительно представителей канонического ряда (см. столбцы 4, 7 и 10), то оказывается, что более 57 % общей выборки анализируемых значений (по столбцам —

57.1, 58.5 и 57.9 %) становятся “неотличимыми” от членов канонического ряда частот, ассоциированного с максимумом спектральной плотности по бетону, а при 12.5 % доверительном интервале — более 72 % (по столбцам 5, 8 и 11 — соответственно 72.4, 73.1 и 72.8 %).

ТАБЛИЦА 4. Результаты группирования согласно расчетному каноническому ряду значений частот выделяемых максимумов спектральной плотности в области “длинно-” и “короткопериодных” составляющих сейсмических колебаний при ударе бойком с энергией 34 Дж по данным измерений в бетоне временной крепи, породах сопряженного массива (алевролит, уголь) и в целом по массиву

№ п/п	Расчетное значение частоты, ω_p Гц	Количество значений частот ω_s , шт., выделяемых в заданном диапазоне группирования относительно ω_p в доверительных интервалах, %								
		по бетону			по алевролиту и углю			в целом по массиву		
		7.5	10	12.5	7.5	10	12.5	7.5	10	12.5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	35	1	1	1	—	1	1	1	2	2
2	50	—	1	1	—	—	—	—	1	1
3	70	—	—	1	3	3	3	3	3	4
4	100	2	2	2	—	1	2	2	3	4
5	140	—	—	—	1	1	3	1	1	3
6	200	1	1	1	1	2	2	2	3	3
7	280	2	2	2	5	5	6	7	7	8
8	395	4	6	6	4	4	6	8	10	12
9	560	5	7	8	8	9	11	13	16	19
10	790	5	6	9	7	8	11	12	14	20
11	1120	4	5	6	7	10	14	11	15	20
12	1585	8	10	13	10	14	16	18	24	29
13	2240	10	15	21	11	14	15	21	29	36
Суммарно		42	56	71	57	72	90	99	128	161

Выделенные по максимумам спектральной плотности в области “длинно-” и “короткопериодных” составляющих сейсмических колебаний значения частот для алевролита и угля сгруппированы в табл. 5 по значениям, относящимся к 7.5 % доверительному интервалу для расчетной канонической шкалы их иерархических представлений по методике [12, 17].

На рис. 11 показана результирующая гистограмма распределения выделенных экспериментальных значений частот максимумов спектральной плотности сейсмических колебаний для алевролита и угля, сгруппированных в канонической шкале с доверительным интервалом 7.5 % [12, 17].

Сравнение гистограмм распределения экспериментально выделенных линейных размеров блоков (см. рис. 7в) и экспериментальных значений частот максимумов спектральной плотности сейсмических колебаний (см. рис. 11) для алевролита и угля, сгруппированных отмеченным способом для канонической шкалы их расчетных значений, позволяет сделать вывод о наличии в иерархически построенных породных массивах практически обратной зависимости изменения частот максимумов спектров упругих волновых пакетов от размеров блоков, т. е. для экспериментальных значений частот и линейных размеров блоков имеет место соотношение $\omega_s \sim 1/\Delta$. Это обстоятельство является практически значимым для количественной спецификации участков породных массивов по категориям их нарушенности.

ТАБЛИЦА 5. Результаты группирования согласно расчетному каноническому ряду значений частот выделяемых максимумов спектральной плотности в области “длинно-” и “коротко-периодных” составляющих сейсмических колебаний при ударе бойком с энергией 34 Дж по данным измерений в породах сопряженного с тоннелем массива (каналы 4, 5 — алевролит, канал 6 — уголь)

№ п/п	Расчетное значение частоты ω_p , Гц	Количество значений частот ω_s , шт., выделяемых в заданном диапазоне группирования относительно ω_p в доверительном интервале 7.5 %	
		алевролит	уголь
1	70	1	1
2	100	—	—
3	140	1	—
4	200	—	1
5	280	3	2
6	395	2	2
7	560	5	3
8	790	4	3
9	1120	4	3
10	1585	5	5
11	2240	8	3
Суммарно		33	23

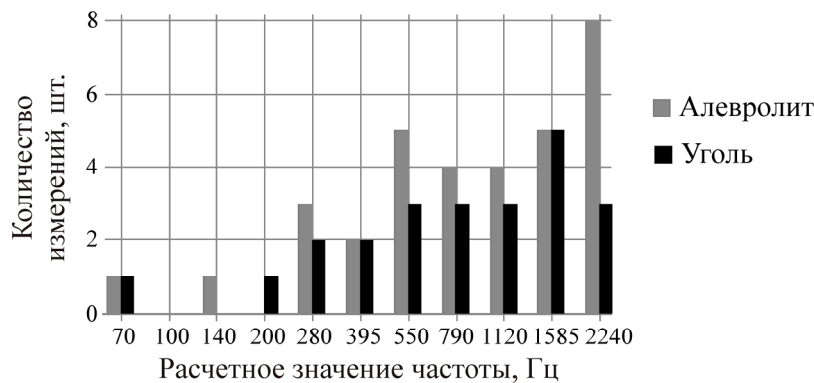


Рис. 11. Гистограмма распределения экспериментальных значений частот максимумов спектральной плотности сейсмических колебаний для алевролита и угля, сгруппированных в 7.5 % доверительном интервале канонического ряда расчетных значений частот

