

На правах рукописи



**РОМАНЕВИЧ Кирилл Викторович**

**РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ И МЕТОДИКИ  
ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ВБЛИЗИ  
ВЫРАБОТОК НЕГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ**

Специальность 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**Москва 2015**

**Работа выполнена** в Федеральном государственном бюджетном учреждении Институт проблем комплексного освоения недр ИПКОН РАН

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:**

Малинникова Ольга Николаевна, доктор технических наук, зав. лабораторией ИПКОН РАН

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:**

1. Мазеин Сергей Валерьевич, доктор технических наук, начальник научно-технического отдела Исполнительной дирекции Тоннельной ассоциации России

2. Собисевич Алексей Леонидович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта

**ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:** Горный институт НИТУ "МИСиС"

Защита состоится «03» июня 2015 года, в 10<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 002.074.02 в Институте проблем комплексного освоения недр РАН по адресу 111020, Москва, Крюковский тупик, 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Институте проблем комплексного освоения недр РАН

Автореферат разослан « 29 » апреля 2015 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
докт.техн.наук

И.Ф.Жариков

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Основными природными факторами, определяющими состояние промышленной безопасности при строительстве и эксплуатации подземных сооружений, являются эндогенные процессы (современные тектонические движения земной коры, тектонические землетрясения и др.) и экзогенные геологические процессы (карстово-суффозионные явления, склоновые процессы и явления и др.). В результате протекания этих процессов происходит деструкция вмещающих горных пород, разрушение крепи и внезапные обрушения в горных выработках.

В случае возникновения аварийной ситуации при строительстве, эксплуатации, реконструкции, восстановлении, консервации и ликвидации подземные сооружения представляют серьезную опасность для находящихся в них людей и оборудования. Чрезвычайные ситуации при подземном строительстве носят характер техногенных катастроф с выходом из строя инженерных систем, сооружений и полным прекращением эксплуатации объекта. В связи с этим очевидна необходимость проведения комплексного горнотехнического мониторинга, включающего систему постоянных и непрерывных наблюдений, анализа и прогноза геодинамического состояния геологической среды, а также оценку негативного влияния горных работ на безопасность при строительстве и эксплуатации горных выработок различного назначения.

Это определяет необходимость разработки новых методов и методик, основанных на непрерывных измерениях, позволяющих оперативно исследовать развитие и прогнозировать критическое изменение напряженно-деформированного состояния, а также разрушение породного массива и конструкций подземного сооружения. К ним относится метод регистрации электромагнитного излучения, применение которого при строительстве подземных объектов в натуральных условиях было ограничено решением лишь узких специальных задач во время возникновения опасных геомеханических процессов, для решения которых достаточно нескольких циклов измерений. Кроме того, работы по регистрации электромагнитного излучения, как правило, выполнялись с целью прогнозирования крупных геодинамических явлений, таких как тектонические смещения, горные удары и др. в выработках, расположенных на значительной глубине.

Указанные факторы определяют актуальность выбранной темы, предусматривающей обоснование закономерностей взаимосвязи слабых деформаций крепей и вмещающих массивов на начальных этапах деформирования с вариациями параметров электромагнитного излучения и разработку критериев проявления ЭМИ при активизации геомеханических процессов, с помощью которых в непрерывном режиме возможно исследовать разви-

тие деформаций в крепях подземных объектов неглубокого заложения, контролировать и прогнозировать деформирование вмещающих пород и земной поверхности на всех этапах строительства и во время эксплуатации по регистрации электромагнитного излучения горных пород.

Подземными объектами неглубокого заложения в данной работе выступают горные выработки, расположенные выше критической глубины, то есть глубины от земной поверхности, начиная с которой при производстве горных работ возникают горные удары или другие геодинамические явления или установлена категория «Опасно» [Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам, РД 06-329-99, ГОСГОРТЕХНАДЗОР РОССИИ, 2003 год].

Оперативное выявление наиболее деформируемых областей во вмещающем массиве на ранней стадии методом регистрации электромагнитного излучения позволяет заблаговременно выполнить в этих зонах комплекс маркшейдерских, геомеханических, геофизических и других обследовательских работ и перейти к принятию обоснованных инженерных мероприятий.

**Целью работы** является разработка количественных критериев и методики оперативной идентификации геодинамических процессов во вмещающем массиве по регистрации электромагнитного излучения вблизи выработок неглубокого заложения для решения задач их комплексного мониторинга.

**Идея работы** заключается в использовании закономерностей и количественных взаимосвязей между вариациями электромагнитного излучения и изменениями напряженно-деформированного состояния крепи горных выработок и вмещающих массивов на начальной стадии деформирования для оперативного контроля и прогнозирования мест деформаций и возможных разрушений горных пород и конструкций подземных сооружений.

**Методы исследований** включают экспериментальные наблюдения вариаций электромагнитного излучения в натуральных условиях в железнодорожных и автодорожных тоннелях неглубокого заложения при их строительстве и эксплуатации, комплекс стандартных инженерно-геофизических методов, комплекс апробированных прямых геомеханических измерений, использование результатов маркшейдерско-геодезических измерений, а также статистический анализ результатов экспериментов.

#### **Основные задачи исследований**

1. Обосновать применение метода регистрации электромагнитного излучения для обнаружения и контроля изменений напряженно-

деформированного состояния крепи и вмещающего массива при напряжениях 5-20% от разрушающих.

2. Установить количественные взаимосвязи вариаций электромагнитного излучения и напряженно-деформированного состояния при изменениях напряжений 5-20% от разрушающих.

3. Оценить возможность прогноза местоположения и момента сдвижения (отрыва) тела оползня, а также контроля процесса деформации вмещающего массива в местах деятельности суффозионных процессов при регистрации электромагнитного излучения по профилям на припортовых склонах.

4. Разработать количественные критерии для оперативной оценки геодинамической активности массива горных пород в горной выработке.

