



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И КОНСТРУКЦИЙ КРЕПИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТОННЕЛЯ НА УЧАСТКЕ СЕВЕРОКАВКАЗСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ СОЧИ — АДЛЕР

EXPERIMENTAL STUDY OF THE ROCKS AND LINING STRESS-STRAIN STATE DURING CONSTRUCTION OF A TUNNEL IN THE SOCHI — ADLER SECTION OF THE NORTH CAUCASIAN RAILROAD

БАСОВ А.Д.

Заведующий лабораторией геофизики научно-исследовательского отдела ОАО «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург, basovaleksandr2012@gmail.com, lmg1@lenmetro.ru

РОМАНЕВИЧ К.В.

Научный сотрудник научно-исследовательского отдела ОАО «Ленметрогипротранс», kirillromanevich@gmail.com

BASOV A.D.

The head of the Laboratory of Geophysics of the Research Department of the «Lenmetrogiprotrans» OJSC, Saint Petersburg, basovaleksandr2012@gmail.com, lmg1@lenmetro.ru

ROMANEVICH K.V.

A staff scientist of the Research Department of the «Lenmetrogiprotrans» OJSC, Saint Petersburg, kirillromanevich@gmail.com

Ключевые слова:

напряженно-деформированное состояние (НДС); горно-экологический мониторинг; экзогенные геологические процессы; транспортный тоннель; временная крепь; датчики деформаций; естественное электромагнитное излучение (ЕЗМИ).

Key words:

stress-strain state (SSS); mining-environmental monitoring; exogenous geological processes; transportation tunnel; temporary supports; strain sensors; natural electromagnetic radiation (NEMR)

Аннотация

Приводятся результаты экспериментальных работ в натуральных условиях по разработке методики применения данных регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЗМИ) для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций крепи тоннеля и массива горных пород. Обсуждаются вопросы методики и дальнейших исследований по изучению взаимосвязей ЕЗМИ с НДС.

Введение

В настоящее время одной из основных задач подготовки олимпийских объектов в Сочи по федеральной целевой программе является строительство большого количества транспортных тоннелей, которые будут обеспечивать сообщение между разными частями города, расположенного в предгорьях Кавказа. Строительство этих тоннелей ведется ускоренными темпами в сложных геологических условиях, что требует высокого уровня промышленной безопасности и качественного научного сопровождения. Последнее достигается благодаря разработанной и внедренной ОАО «Ленметрогипротранс» (ЛМГТ) системе горно-экологического мониторинга¹ при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей [2].

Работы по горно-экологическому мониторингу на строящихся тоннелях в Сочи ведутся группой специалистов научно-исследовательского отдела (НИО) Ленметрогипротранса. Основной объем мониторинговых работ, включающих в себя геофизические, геомеханические, экологические и другие наблюдения, приходится на строящиеся тоннели совмещенной (автомобильной и железной) дороги Адлер — горноклиматический курорт «Альпика-Сервис», имеющие общую протяженность подземных выработок около 32,5 км. Специалистами ЛМГТ в этом регионе ведутся также мониторинговые работы на некоторых действующих тоннелях существующей линии Туапсе — Адлер Северокавказской

Abstract

The article presents results of experimental field studies to develop the method of using data of recording Natural Electromagnetic Radiation (NEMR) for evaluating tunnel line and rock massif stress-strain state (SSS). Problems of the technique and further research on investigation of interrelationships between NEMR and SSS are discussed.

¹ Вместо термина «горно-экологический мониторинг» в данном случае, то есть при строительстве тоннелей, правильнее использовать термин «режимные геотехнические наблюдения». — *Ред.*



железнодорожной и строящихся тоннелях второго сплошного пути на участке Сочи — Адлер.

Анализ проблемы

Основными факторами промышленной безопасности строительства и эксплуатации транспортных тоннелей в пределах горного отвода являются [2]:

- эндогенные процессы (современные тектонические движения в земной коре, землетрясения и связанные с ними явления);
- экзогенные геологические процессы (склоновые явления, карстово-суффозионные явления, просадки грунта, криогенные процессы, горные удары, разрушения крепей, внезапные обрушения подземных выработок и другие).

Разработка метода, способного дать экспресс-оценку и прогноз проявлений таких процессов в крепи тоннеля, во вмещающем массиве, а также на дневной поверхности, представляется крайне важной и перспективной задачей для системы комплексного горно-экологического мониторинга на всех этапах существования тоннеля.

Прогноз при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей должен быть направлен на выявление предвестников опасных проявлений геодинамики. Для прогнозирования геодинамической активности необходимо выбрать интегральный показатель, с помощью которого можно характеризовать надежность подземного сооружения. Этот показатель должен чутко реагировать на приближения деформаций и напряжений в крепи и обделке к их предельным значениям [5]. Методы горной геофизики, использующие в качестве такого показателя геофизические поля, представляются одним из важнейших направлений исследований в разработке методов прогноза динамических событий в массиве горных пород. В этом отношении перспективным является метод, основанный на наблюдениях за естественными электромагнитными излучениями (ЕЭМИ) в горных массивах и крепях тоннелей [6].

Геофизические методы прогноза геодинамических событий основаны на сопоставлении измеренных в разных пунктах горных выработок значений параметров геофизических полей с их критическими значениями. В качестве относительных характеристик напряженно-деформированного состояния пород в зоне опорного давления используются вариации естественных или искусственно наведенных геофизических полей [3]. Критические значения параметров соответствуют переходу участка в удароопасное состояние. Физическая сущность параметров различается в зависимости от специфики метода, но все они функционально связаны с реакциями пород на нагрузки в виде деформаций. Обычно используют относительное изменение контролируемого физического параметра среды в зоне активного проявления горного давления по сравнению с его значением в нетронутом массиве или интенсивностью естественного поля [4].

Методика работ

Комплексные геомеханические и геофизические (ЕЭМИ) исследования строительных конструкций тоннелей и элементов горного массива используются для



Рис. 1. Проходка железнодорожного тоннеля № 6-бис осуществлялась типовым горным способом стреловыми проходческими комбайнами с погрузкой грунта в подземные автопоезда МоАЗ

разработки новых эффективных методов надежного неразрушающего экспресс-контроля и прогноза безопасной эксплуатации подземных транспортных сооружений.

В рамках данной работы были проведены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния временной арочно-бетонной крепи и вмещающего массива строящегося железнодорожного тоннеля № 6-бис.

Строительство однопутного тоннеля № 6-бис велось в центре города Сочи (в районе железнодорожного вокзала) с мая 2011 г. на южном портале и с осени 2011 г. на северном. Проходка железнодорожного тоннеля № 6-бис осуществлялась типовым горным способом стреловыми проходческими комбайнами с погрузкой грунта в подземные автопоезда МоАЗ (рис. 1).