На рис. 12 представлены совмещенные графики изменений скорости упругого волнового пакета и частот максимальных амплитуд его спектральной плотности при распространении в бетоне временной крепи и породах сопрягаемого массива порталной части тоннеля в области “длинно-” и “короткопериодных” спектральных составляющих сейсмических колебаний в зависимости от расстояния до места удара по трассе измерений и прочностных свойств бетона и пород массива (по М. М. Протодяконову) на соответствующих участках измерений.

Частотная характеристика на рис. 12 отражает существенное влияние прочностных свойств пород на динамико-кинематические характеристики распространения и затухания сейсмических колебаний, формирование “резонансных” явлений в сложнопостроенном породном массиве, отвечающих их структурной блочности. При этом для экспериментальных значений частот максимумов спектров упругих волновых пакетов имеет место соотношение $\omega_s \sim f$ крепости пород. Анализ этого прочностного показателя горных пород в канонической шкале иерархических представлений подробно рассмотрен в монографии [18].

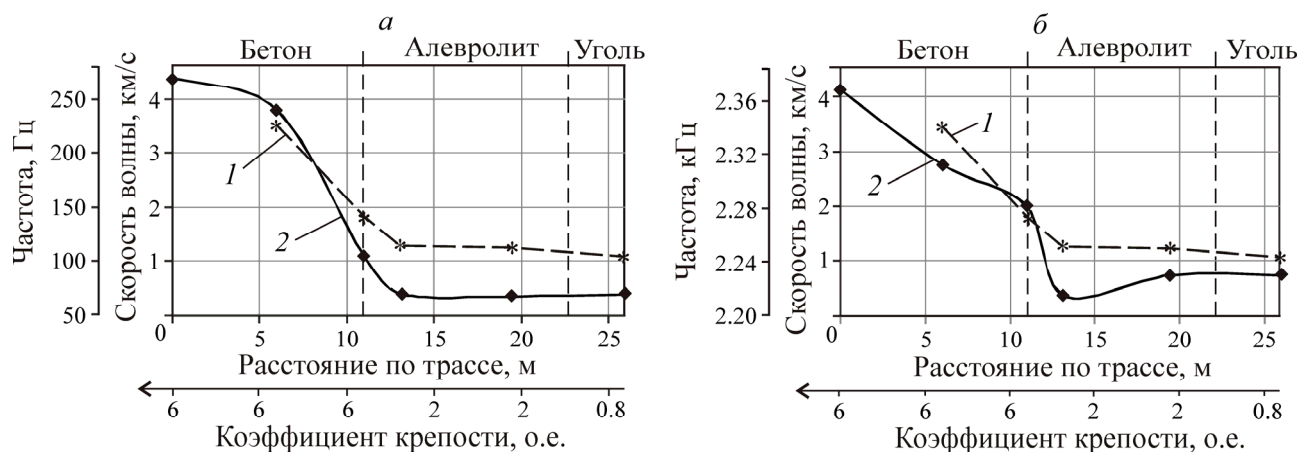


Рис. 12. Изменение скорости (1) волнового пакета и частот максимальных амплитуд его спектра (2) при распространении в бетоне временной крепи и породах сопрягаемого массива порталного участка тоннеля в области “длинно-” (а) и “короткопериодных” (б) составляющих колебаний по трассе измерений в зависимости от расстояния до места нанесения удара, прочностных свойств бетона и пород массива

ВЫВОДЫ

Предложен и опробован методический подход осуществления дистанционных лазерных измерений деформаций временной крепи и распространений сейсмических сигналов в породном массиве для геомеханического мониторинга транспортного тоннеля, обеспечивающего инструментальный контроль на выбранном участке с заданной последовательностью и периодичностью. Отработка элементов такого мониторинга, выполненная на примере временной крепи восточного участка Томусинского железнодорожного тоннеля, показала, что для существующих сложных геолого-структурных, тектонических и гидрологических условий его проходки:

— совмещение лазерного сканирования и сейсмических измерений позволяет получать достоверную информацию о контролируемых геомеханических процессах в породном массиве, обделке и временной крепи выбранных участков тоннеля, а также интерполировать получаемые результаты с заданной последовательностью, точностью и периодичностью как в пространстве, так и во времени для контроля процессов деформирования, вызванных как проходческими работами при строительстве, так и действием горного давления налегающих пород;