5. Разработать методику оперативной идентификации и прогнозирования геодинамических процессов в массиве горных пород и грунтов по регистрации электромагнитного излучения.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту**

1. Активизация геомеханических процессов в виде изменения напряженно-деформированного состояния массива, в том числе вблизи подземных объектов, уже на начальной стадии деформирования массива регистрируется на дневной поверхности над горными выработками и в них в виде увеличения электромагнитного излучения более чем в два раза относительно фонового.

2. Наиболее тесная корреляционная связь (значения коэффициентов корреляции 0,80 - 0,95) между интенсивностью электромагнитного излучения и напряженно-деформированным состоянием массива соответствует временным интервалам, в которых фиксируются наибольшие скорости изменения напряженно-деформированного состояния.

3. При регистрации интенсивности электромагнитного излучения с аномальными амплитудами  $A_{\text{норм}} < 2$  скорость изменения НДС  $\sigma' = 0$  (геодинамическая активность не проявляется); при  $A_{\text{норм}} = 2 \div 4$  -  $\sigma' = 0,02 - 0,04$  МПа/сут (геодинамическая активность проявляется слабо); при  $A_{\text{норм}} = 4 \div 6$  -  $\sigma' = 0,06 - 0,18$  МПа/сут (происходит интенсивное деформирование существующих в массиве микротрещин); при  $A_{\text{норм}} > 6$  -  $\sigma > 0,18$  МПа/сут (происходит формирование очага макроразрушения, обусловленного ускоренным развитием микродефектов в массиве горных пород).

4. Разработанная на основе полученных критериев изменений интенсивности ЭМИ методика оперативного выявления наиболее вероятных зон развития деформаций массива и крепи, позволяет прогнозировать воздействие геомеханических процессов, происходящих во вмещающем

массиве на состояние крепи горной выработки по мере возрастания геодинамической активности, начиная со стадии упругого деформирования.

**Достоверность** используемых в работе геомеханических данных определяется применением надежных и широко апробированных прямых методов определения напряженно-деформированного состояния крепи.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается обеспечением достаточного объема экспериментальных выборок при их статистических оценках: в работе рассмотрены более 1000 совместных измерений ЭМИ – НДС в строящемся железнодорожном тоннеле № 6бис в период с июля 2011 г. по август 2012 г.

В работе использованы результаты комплексных геофизических и геомеханических работ в строящихся и действующих железнодорожных и автодорожных тоннелях неглубокого заложения общей протяженностью около 150 км и на дневной поверхности над ними.

### **Научная новизна работы**

1. Обосновано применение метода регистрации ЭМИ для обнаружения и контроля изменений напряженно-деформированного состояния крепи и массива при изменениях напряжений  $5 \div 20\%$  от разрушающих.

2. Впервые установлены количественные взаимосвязи параметров электромагнитного излучения и НДС крепи и массива на начальной стадии деформирования при изменениях напряжений  $5 - 20\%$  от разрушающих.

3. Впервые разработаны количественные критерии для оперативной оценки геодинамической активности массива горных пород вблизи выработки по данным отношения аномалий ЭМИ к фоновому уровню ( $A_{\text{норм}}$ ). При регистрации аномалий интенсивности ЭМИ  $A_{\text{норм}} = 1-2$  геодинамическая активность не проявляется; при  $A_{\text{норм}} = 2-4$  геодинамическая активность проявляется слабо; при  $A_{\text{норм}} = 4-6$  происходит интенсивное деформирование существующих в массиве микротрещин; при  $A_{\text{норм}} > 6$  происходит формирование очага макроразрушения, обусловленного ускоренным развитием микродефектов в массиве горных пород.

4. Разработана методика идентификации и прогноза геомеханических процессов в массиве горных пород в режиме реального времени по регистрации электромагнитного излучения для решения задач комплексного мониторинга подземных объектов неглубокого заложения.

### **Практическая значимость**

По разработанным критериям проявления ЭМИ при активизации геомеханических процессов оперативно выделяются наиболее вероятные области проявления геодинамической активности и количественно определяются их характеристики, осуществляется предварительный контроль за изменением напряженно-деформированного состояния крепи и вме-

щающего массива и заблаговременно выявляются области возможного развития необратимых деформационных, фильтрационных процессов и оползневых процессов еще на этапах начального деформирования, при слабых изменениях напряжений. Оперативное выявление наиболее деформируемых областей во вмещающем массиве на ранней стадии позволяет заблаговременно выполнить комплекс обследовательских работ и перейти к принятию обоснованных инженерных мероприятий.

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Результаты исследований использовались в 2009–2012 г. г. при проведении натурных измерений ЭМИ в строящихся и действующих транспортных тоннелях в рамках комплексного горнотехнического мониторинга, обеспечивающего строительные и эксплуатационные службы необходимыми сведениями для определения влияния строительства, технологии и режима эксплуатации тоннелей на активизацию опасных геомеханических процессов. Апробация результатов исследований проводилась на строящихся тоннелях трассы Адлер – Альпика Сервис, тоннелях второго сплошного пути Туапсе-Адлер и действующих тоннелях существующей железной дороги Туапсе-Адлер (тоннели № 4, 6, 8).

Результаты исследований использованы при разработке технологии изучения инженерно-геологических и гидрогеологических условий неразрушающими методами сверхширокополосного (СШП) зондирования и регистрации ЕЭМИ с целью получения информации о подходе забоя к границам неустойчивых и обводненных пород при строительстве тоннелей, награжденной Тоннельной Ассоциацией России (ТАР) Сертификатом победителя конкурса «На лучшее применение передовых технологий при освоении подземного пространства» в номинации «Безопасность при строительстве и эксплуатации подземных сооружений» в 2012 году.