Однократная выемка грунта из забоя (заходка) составляла от 1 до 3 м, расстояние между арками — от 0,75 до 1 м. Рядом находится действующий однопутный железнодорожный тоннель № 6, по которому организовано интенсивное движение пассажирских и грузовых поездов в северном и южном направлениях (рис. 2). Расстояние между осями тоннелей — от 25 до 65 м. Проходка велась в тонкослоистых плитчатых аргиллитах разной степени трещиноватости и обводнен-

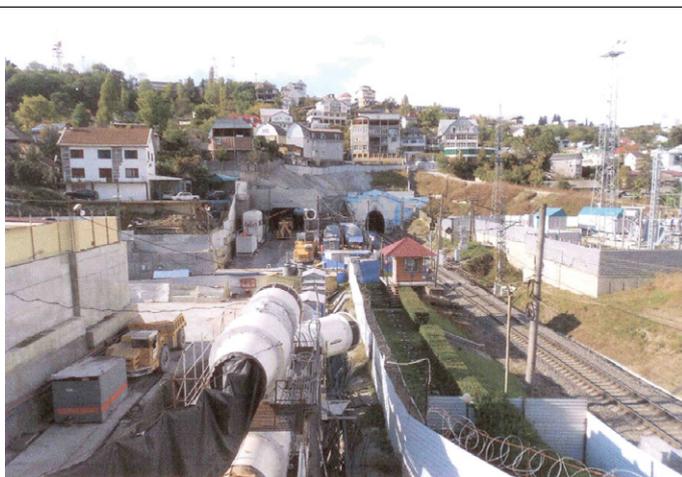


Рис. 2. Действующий однопутный железнодорожный тоннель № 6



Рис. 3. Датчик линейных деформаций ТБ-200

ности с редкими маломощными (толщиной 1,0–1,5 см) прослоями мелкозернистого песчаника.

При возведении временной крепи в тоннеле № 6-бис оборудовались опытные участки для измерений деформаций. На каждом участке (сечении) устанавливали по одной полигональной сварной раме из двутавра № 30 на усиленных участках и по одной (или две) арматурной арке на неусиленных. Бетонирование временной крепи выполнялось с помощью технологии набрызг-бетонирования оборудованием Roboshot.

Для контроля изменений напряженно-деформированного состояния в натуральных условиях при производстве работ, связанных с горно-экологическим мониторингом в строящихся тоннелях в г. Сочи, использовались два вида датчиков-деформометров. Первый из них — преобразователи линейных деформаций измерительные струнные ТБ-200 (РФ), предназначенные для измерений статических относительных линейных деформаций сжатия и растяжения бетонных конструкций при контрольных наблюдениях и натуральных исследова-

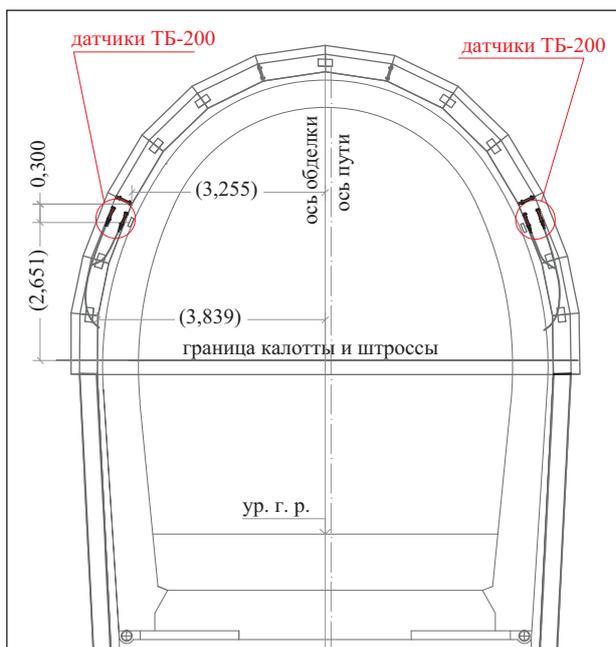


Рис. 4. Схема установки датчиков ТБ-200 на внешнем и внутреннем контуре двутавровой арки

дованиях. Датчики линейных деформаций ТБ-200 (рис. 3) представляют собой струну, закрепленную между двумя опорными шайбами внутри металлической тонкостенной трубы. Измеряемым параметром является период колебания струны в микросекундах. Измерительная база составляет 200 мм.

Второй вид датчиков — замоноличиваемые струнные тензометры производства британской компании Soil Instruments, предназначенные для измерения деформаций в железобетонных конструкциях. Измерительный сенсор такого тензометра состоит из струнного элемента, прикрепленного к специальным фланцам на концах корпуса датчика, и вторичного преобразователя в виде электромагнитной катушки. Корпус датчика изготовлен из нержавеющей стали. Измерительная база составляет 150 мм.

Датчики крепятся обычной вязальной проволокой на внешнем и внутреннем контуре двутавровой арки (рис. 4). Они устанавливаются в субвертикальном положении в центре поперечного сечения арматурного каркаса при возведении крепи из арматурных арок (рис. 5). После замоноличивания датчика блок с электромагнитной катушкой, установленной на его корпусе, фиксирует любые деформации.

На этапе строительства тоннеля датчики опрашивались индивидуально (в ручном режиме) с помощью портативного считывающего устройства RO-1-VW-3 или переносным цифровым периодометром ПЦП-1. В соответствии с рекомендациями по установленным струнным датчикам, представленными в программе работ, первым (нулевым) является показание после возведения крепи. Далее с учетом интенсивности проходки (отставания забоя) и изменений напряженно-деформированного состояния выполняются дальнейшие измерения.

Замоноличиваемые тензометры работают по принципу стандартных струнных датчиков: возбуждение колебаний струны и считывание результата возбуждения (преобразование колебаний в электрический сигнал) осуществляются с помощью электромагнитной катушки. Любое изменение натяжения струны приводит к изменению ее собственной частоты колебаний и прямо пропорционально значению деформации конструкции, за которой ведется наблюдение.

Замоноличиваемый тензометр (рис. 6) представляет собой герметичную трубку со струной внутри, прикрепленную с каждой стороны к круглым стальным

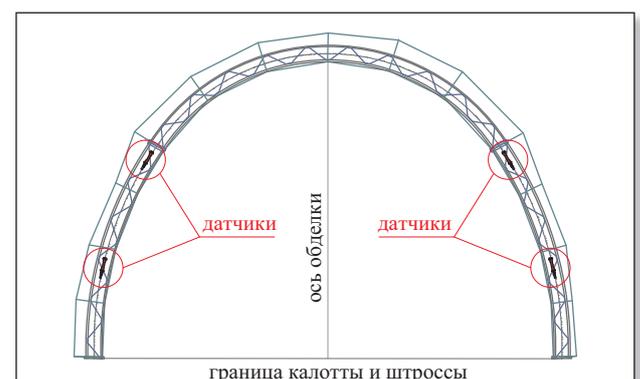


Рис. 5. Схема установки датчиков в центре поперечного сечения арматурного каркаса при возведении крепи из арматурных арок



пластинкам (фланцам), которые, в свою очередь, используются для передачи нагрузок с конструкции, за которой ведется наблюдение, на датчик. Блок с электромагнитной катушкой устанавливают в середине корпуса датчика непосредственно перед заливкой бетона. Встроенный термистор обеспечивает также запись измеренных температурных значений.