— своевременное определение деформаций обделки, вызванных разрушением породного массива в окрестности временной крепи, позволяет выполнить предупредительные мероприятия для предотвращения развития деформаций, включая корректировку технологии проходки;

— регистрация сейсмических сигналов от ударов бойком по бетонной крепи и интерпретация их распространения по породам массива позволяет оценить возможные негативные последствия колебательных воздействий подвижного состава на состояние временной крепи и обделки тоннеля и принять превентивные меры к повышению безопасности его эксплуатации;

— из приведенных данных сейсмических измерений в геоматериалах (бетон) и породах следует, что значение частоты максимума спектральной плотности скорости их колебаний, возбуждаемых ударом бойка, зависит от структурного строения и крепости пород по шкале М. М. Протодыяконова в местах их сопряжения между собой и с временной крепью и может рассматриваться как свойство нетронутого разрушающим действием вмещающего массива;

— зависимость частот максимумов спектральной плотности от крепости пород указывает на то, что полученные значения являются частотами свободных колебаний структурных элементов (блоков) горных пород.

Авторы выражают благодарность руководителям и специалистам Тоннельного отряда № 12 ООО “Бамтоннельстрой” за помощь в организации и проведении экспериментальных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СП 122.13330.2012.** Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97. — М.: Минрегион России, 2012.
2. **Гидрогеология СССР.** Том XVII. Кемеровская область и Алтайский край. Западно-Сибирское геологическое управление / под ред. М. А. Кузнецова и О. В. Постниковой. — М.: Недра, 1972.
3. **Пат. № 2097558 РФ.** Способ контроля напряженно-деформированного состояния в блочных структурах геосферы, базовая опора, деформометр и регистратор / В. Н. Опарин, М. В. Курленя, Г. Г. Сиденко, В. В. Аршавский, А. А. Акинин, В. Ф. Юшкин В. Ф., А. П. Тапсиев // Опубл. в БИ. — 1997. — № 33.
4. **Справочник (кадастр) физических свойств горных пород.** — М.: Недра, 1975.
5. **СНиП II-7-81.** Строительство в сейсмических районах (с изменениями и дополнениями). — М.: Госстрой России, 2000.
6. **ВСН 190-78.** Инструкция по инженерно-геологическим изысканиям для проектирования и строительства метрополитенов, горных железнодорожных и автомобильных тоннелей. — М.: Минтрансстрой России, 1978.
7. www.navgeocom.ru — сайт ООО “Навгеоком”. Наземное лазерное сканирование. Оборудование.
8. **Опарин В. Н., Середович В. А., Юшкин В. Ф., Иванов А. В., Прокопьева С. А.** Формирование объемной цифровой модели поверхности борта карьера методом лазерного сканирования // ФТПРПИ. — 2007. — № 5.
9. **Панжин А. А.** Решение проблемы выбора опорных реперов при исследовании процесса сдвижения на объектах недропользования // Маркшейдерия и недропользование. — 2012. — № 2.
10. **Панжин А. А.** Информационные технологии при диагностике состояния подработанного массива горных пород и моделировании состояния земной поверхности // Информационные технологии в горном деле: доклад на Всерос. науч. конф. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012.
11. **Юшкин В. Ф.** Методы трехмерного моделирования породных массивов в исследованиях геомеханических свойств при ведении горных работ // Сб. науч. трудов XI Междунар. форума “Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2015”, 13–18 апреля 2015 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. “Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология.” — Т. 3. — Новосибирск: СГУГТ, 2015.
12. **Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Рублев Д. Е., Кулинич Н. А., Юшкин А. В.** О верификации кинематического выражения для волн маятникового типа по данным сейсмических измерений в условиях рудника Таштагольский и мраморного карьера Искитимский // ФТПРПИ. — 2015. — № 2.
13. **Программа управления станцией сейсморазведочной инженерной цифровой “Лакколит 24-М” (модель 01).** Руководство оператора. — М.: ООО “Логис” (Раменское), 2005.
14. **Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф., Востриков В. И., Погарский Ю. В., Назаров Л. А.** Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010.
15. **Орлов В. А., Панов С. В., Парушкин М. Д., Фомин Ю. Н., Шер Е. Н., Юшкин В. Ф.** Экспериментальное изучение упругих волн в “одномерной” блочной среде с использованием высокочувствительных лазерных измерений. // Труды Всерос. конф. с участием иностр. ученых “Геодинамика и напряженное состояние недр Земли”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2011. — Т. 1.
16. **Харкевич А. А.** Спектры и анализ. — М.: ГИТЛ, 1957.
17. **Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Акинин А. А., Балмашнова Е. Г.** О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ. — 1998. — № 5.
18. **Опарин В. Н., Танайно А. С.** Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011.

Поступила в редакцию 15/V 2015