Результаты диссертации использованы при создании системы постоянного комплексного геотехнического мониторинга для действующих транспортных тоннелей на объекте «Совмещенная (автомобильная и железная) дорога Адлер - горноклиматический курорт «Альпика-Сервис». Интерпретация информации, получаемой аппаратурой ЭМИ, ведется на базе представлений, полученных при написании данной работы.

Экономический эффект от внедрения результатов работы складывается из увеличения оперативности выделения геодинамически активных зон на дневной поверхности и в горных выработках, сокращения объемов комплексных обследовательских работ, за счет предварительного картирования аномальных областей активизации геомеханических процессов по оперативной регистрации ЭМИ. Реализация совместных наблюдений параметров ЭМИ-НДС приводит к уменьшению количества датчиков НДС, устанавливаемых в крепь выработки, и увеличению шага их установки, за счет

установления коэффициентов корреляции ЭМИ – НДС для соответствующих горнотехнических и инженерно-геологических условий.

#### **Личный вклад автора**

Автор принимал участие в формулировании целей и задач исследований, разрабатывал методики для проведения измерений, проводил эксперименты и выполнял обработку полученных данных, обобщал полученные результаты, выполнял их анализ и интерпретацию, осуществлял сбор, систематизацию и анализ данных ранее выполненных работ.

#### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: 7-ая международная конференция «Инженерная геофизика - 2011» (Москва, EAGE, 2011); 3rd International Science and Technology Conference «Rock Geology, Geology, Geomechanics and Mine Surveying» (Украина, УкрНДМІ НАН Украины, 2011); VII Общероссийская конференция «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, ПНИИИС, 2011); IX международная школа-семинар "Физические основы прогнозирования разрушения горных пород" (Иркутск, СО РАН, 2013); Международная научная школа ак. К.Н. Трубецкого (Москва, ИПКОН РАН, 2014); Научные симпозиумы «Неделя горняка» (Москва, МГУ, 2013-2014).

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

#### **Благодарности**

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю д.т.н. Малинниковой О.Н., а также заведующему лабораторией геофизики Научно-исследовательского отдела к.г.-м.н. Басову А.Д. (ОАО НИПИИ ЛМГТ) за постоянную помощь при подготовке диссертационной работы и научных статей; профессору Сочинского Государственного Университета д.т.н. Ткаченко В.П., заместителю генерального директора по Научно-исследовательской работе ОАО НИПИИ Ленметрогипротранс д.т.н. Безродному К. П. и сотрудникам Научно-исследовательского отдела ОАО НИПИИ ЛМГТ под руководством к.т.н. Исаева Ю. С. за поддержку и содействие в проведении исследований.

#### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 144 страницах машинописного текста, 60 иллюстраций, 8 таблиц, библиографического списка из 135 наименований.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** посвящена анализу современного состояния и проблем обеспечения безопасности подземного строительства, а также необходимости проведения горнотехнического мониторинга деформационных процессов геофизическими (в том числе методом регистрации электромагнитного излучения) и геомеханическими методами в толще пород и на земной поверхности при строительстве подземных сооружений. Большой вклад в развитие теории и практики методического обеспечения геомониторинга состояния горных пород и грунтов внесли Безродный К.П., Вознесенский А.С., Горяинов Н.Н., Захаров В.Н., Исаев Ю.С., Козырев, Куксенко В.С., Курленя М.В., Ляховицкий Ф.М. Мазеин С.В., Никитин В.Н., Опарин В.Н., Ржевский В.В., Тархов А.Г., Турчанинов И.А., Хмелевской В.К., Шкуратник В.Л., Ямщиков В.С., Яковицкая Г.Е. и многие другие ученые.

В качестве метода оперативного контроля динамических проявлений горного давления, деформаций и разрушений горных пород и конструкций горных выработок в работе рассматривается метод, основанный на регистрации электромагнитного излучения (ЭМИ). Источниками ЭМИ являются массивы горных пород, в которых под действием механических напряжений происходят необратимые деформации зерен минералов-диэлектриков (их массовое раскалывание), явления электроадгезии и когезии в зернах, трибоэлектризации поверхностей смещающихся зерен на стадии зарождения начальных микротрещин или деформации капилляров, заполненных электролитом (природной влагой). На стадии формирования очага разрушения и образования макро-разрывов электромагнитное излучение возникает в результате движения вершины и заряженных берегов трещин (механизм дипольного излучения зарядовой мозаики на бортах раскрывающихся трещин).

Возникновение сигналов ЭМИ происходит в диапазоне 1 кГц-50 МГц), также работы по регистрации ЭМИ с целью мониторинга состояния окружающей среды (в частности для прогнозирования сейсмособытий) успешно проводятся в диапазоне 30–1200 Гц). В данной работе рассматривается диапазон 20-50 кГц.

Впервые электризацию при пластическом деформировании, наблюдал Степанов А. В. в 1933 году. Нагружались не склонные к проявлению пьезоэффекта кристаллы каменной соли и фиксировались появления ЭМИ в процессе деформации образцов. Практического применения в то время это открытие не нашло.

Современные представления о природе ЭМИ были разработаны профессором Воробьевым А. А. в 1950-70 г.г. Интерес к этому методу, как индикатору

тору разрушения горных пород возрос в 70-х годах, в связи с проблемой прогноза землетрясений [Соболев Г. А., Гохберг М. Б., Сурков В. В., Моргунов В.А, Садовский М.А.и др]. В дальнейшем явление ЭМИ было исследовано (как в России, так и за рубежом) при деформациях различных материалов, включая щелочно-галлоидные кристаллы, металлы и сплавы, монокристаллы, горные породы и лед. Наиболее интересные результаты были получены при проведении лабораторных и натурных исследований в ИФЗ РАН [Соболев Г.А., Пономарев А.В., Гохберг М.Б.], в Томском ПУ [Воробьев А.А., Гольд Р.М., Матов Ш.Р., Малышков Ю.П., Яворович Л.В., Беспалько А.А., Саломатин В.Н., Сальников В.Н.], во ВНИМИ [Скакун А.П., Проскуряков В.М., Шабаров А.П.], в ИГД СО РАН [Курленя М. В., Опарин В. Н., Яковицкая Г. Е., Кулаков Г. И., Вострецов А.Г.], в КузГТУ [Тарасов В.В., Дырдин В.В.], в МГГУ [Ржевский В.В., Ямщиков В.С., Шкуратник В.Л., Вознесенский А. С.], в МИФИ [Сурков В. В.] и за рубежом [Nabaro F, Nitsan V., Хатиашвили Н.Г., Ogawa K., Jagasivamani V., O'Keefe S.,Yoshino T., Tomizawa I, Rabinovitch A., Bahat D. и др.].