Все струнные тензометры чувствительны к изменениям температуры. Коэффициент линейной температурной зависимости струны равен 11×10^{-6} единиц на 100°C . Этот коэффициент должен быть учтен при больших температурных скачках во время мониторинга. Помимо этого, необходимо учитывать коэффициент линейной температурной зависимости бетона, составляющей от 10×10^{-6} до 14×10^{-6} единиц на 100°C .

В районе указанных выше опытных участков с датчиками деформаций для контроля напряженно-деформированного состояния по правой и левой стене тоннеля были размечены места для установки антенны прибора «Ангел» производства ВНИМИ с целью наблюдения за вариациями естественного электромагнитного излучения одновременно со снятием показаний датчиков (рис. 7). Эти наблюдения нацелены на переход от качественного анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) массива методом ЕЭМИ к количественным прогнозным показателям, позволяющим проводить диагностику предразрушающего состояния участков массивов и удовлетворительно описывающим подготовку и изменения в структуре сигналов электромагнитного излучения, сопровождающие проявление горного давления, на различных стадиях нагружения.

Метод ЕЭМИ является косвенным методом исследований, и с его помощью нельзя напрямую оценить величины компонентов напряжений или деформаций. Чтобы использовать метод ЕЭМИ для оценок НДС массивов горных пород в окрестностях тоннелей, необходимо было установить количественные корреляционно-статистические взаимосвязи с параметрами, которые используются в механике горных пород. Для установления корреляционных связей необходимо было создать базы данных в виде временных рядов, в которые должны были входить параметры ЕЭМИ и параметры геомеханических измерений (с указанием пикетов и времени наблюдений).

Получение репрезентативных выборок для статистического анализа является основной задачей сбора и первичной обработки данных для установления корреляционных взаимосвязей между параметрами ЕЭМИ и напряженным состоянием массива. Такие взаимосвязи и должны использоваться в решении задач оценки и контроля НДС массивов горных пород и обделок тоннелей с помощью ЕЭМИ.

Экспериментальная часть

При мониторинговых исследованиях важно определить критерии для прогноза перехода в критическое напряженно-деформированное состояние участков массива горных пород в окрестностях тоннеля, создающих угрозу его устойчивости. Решение этой задачи в настоящее время осуществляется комплексом геомеханических методов исследования НДС массива горных



Рис. 6. Самоличищаемый тензометр

пород и крепи и экспресс-метода регистрации ЕЭМИ бесконтактным способом для качественной оценки динамической активности массива горных пород.

При выполнении горно-экологического мониторинга на строящемся тоннеле № 6-бис в 2011–2012 гг. был выполнен комплекс одновременных измерений деформаций (напряжений) и параметров поля естественного электромагнитного излучения на замерных станциях по контролю изменений напряженно-деформированного состояния крепи с целью изучения количественной взаимосвязи параметров поля ЕЭМИ с параметрами НДС.

Изменения напряженного состояния крепи определяются по данным о смещениях и деформациях на контуре тоннеля. Методика таких определений разработана и используется при мониторинге строящихся и эксплуатируемых тоннелей НИО ОАО «Ленметрогипротранс». При таком мониторинге определяются приращения напряжений, соответствующие произошедшим относительным деформациям практически в точке наблюдения. Даже в ближайших точках деформации могут заметно различаться.

Поле ЕЭМИ образуется при изменениях НДС горных пород и является интегральным индикатором про-



Рис. 7. Прибор «Ангел» производства ВНИМИ

явлений геодинамических процессов в массиве. Для измерения параметров поля ЕЭМИ применяли переносной прибор типа «Ангела», разработанного ВНИМИ. Этот прибор регистрирует электромагнитные импульсные сигналы, которые возникают при деформировании горных пород. Амплитуда A_m поля ЕЭМИ рассчитывается как среднее арифметическое. Затем с учетом усиления это среднее арифметическое значение пересчитывается в микровольты. Параметр A_m является оценкой аномального порогового уровня пиковых амплитуд импульсов и отражает характер и интенсивность импульсного излучения пород, которая, в свою очередь, связана с интенсивностью деформирования и разрушения в зоне опорного давления подземных выработок.

При мониторинге строящегося железнодорожного тоннеля № 6-бис в 2011 г. изменение напряженного состояния бетонной крепи по всем замерным станциям на опытных участках (в сечениях 1, 2, 3 на рис. 8) оценено как незначительное (сжимающие напряжения в бетоне не превышали 2,5 МПа, или 10% от его несущей способности).

Смещения внутреннего контура крепи зафиксированы на участке Южного портала (ПК 19644+51.8), где они составили 40–50 мм. Большая часть этих смещений реализовалась в первые три дня, а затем ситуация стабилизировалась. На интервале от ПК 19643+59.0 до ПК 19643+45.0 смещения в крепи достигали 20 мм. На остальных участках смещения внутреннего контура крепи не превышали 10 мм, что сопоставимо с точностью измерений.

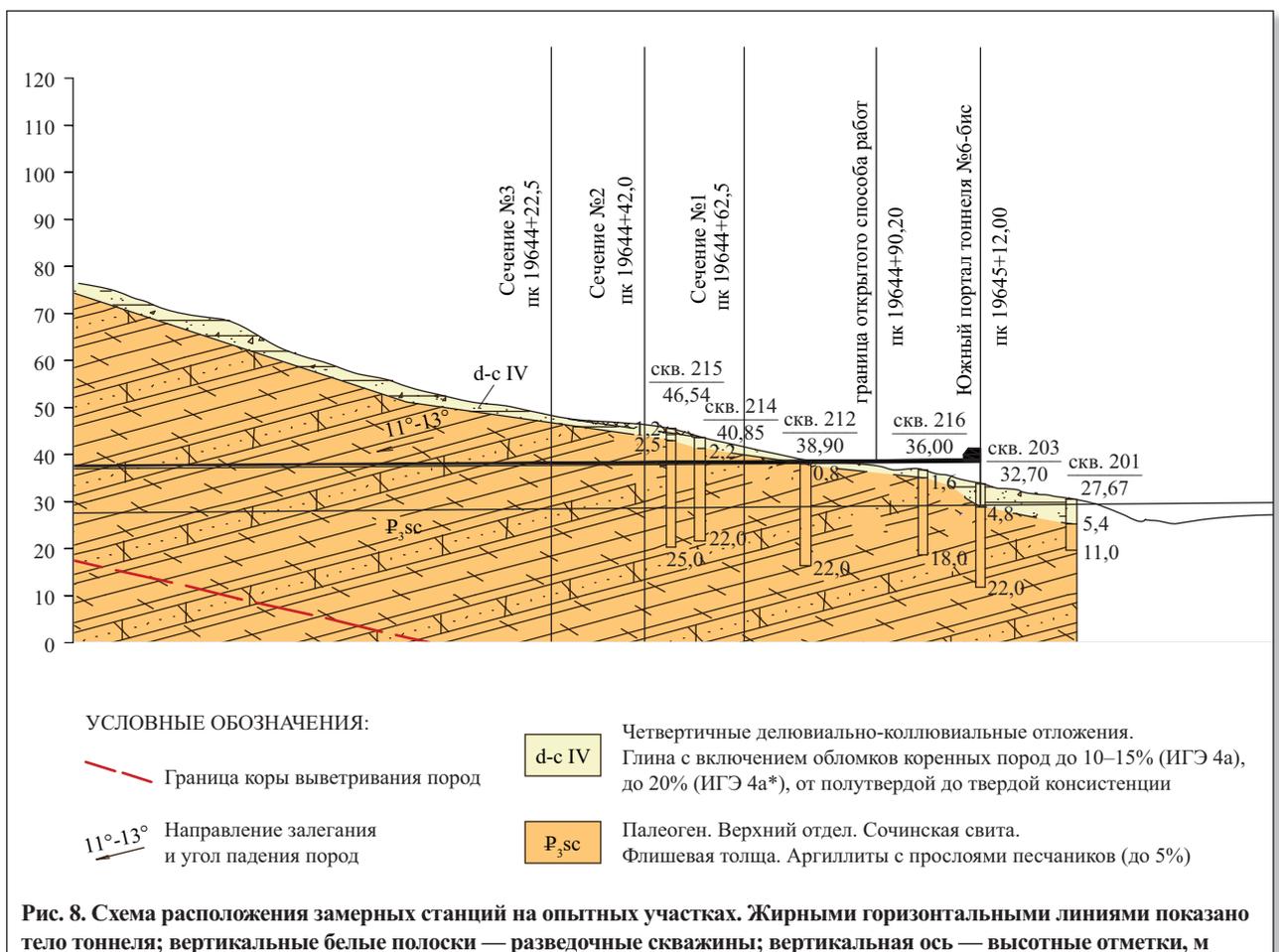
Полагая, что процессы ЕЭМИ и изменений НДС в окрестностях тоннеля являются случайными и определяются случайным характером деформирования среды и перераспределения НДС под влиянием ведения горнопроходческих работ, проведем статистический анализ взаимосвязи параметра A_m поля ЕЭМИ и напряжения σ по двум сечениям с датчиками деформаций в строящемся тоннеле № 6-бис.

При обработке экспериментальных данных чаще используется не функциональная связь между измеряемыми значениями разных параметров, а статистические зависимости между ними. Одной из мер линейной статистической зависимости между двумя переменными является коэффициент корреляции. Он показывает, как ярко выражена тенденция к росту одной переменной при увеличении другой. Коэффициент корреляции r изменяется в пределах от минус 1 до плюс 1. При $r < 0$ взаимосвязь между двумя парными переменными обратная, при $r > 0$ — прямая.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты совместных определений параметра A_m поля ЕЭМИ и напряжений. В качестве примера приведем данные, полученные при измерениях в первом и втором сечениях тоннеля № 6-бис.

На рисунке 9 приведены результаты совместных определений параметров поля ЕЭМИ и напряжений в первом сечении тоннеля слева (см. рис. 8). В целом картина изменений параметров A_m и B поля ЕЭМИ во времени сложная, что видно по изрезанности графи-





ков. Однако наблюдаются периоды относительно низкого уровня поля ЕЭМИ со второй половины июня до середины июля и с 24 октября до 26 ноября. По данным деформометров в эти периоды времени отмечалась тенденция к уменьшению деформаций (напряжений). Для временных рядов $A_m(t)$ и $\sigma(t)$ были построены распределения (рис. 10) и рассчитаны коэффициенты корреляции. Зависимость $\lg A_m(\sigma)$ аппроксимировалась прямой линией. Коэффициенты корреляции (рис. 11) получились равными 0,397 и 0,365 для датчиков, установленных соответственно на внешнем и внутреннем контурах арочной крепи. Таким образом, в данном примере корреляция между $\lg A_m$ и σ очень низкая.

В другом примере для данных совместных определений поля ЕЭМИ и деформаций (напряжений) по правой и левой стороне тоннеля, полученных во втором сечении тоннеля с 7 июля по 20 августа 2011 г. (рис. 12), было характерно следующее. Распределения сравниваемых параметров были визуально похожими (рис. 13), и рассчитанные коэффициенты корреляции оказались достаточно высокими (рис. 14), составив

0,599 и 0,859. Хотя эти результаты были получены по меньшей выборке данных, она оказалась более однородной по распределению значений напряжений σ и амплитуд A_m поля ЕЭМИ (см. графики слева на рис. 12). Кроме того, наиболее вероятным обстоятельством, обусловившим более тесную взаимосвязь ЕЭМИ и изменений НДС в крепи, в данном случае послужило активное проявление горного давления с 7 июля по 20 августа (см. рис. 12).

Для рассматриваемых временных рядов были получены следующие средние значения и их среднеквадратические отклонения:

- парные определения справа: $\lg A_m = 1,933 \pm 0,65$; $\sigma = 2,28 \pm 0,46$;
- парные определения слева: $\lg A_m = 2,271 \pm 0,7$; $\sigma = 0,87 \pm 0,25$.