В работах предшественников рассмотрены вопросы влияния помех различного рода на результаты регистрации ЭМИ. В частности, в работах Защинского Л. А., Саломатина В. Н., Матова Ш. Р., Соболева Г. А. и др. было показано, что пьезоэлектрический и пьезомагнитный эффекты также могут изменять свой ход под действием механических напряжений и вызывать электромагнитные возмущения в среде, но будучи связаны со слабой поляризацией, они не сопровождаются доступными простому измерению вариациями электромагнитных полей, и обычно, при изучении ЭМИ, рассматриваются как фон, на котором проявляются возмущения связанные с необратимыми деформациями. Состояния избыточной электризации, вызываемые в геологических средах механическими напряжениями, неустойчивы и быстро релаксируют. Процессы релаксации в ближней зоне источников сопровождаются проявлениями заметных токов проводимости и индуцируемых ими магнитных полей; в дальней зоне наблюдаются возмущения полей волнового характера, трудно отличимые от промышленных помех, меняющихся естественных электрических полей, полей ближних и дальних атмосфериков, излучения магнитосферы и ионосферы и полей ближних и дальних радиостанций. Поэтому для практических целей ЭМИ изучается, как правило, в ближней зоне.

В «Указаниях по применению метода естественного электромагнитного излучения» разработанных ВНИМИ, определяются пути минимизации помех при регистрации ЭМИ. В частности, регламентируется расстояние от места регистрации до работающих электрических машин и

оборудования, ориентация датчика (рамочной антенны) относительно оси выработки, количество контрольных измерений и др.

В данной диссертационной работе были применены положения этих "Указаний...". Кроме того, применяемая в ходе проводимых исследований современная аппаратура, позволяет устранять гармоническую составляющую поля (промышленная частота 50 Гц и ее гармоники) с помощью фильтров антенны и блока регистрации, выполнять учет влияния регулярной импульсной составляющей помех (промышленные помехи, атмосферика и др.), который выполняется автоматически по выборке сигналов во время каждого наблюдения.

Наиболее интенсивно ЭМИ проявляется в геологических процессах, протекающих вблизи земной поверхности и в значительных объемах горных пород, что имеет место и при оползнях. Благодаря связи доступных наблюдению параметров ЭМИ с кинетикой оползневых движений, на таких наблюдениях уже достаточно давно предложено базировать методы прогнозирования и исследований оползневых явлений [Защинский Л. А., Саломатин В. Н. Матов Ш. Р. и др].

Исследования ЭМИ в транспортном тоннелестроении для контроля динамических проявлений горного давления выполнялись при строительстве БАМа (ЦНИИС, ЛМГТ) [Басов А. Д., Безродный К. П.]. Метод ЭМИ в варианте регистрации интенсивности счета импульсов электромагнитного излучения применялся для решения задач опережающей бесскважинной разведки из забоев на Северомуйском тоннеле и для исследований с поверхности над трассами тоннелей БАМа для выявления зон тектонических нарушений и блоков горных пород с высоким уровнем напряжений.

Применяемая в те годы аппаратура регистрации ЭМИ, фиксировала только количество импульсов в единицу времени, но не их амплитуды, что не позволяло даже качественно оценить энергию протекающего процесса и, следовательно, не отражало адекватно реальную ситуацию изменений НДС на участке наблюдений. Поэтому однозначной интерпретации результатов наблюдений не получалось, особенно, на новых участках с неизвестной динамикой изменения НДС.

Во **второй главе** представлено описание комплекса методов, применявшегося при проведении изыскательских работ для составления прогнозных планов горнотехнических условий вдоль проектных трасс железнодорожных и автодорожных тоннелей и горнотехнического мониторинга транспортных тоннелей на этапах строительства и эксплуатации.

Полевые сейсмические исследования проводились с помощью 24-х канальной сейсмостанции типа МСС-1 по методике непрерывного сейсмопрофилирования методом преломленных (МПВ) и рефрагированных волн. В результате получали сейсмотомографические разрезы по скоростям продольных и поперечных (и релеевских) волн, являющиеся основанием для выделения ослабленных зон, а также для расчета деформационно-прочностных характеристик.

Полевые электроразведочные измерения осуществлялись аппаратурой СЭР-1. В результате обработки полевых данных получали томографическую двумерную (2-D) модель сопротивления среды в Ом·м.

Исследования методом электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования (СИШП), основанного на синтезировании изображения структуры геологического разреза или инженерного сооружения по отраженному сигналу при распространении электромагнитных импульсов наносекундной длительности, проводились НПФ «Геодизонд». Данный метод позволяет при измерениях в фиксированных точках дневной поверхности подробно дифференцировать различные инженерно-геологические элементы в разрезе и идентифицировать их на основе собственных геоэлектрических свойств.

Для оперативного контроля геомеханических процессов в горном массиве и крепях выработок в рамках системы горнотехнического мониторинга на строящихся и действующих тоннелях в Сочинском регионе проводились режимные наблюдения нетребующим контакта с исследуемым массивом методом ЭМИ на этапах изысканий, строительства и эксплуатации транспортных тоннелей. Использовался прибор «АНГЕЛ» разработки ВНИМИ и прибор ЕЭМИ-ПМ (созданный на основе аппаратуры «АНГЕЛ») разработки ОАО «Ленметрогипротранс» и НПП «ЭРА».