Уравнение регрессии, рассчитанное по 23 парным данным для второго сечения слева:

$$\sigma \text{ (МПа)} = 0,306 \cdot \lg A_m \text{ (мкВ)} + 0,233. \quad (1)$$

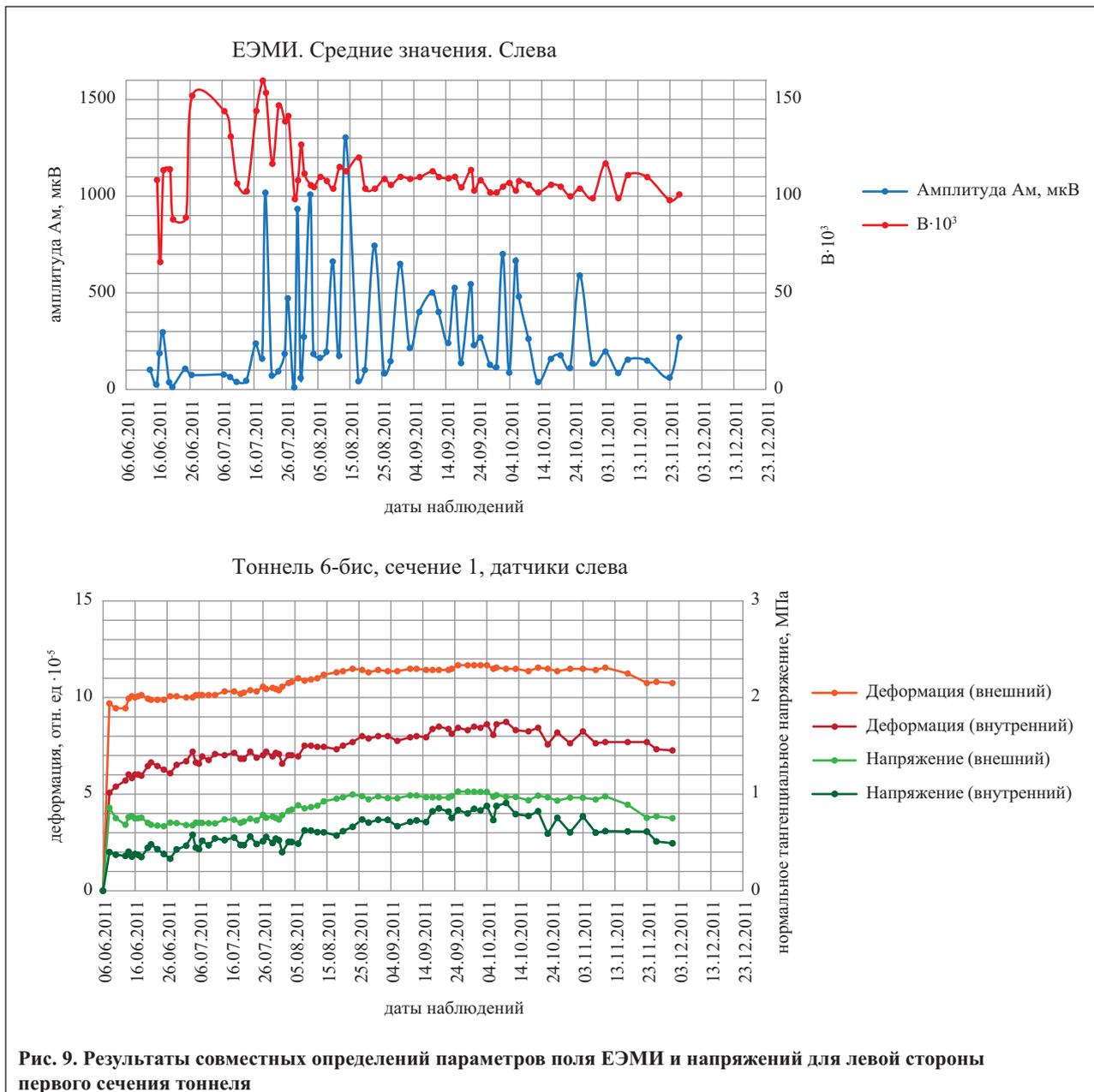


Рис. 9. Результаты совместных определений параметров поля ЕЭМИ и напряжений для левой стороны первого сечения тоннеля

Коэффициенты вариации V для рядов значений $\lg A_m$ и σ меняются в пределах от 20,0 до 33,6%, что свидетельствует о том, что изменчивость их является значительной. При $V > 33\%$ говорят о неоднозначности информации и необходимости исключения самых больших и самых маленьких значений.

Для исследуемого участка в районе расположения второго сечения слева можно проводить оценки напряжений с погрешностью порядка 15% по данным определения параметра A_m поля ЕЭМИ. Оценим достоверность — доверительную вероятность оценок σ по измеренным значениям $\lg A_m$ с помощью коэффициента Стьюдента. С вероятностью 68% истинное значение σ не отличается от его оценки по приведенному уравнению регрессии (1) больше, чем на $\pm 0,275$ МПа, и с вероятностью 95% — больше, чем на $\pm 0,5$ МПа. Естественно, что выполненные оценки верны в пределах измеренных значений σ (от 0 примерно до 1,3 МПа) и A_m (от 0 примерно до 1300 мкВ).

Приведенные примеры совместных определений параметров поля ЕЭМИ и деформаций (напряжений)

в крепи основаны пока на небольших по объему и неоднородных по составу выборках, полученных на относительно коротком временном интервале наблюдений. Кроме того, надо иметь в виду, что зарегистрированные напряжения относительно невелики (до 10% от разрушающих нагрузок). Максимальные приращения нормальных тангенциальных напряжений, рассчитанные по данным измерений деформаций, получены по датчикам на правой стороне тоннеля: в первом сечении — 1,67 МПа, во втором — 2,92 МПа, в третьем — 1,58 МПа. Ясно, что тесная связь ЕЭМИ с напряжением именно во втором сечении связана с относительно длительным и активным протеканием здесь процессов деформирования и ЕЭМИ по сравнению с другими сечениями. Более того, в 10 м от второго сечения маршейдерской службой тоннельного отряда были зафиксированы самые заметные деформации при проходке (порядка 40–50 мм).

По геологическим данным участок тоннеля в районе первого сечения характеризуется присутствием аргиллитов с прослоями глин слабой и средней устойчи-