Аппаратура регистрации ЭМИ, в автоматическом режиме, выполняет прием сигналов переменного магнитного поля на антенну, в течение заданного интервала времени, в полосе частот 20-50 кГц, и выделяет импульсную составляющую нестационарных сигналов, связанную с естественным излучением горных пород. Фиксированное направление приема излучения задают ориентацией антенны.

Данная аппаратура оценивает интенсивность излучения  $A$  по выборке пиковых амплитуд импульсов, генерируемых горными породами. Параметр  $A$  является оценкой аномального порогового уровня пиковых амплитуд импульсов – амплитудным показателем и отражает характер и интенсивность импульсного излучения, которые в свою очередь связаны с интенсивностью деформирования и разрушения горных пород. Профи-

лирование методом ЭМИ проводилось на дневной поверхности, в тоннелях, штольнях и во вспомогательных горных выработках. При профилировании с шагом 5 – 10 метров, измерялись вертикальная и горизонтальная компоненты поля.

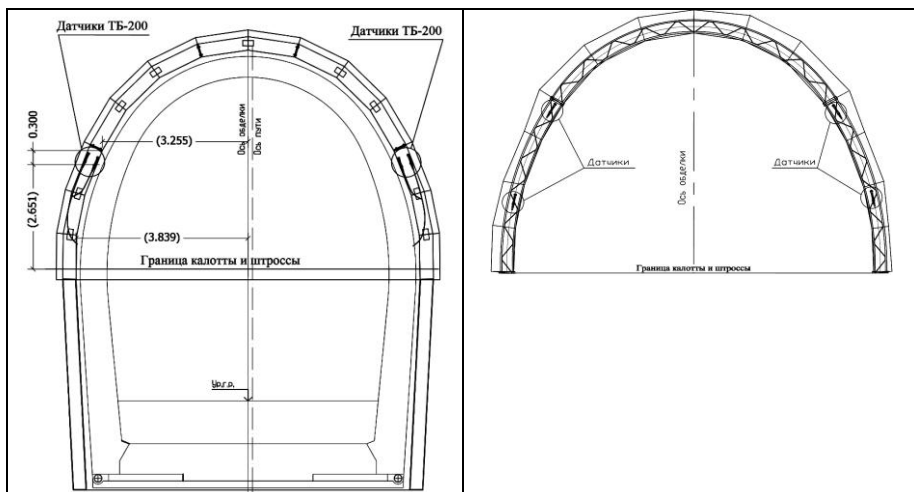
В комплексе с другими методами системы горнотехнического мониторинга (геодезическо-маркшейдерские, геофизические, геомеханические и гидрогеологические наблюдения, инженерно-геологические исследования и др.), методом ЭМИ производилась оценка устойчивости оползневых склонов, оценивалась активность геомеханических процессов массивов в местах просадок земной поверхности, связанных с оползневой деятельностью, суффозионными процессами, строительством подземных сооружений.

С целью изучения количественных взаимосвязей, в тоннеле №6 бис с июня 2011 года по август 2012 года проводились режимные измерения поля ЭМИ совместно с определением НДС крепи в натуральных условиях. В результате анализа данных и их обработки строились графики распределения параметров ЭМИ и НДС, рассчитывались уравнения регрессии, оценивались их взаимосвязи.

Определение напряженно-деформированного состояния крепи и пропорциональных ему напряжений в массиве заключалось в измерении в натуральных условиях деформаций в конструкциях крепи. Напряжения в крепи определялись с помощью датчиков-деформометров - преобразователей линейных деформаций измерительных струнных ТБ-200 (РФ) и замоналичиваемых струнных тензометров, производства компании Soil Instruments (UK). Затем измеренные деформации по специальной методике пересчитывались в напряжения.

Все датчики перед бетонированием крепились обычной вязальной проволокой на внешнем и внутреннем контурах двутавровой арки. При возведении крепи из армоарок монтаж датчиков осуществлялся в центре поперечного сечения арматурного каркаса (рис. 1). 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.

Усилия в бетонных, набрызгбетонных и железобетонных конструкциях с учетом их ползучести определялись по измеренным деформациям элементов конструкций.



**Рисунок 1 - Схема расположения датчиков в крепи на ПК 19644+62,5 в двутавровую арку (рисунок слева) и на ПК 19644+22,5 в арматурную арку (рисунок справа). Тон. №6 бис**

Относительные деформации материала конструкции, определяются по результатам измерений периода колебаний струнных датчиков по формуле:

$$\varepsilon_{ni} = \left[ \left( \frac{A}{T_i^2} + \frac{B}{T_i} \right) - \left( \frac{A}{T_0^2} + \frac{B}{T_0} \right) \right] \cdot 10^{-5} \quad (1)$$

где:  $A$  и  $B$  - постоянные коэффициенты датчика, определяемые заводом-изготовителем при его градуировке;  $T_1$  и  $T_0$  - период колебаний струны датчика [мкс] в текущей и нулевой сериях измерений.

Принимая бетон как линейно-деформируемый упруго-ползучий материал, можно сказать, что напряжения и деформации в бетоне связаны между собой соотношениями:

$$\sigma_{bj}(t) = E(t)\varepsilon_j(t) + \int_{t_0}^t K(t, \tau)\sigma_{bj}(\tau)d\tau \quad (2)$$

где:

$$K(t, \tau) = E(t) \frac{d}{d\tau} \left[ \frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \right] \quad (3)$$

$E, C$  - модуль деформации и мера ползучести бетона.

При известных деформациях  $\varepsilon_j(t)$  напряжения  $\sigma_{b_j}(t)$  определяются путем решения интегральных уравнений (2).