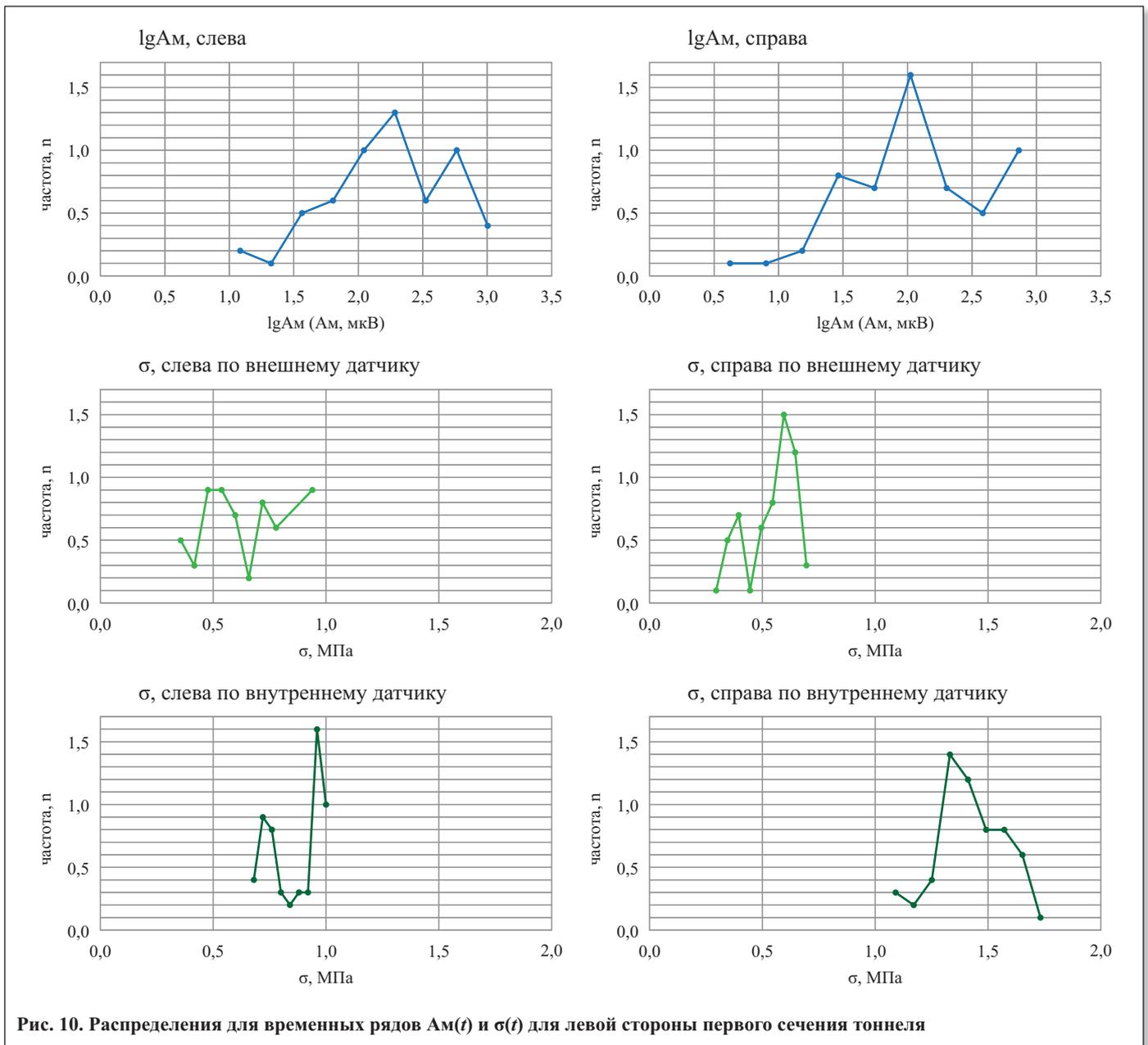


Рис. 10. Распределения для временных рядов $A_m(t)$ и $\sigma(t)$ для левой стороны первого сечения тоннеля



вости. Во втором сечении были встречены породы повышенной трещиноватости с прослоями среднетрещиноватых и интенсивно трещиноватых пород (в зоне тектонических нарушений). Причем слева по ходу от Южного портала и от первого сечения ко второму и да-

лее состояние пород хуже, чем на противоположной стороне. Можно отметить, что корреляция данных одновременных парных определений напряжений и ЕЭМИ получается более высокой также для данных для левой стороны тоннеля.

Ранее авторами предпринимались попытки установления взаимосвязей ЕЭМИ с деформациями [1] по данным комплексных геомеханических и геофизических исследований на одном из участков тоннеля с интенсивным развитием трещин в бетонной обделке в течение 5 лет при строительстве Северомуйского тоннеля. Тогда взаимосвязь ЕЭМИ с деформациями оказалась невысокой.

Параметры ЕЭМИ чутко реагируют на изменения НДС и в то же время подвержены влиянию факторов, напрямую не связанных с напряженно-деформированным состоянием (помех искусственного и природного происхождения). Поэтому провести полноценное статистическое исследование взаимосвязей ЕЭМИ с изменениями НДС по данным, полученным в натурных условиях, насколько известно авторам, пока не удавалось. С учетом относительно малого количества полученных парных определений параметров ЕЭМИ и НДС (причем последнее оценивается как незначительное) настоящие результаты следует рассматривать как предварительные. В дальнейшем предполагается продолжить исследования, а также усовершенствовать измерительную технику для регистрации ЕЭМИ и методику наблюдений НДС.

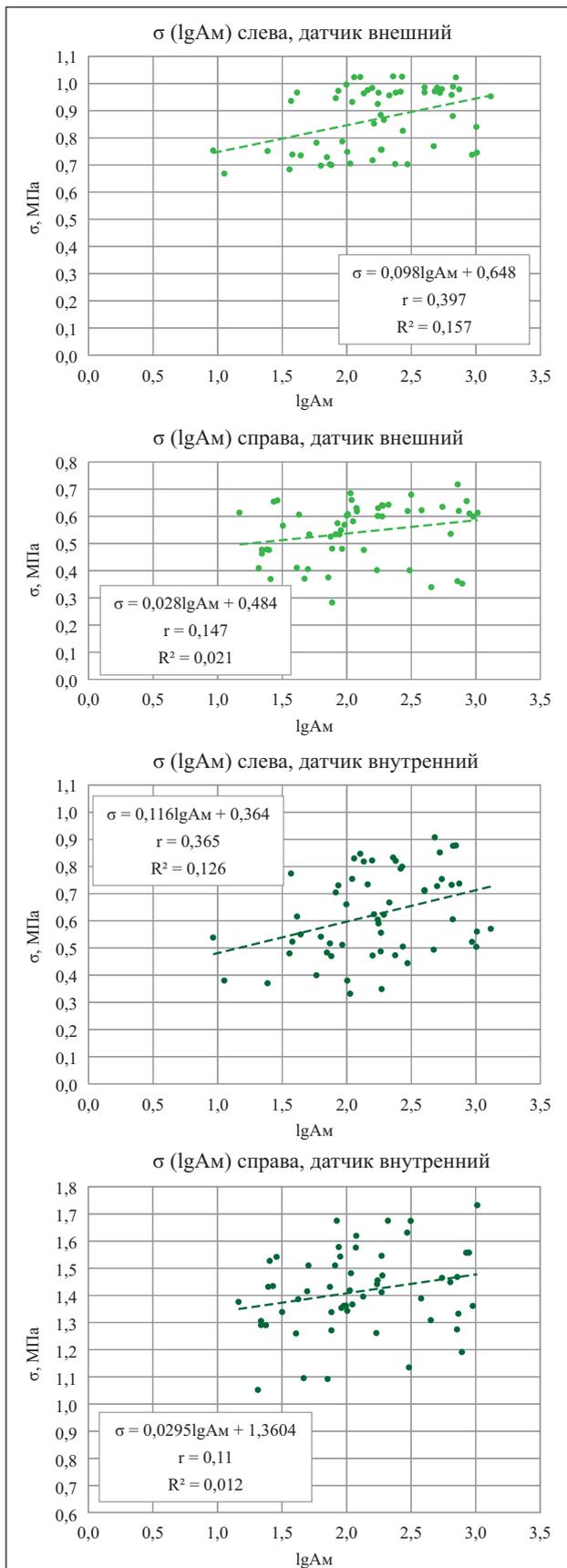


Рис. 11. Корреляционные зависимости lgAm(σ) для левой стороны первого сечения тоннеля