Напряжения в стальных конструкциях, непосредственно на которых установлены датчики, определяются по закону Гука

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) \quad (4)$$

здесь  $E$  – модуль упругости конструкции, на которой определены деформации.

Рассчитанные таким образом напряжения в крепи являются суммой геостатического давления вмещающих тоннель пород (горного давления), тектонического поля начальных напряжений, внешнего гидростатического давления подземных вод, сейсмического воздействия землетрясений в данной точке измерений и т. п., они прямо пропорциональны напряжениям, действующим в окружающем тоннель массиве, то есть возрастают при возрастании напряжений в массиве. Геомеханические процессы развития НДС в массиве приводят к геодинамическим событиям, которые могут быть зарегистрированы по многократному определению напряжений в крепи струнными преобразователями деформаций. Геодинамическая активность может быть зарегистрирована и с помощью оперативного метода регистрации ЭМИ для оценки развития геомеханического процесса на ранней стадии по аномальному импульсному излучению.

В **третьей главе** приведены результаты регистрации ЭМИ на дневной поверхности над горными выработками на этапе изысканий и внутри горных выработок в период строительства и эксплуатации транспортных тоннелей в комплексе методов системы горнотехнического мониторинга.

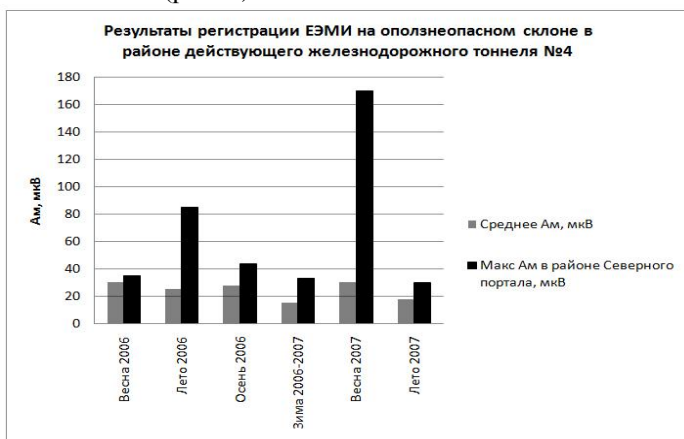
В результате анализа большого объема полученных данных установлено, что аномальные зоны, выделенные по повышенным значениям интенсивности ЭМИ на дневной поверхности над выработками и внутри них (превышение над фоном ЭМИ в 3-4 раза), соответствуют областям развития геомеханических процессов, приуроченным к геологическим неоднородностям в массиве, выявленным комплексом геофизических методов, а также по факту проходки тоннелей. Таким образом, обосновано применение метода регистрации электромагнитного излучения в условиях проявления геомеханических процессов на начальной стадии деформирования в районе влияния горных выработок для контроля изменений НДС.

Примером прогнозирования горнотехнических условий до начала разработки массива является аномалия, выделенная на этапе изысканий методом ЭМИ на ПК 148+40 железнодорожного тоннеля №1. По факту

проходки в районе этого пикета (ПК 148+43,30 - 148+46,00) в восточной части вскрыта карстовая полость (120 м<sup>3</sup>), заполненная водой.

По результатам исследований ЭМИ внутри горных выработок в период строительства и эксплуатации тоннелей составлена таблица взаимосвязи тектонической нарушенности вмещающего массива по данным комплексных геофизических наблюдений с областями аномального проявления ЭМИ.

Также в данной главе приведены примеры аномального проявления ЭМИ в областях активизации геомеханических процессов на оползневых склонах и местах просадок дневной поверхности в результате суффозии. Примером прогнозирования геодинамической активности оползневого склона (отрыв оползня) с помощью метода регистрации ЭМИ в районе действующего железнодорожного тоннеля являются проводимые ОАО «Ленметрогипротранс» мониторинговые наблюдения на перегоне Дагомыс-Сочи, где участок железной дороги пересекает оползневой склон – Мамайский оползень (рис. 2).



**Рисунок 2 – Результаты регистрации ЭМИ на оползнеопасном склоне в районе действующего железнодорожного тоннеля №4**

Анализ результатов комплексного горнотехнического мониторинга по данному объекту в марте-апреле 2007 г. позволил сделать вывод о существенном повышении вероятности схода оползня рядом с Северным порталом. Предупреждение о вероятном сходе оползня в виде заключения в начале апреля 2007 г. было передано Заказчику (ДКРС) и службам СКЖД для подготовки сценария реагирования на возможный сход оползня. В конце апреля того же года мероприятия по предотвращению начали реализовываться. Это существенно снизило ущерб от схода оползня, ко-



торый произошел 2 мая 2007 года на участке 20-80 м от Северного портала с выносом грунтовых оползневых масс на железнодорожный путь.

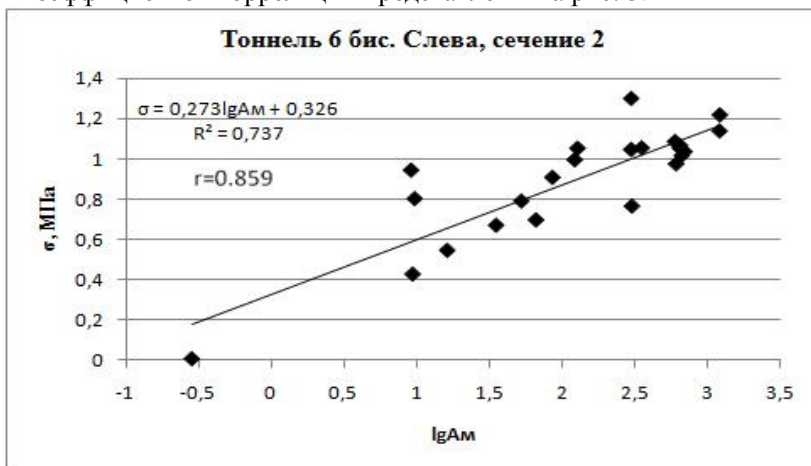
В качестве второго примера прогнозирования активизации оползневого склона с помощью метода регистрации ЭМИ в работе приведены результаты мониторинговых наблюдений на участке железной дороги Хоста - Адлер. В зоне разуплотнения, выделенной ранее в результате геофизических работ, в период с 5 по 14 апреля 2011 г. произошла подвижка грунта с образованием линии отрыва. По результатам профилирования ЭМИ 5 апреля 2011 г. на поверхности исследуемого склона в центральной части тоннеля была зафиксирована высокая интенсивность ЭМИ (до 200 мкВ). А 14 апреля, в день образования отрыва, на склоне по профилю наблюдений ЭМИ на участке отрыва были зафиксированы всплески ЭМИ до 400 мкВ.