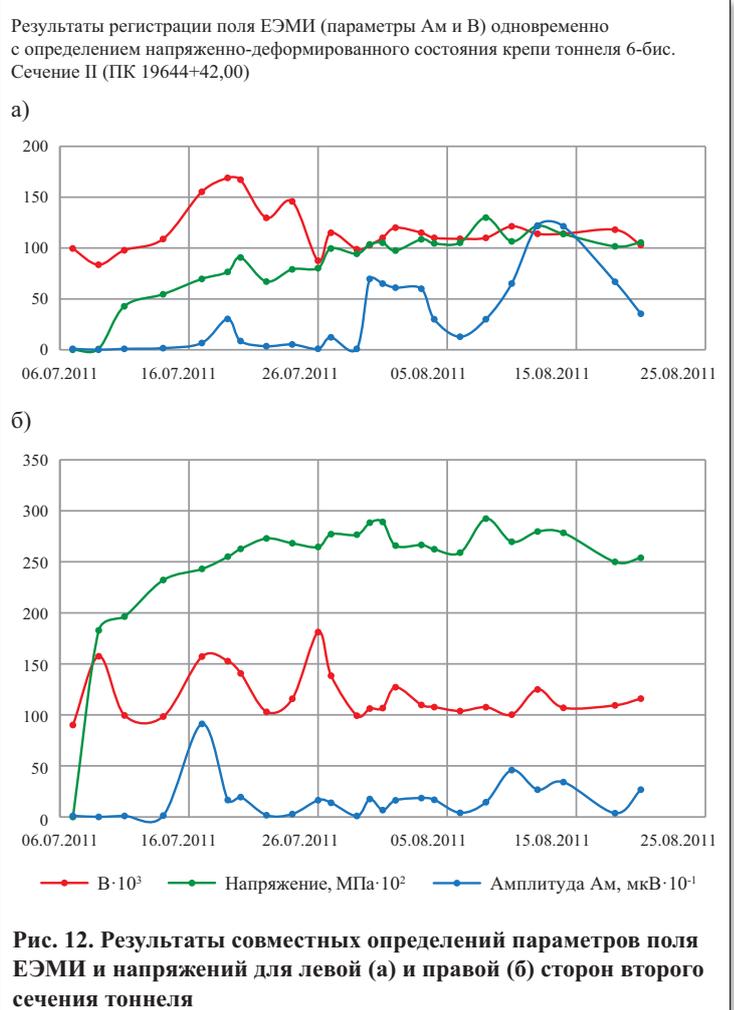


Рис. 12. Результаты совместных определений параметров поля ЕЭМИ и напряжений для левой (а) и правой (б) сторон второго сечения тоннеля

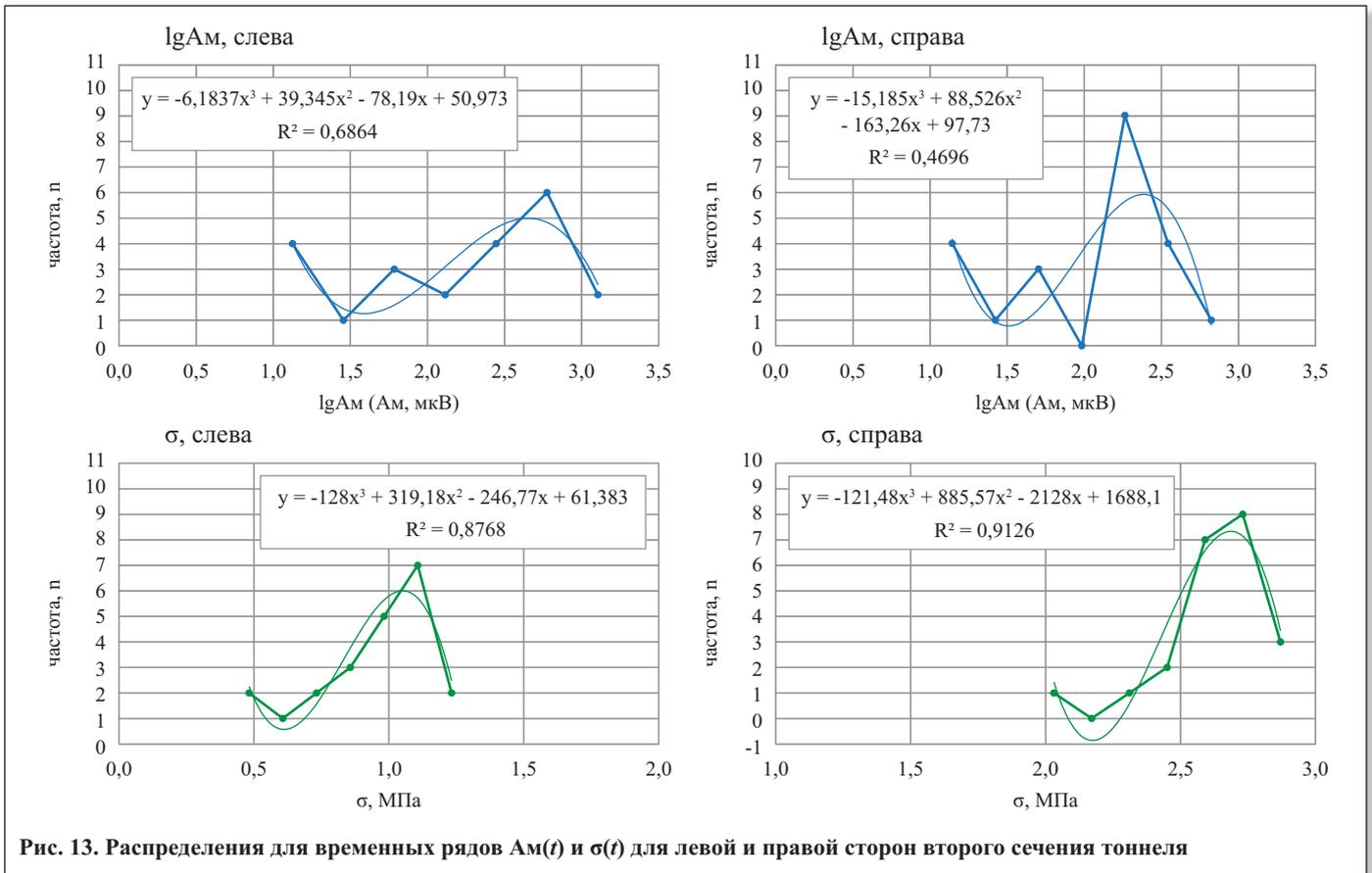


Рис. 13. Распределения для временных рядов $A_m(t)$ и $\sigma(t)$ для левой и правой сторон второго сечения тоннеля

Заключение

В результате экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния массива горных пород при сооружении тоннеля с использованием регистрации естественного электромагнитного излучения, которое используется для качественной оценки геодинамической активности в районах тоннелей, была проделана работа по поиску корреляционных взаимосвязей параметра A_m поля ЕЭМИ с напряжениями в крепи тоннеля.

Полученные коэффициенты корреляции большей частью относительно невелики ($\leq 0,5$). Самая тесная линейная связь (с коэффициентом корреляции 0,86) была установлена для случая активного деформирования на участке второго сечения по данным, полученным в июле–августе 2011 г.

Случаи относительно невысокой взаимосвязи параметров полей ЕЭМИ и НДС могут иметь самые разные причины, в том числе следующие:

- деформации (напряжения) определяются в крепи практически в точке и характеризуют изменения НДС по одной компоненте (вертикальной) и в окрестностях малого объема;
- параметры поля ЕЭМИ дают интегральную характеристику электромагнитного излучения по направлению регистрации, которое определяется ориентацией приемной антенны. В данном случае регистрировалось излучение со стороны стен.

Изменения деформаций (напряжений) в трех сечениях в 2011 г. были относительно небольшими. Напряжения в боковых сторонах тоннеля (1,74 МПа в первом сечении и 1,55 МПа в третьем), вероятно, не оказывали

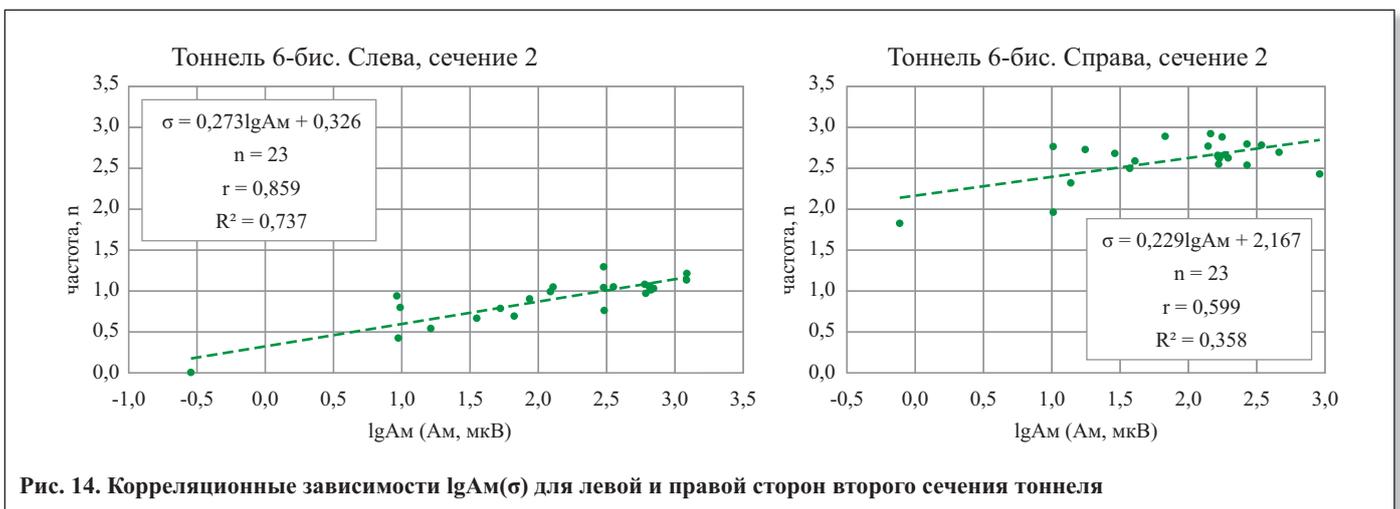


Рис. 14. Корреляционные зависимости $\lg A_m(\sigma)$ для левой и правой сторон второго сечения тоннеля



существенного влияния на характер поля ЕЭМИ. Только во втором сечении напряженное состояние массива горных пород было несколько выше (2,75 МПа).

Исследуемые процессы ЕЭМИ и изменения деформаций (напряжений) относятся к нестационарным случайным процессам, которые происходили при напряжениях не более 10% от несущей способности крепи. Однако не все такие процессы являются строго нестационарными на всем протяжении развития. Существуют нестационарные процессы, которые на известных отрезках времени и с известным приближением могут рассматриваться как стационарные. Процессы деформирования и поведения ЕЭМИ на интервале парных измерений во втором сечении — как раз такой случай, когда процессы в период с 6 июля по 20 августа можно считать почти стационарными (с постоянным среднеквадратическим отклонением), что и определило большую тесноту связи в этом случае (с коэффициентом корреляции до 0,86).

Нерешенной проблемой остается установление взаимосвязей параметров поля ЕЭМИ для более высоких напряжений в крепи, достигающих 20–30% от ее несущей способности и особенно 50–60%, когда процесс разрушения становится необратимым. Кроме того, необходимо решать задачу идентификации сигналов ЕЭМИ, не связанных с электромагнитным излучением из очагов деформирования в массиве горных пород вблизи тоннеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безродный К.П., Исаев Ю.С., Басов А.Д., Романевич К.В. Проблемы оценки напряженно-деформированного состояния горных пород методом ЕЭМИ // Труды Всероссийской конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», посвященной 80-летию академика М.В. Курлени (с участием иностранных ученых), 3–6 октября 2011 г. Т. 1. Новосибирск: Изд-во Ин-та горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 2011. С. 233–238.



Журналы представлены в flash-версиях на официальном сайте Издательского центра «Геомаркетинг»: <http://www.geomark.ru>.

Некоторые номера размещены бесплатно в режиме тестового доступа, для того чтобы визуально оценить удобство электронных версий.



С 2013 года журналы «Инженерные изыскания», «Инженерная геология», «Геориск», «Геотехника» стали доступны в электронном варианте.

Ваша компания может получить индивидуальный доступ к номерам за текущий год, а также ко всем выпускам за предыдущие годы.

Стоимость годовой электронной подписки (два логина для доступа с двух устройств одновременно):

Инженерные изыскания: 19 320 руб. Инженерная геология: 7 200 руб. Геориск: 4 800 руб. Геотехника: 7 800 руб. Стоимость онлайн-доступа ко всем журналам, включая архив: 39 120 руб.

Татьяна ФЕДОТОВА
Тел./факс: +7 (495) 366-26-84
Email: pr@geomark.ru

Ольга ИСАЙКИНА
Тел./факс: +7 (495) 366-08-85
Email: pr@geomark.ru