При измерениях ЭМИ в районе просадки дневной поверхности в районе Северного портала тоннеля №6 бис, наиболее ярко проявляющаяся аномалия (выделявшаяся практически на каждом этапе профильных наблюдений с разной интенсивностью) соответствует аномалиям, выделенным в этой же зоне методами инженерной сейсмозазведки, георадиолокационной съемки и электроразведки. В этой области неоднократно фиксировали интенсивное трещинообразование конструкций здания. По результатам профилирования методом регистрации ЭМИ на поверхности над строящимся железнодорожным тоннелем №6 бис можно говорить о стабильном выделении областей активных деформаций массива горных пород в плане до глубин 7.5–15 метров.

Также приведены результаты расчетов количественных соответствий параметров ЭМИ и НДС крепи на примере экспериментальных исследований при строительстве тоннеля №6 бис на участке Сочи-Адлер Северокавказской железной дороги с июля 2011 г. по август 2012 г. и выполнена их комплексная интерпретация.

Эти наблюдения имели своей целью переход от качественного анализа НДС крепи и пропорционального ему НДС вмещающего массива методом регистрации ЭМИ к количественным прогнозным показателям, позволяющим проводить диагностику предразрушающего состояния участков массивов и удовлетворительно описывающих активизацию геомеханических процессов в массиве горных пород по соответствующим изменениям в структуре сигналов электромагнитного излучения на различных стадиях его нагружения. Были созданы базы данных совместных измерений ЭМИ и НДС, после чего эти данные были подвергнуты регрессионному анализу.

Пример взаимосвязи, вычисленных уравнений регрессии и полученных коэффициентов корреляций представлены на рис. 3.



**Рисунок 3 - Графики взаимосвязи, уравнения регрессии и коэффициенты корреляции параметра  $\lg A_m$ , где  $A_m$  в мкВ и  $\sigma$  в МПа по данным 23 парных измерений, полученных на втором сечении в тоннеле №6 бис в период наблюдений с 7.07.2011 по 20.08.2011**

В работе экспериментально установлено, что важным обстоятельством, обуславливающим тесную взаимосвязь ЭМИ и НДС, служит активное проявление деформирования крепи, поэтому дальнейшие исследования взаимосвязи ЭМИ – НДС проводились во время разработки нижнего уступа тоннеля, когда процессы изменения НДС активизировались.

В процессе продвижения уступа штроссы тоннеля №6 бис со стороны Южного портала контролировалась устойчивость вмещающего массива и конструкций тоннеля в местах ведения проходческих работ по шести замерным станциям методом ЭМИ. Замерные станции приурочивались к опытным участкам оснащенными датчиками контроля НДС.

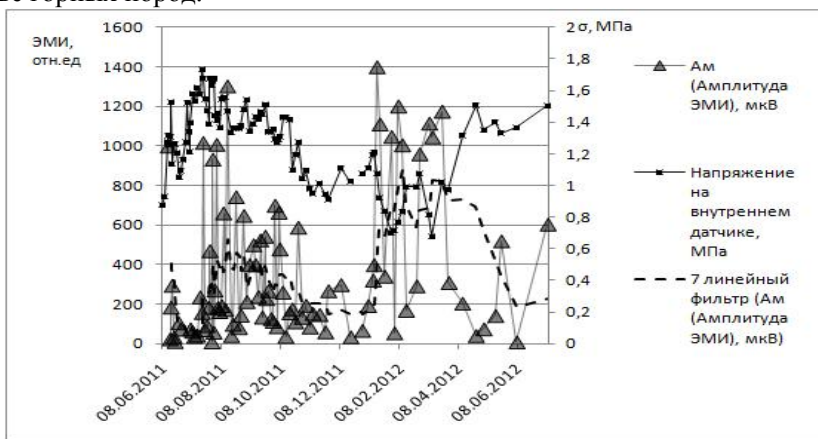
В ходе количественного анализа взаимосвязей ЭМИ и НДС во время разработки нижнего уступа в тоннеле №6 бис, при слабых изменениях НДС, которые составили 5–20% от разрушающих напряжений, установлены следующие закономерности:

- для всех опытных участков наблюдается соответствие изменений параметров ЭМИ и НДС, что отражает качественную взаимосвязь этих явлений, причем ЭМИ регистрируется и при сжатии, и при растяжении, фиксируемых датчиками;

- главным обстоятельством проявления ЭМИ является достаточно резкое изменение НДС крепи (рис.4).

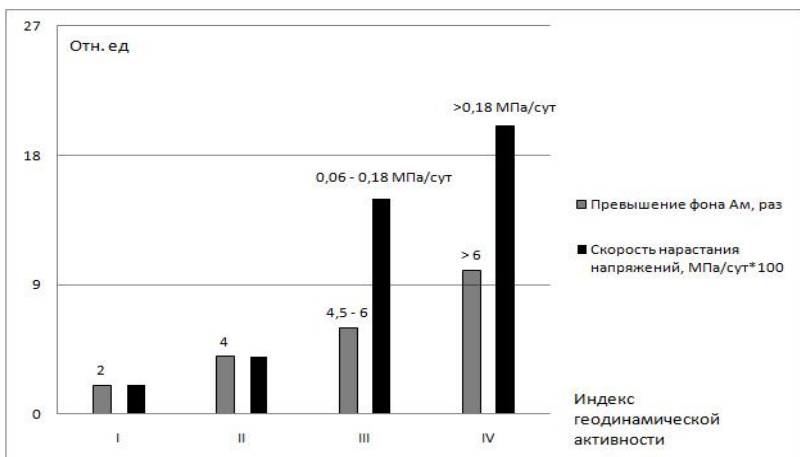
В четвертой главе выполняется анализ экспериментальных данных совместной регистрации ЭМИ – НДС на сечениях с датчиками №№ 1–6 тоннеля №6 бис и разрабатываются критерии оперативной идентификации и прогнозирования геомеханических процессов в массиве горных пород и грунтов по данным регистрации электромагнитного излучения.

Кривые напряжений разбиты на участки с разными скоростями нарастания напряжений  $\sigma'$ , после чего рассчитаны количественные соответствия между аномальными значениями  $A_{\text{норм}}$  и  $\sigma'$  ( $A_{\text{норм}}$  – отношение амплитудного параметра  $A$  и среднего значения амплитуды фона  $A_{\text{ф}}$ ). В результате построена гистограмма (рис. 5), показывающая взаимосвязи  $A_{\text{норм}}$  со скоростью нарастания напряжений на всех опытных участках  $\sigma'$  и сделаны следующие выводы. При регистрации аномалий интенсивности ЭМИ  $A_{\text{норм}} = 1-2$  геодинамическая активность не проявляется; при  $A_{\text{норм}} = 2-4$  геодинамическая активность проявляется слабо; при  $A_{\text{норм}} = 4-6$  происходит интенсивное деформирование существующих в массиве микротрещин; при  $A_{\text{норм}} > 6$  происходит формирование очага макроразрушения, обусловленного ускоренным развитием микродефектов в массиве горных пород.



**Рисунок 4 – Пример качественного соответствия параметров ЭМИ и НДС крепи. Тоннель №6 бис, сечение №1, внутренний датчик**

На основе обобщения экспериментальных взаимосвязей ЭМИ с НДС разработаны критерии проявления аномального ЭМИ при активизации геомеханического процесса проявления геодинамической активности (таб. 1). Эти критерии использованы для решения задач комплексного горнотехнического мониторинга объектов подземного строительства.



**Рисунок 5 – Гистограмма распределения  $A_{\text{норм}}$  и  $\sigma'$  по экспериментальным данным в тоннеле №6 бис**

**Таблица 1**

<b>Критерии проявления ЭМИ при активизации геодинамических процессов</b>				
№	Индекс геодинамической активности	Изменение НДС $\sigma'$ , МПа/сут.	Амплитуда ЭМИ, $A_{\text{норм}}$ , отн. ед.	Характеристика геодинамической активности
1	I	0	1 - 2	Не проявляется
2	II	$\leq 0,04$	2 - 4	Проявляется слабо
3	III	0,04 – 0,18	4 - 6	Фиксируется геодинамическая активность, связанная с интенсивным деформированием существующих трещин в исследуемом массиве горных пород и образованием новых микротрещин
4	IV	$> 0,18$	$> 6$	Фиксируется начало этапа формирования очага макроразрушения, обусловленного ускоренным развитием микродефектов в массиве горных пород

## Заключение

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований дано новое научно обоснованное техническое решение задачи оперативной идентификации геодинамических процессов во вмещающем массиве горных пород по регистрации электромагнитного излучения вблизи выработок неглубокого заложения.

Эта задача имеет важное экономико-технологическое значение для обеспечения проектно-изыскательских, строительных и эксплуатационных служб сведениями, необходимыми и достаточными для определения влияния строительства, технологии и режима эксплуатации объектов подземного строительства на активизацию опасных геомеханических процессов в режиме реального времени. Целью предоставления такой информации является определение аномальных областей для последующих детальных комплексных геотехнических наблюдений, а также выбор наиболее безопасных технологий строительства и технологических режимов эксплуатации.

Основные научные результаты и выводы работы, полученные лично автором, заключаются в следующем.

1. Обосновано применение метода регистрации электромагнитного излучения на дневной поверхности над горными выработками и внутри них для обнаружения и контроля изменений НДС крепи и массива при изменениях напряжений 5 – 20 % от разрушающих.

2. Установлены количественные взаимосвязи параметров электромагнитного излучения и НДС крепи и массива на начальной стадии деформирования при изменениях напряжений 5 - 20% от разрушающих: наиболее тесная корреляционная связь параметров ЭМИ – НДС: 0,87 – 0,95, соответствуют участкам с наибольшей скоростью изменения НДС (0,11 - 0,18 МПа/сутки).

3. Показана возможность прогноза местоположения и момента сдвижения (отрыва) тела оползня, а также контроля процесса деформации вмещающего массива в местах деятельности суффозионных процессов при регистрации электромагнитного излучения по профилям на припортовых склонах объектов подземного строительства.

4. Разработаны количественные критерии для оперативной оценки геодинамической активности массива горных пород в выработке. При регистрации аномалий амплитудного параметра  $A_{\text{норм}} = 1-2$  геодинамическая активность не проявляется; при  $A_{\text{норм}} = 2-4$  геодинамическая активность проявляется слабо; при  $A_{\text{норм}} = 4-6$  происходит интенсивное деформирование существующих в массиве микротрещин; при  $A_{\text{норм}} > 6$  проис-

ходит формирование очага макроразрушения, обусловленного ускоренным развитием микродефектов в массиве горных пород.

5. Разработана методика оперативной идентификации и прогнозирования геодинамических процессов в массиве горных пород и грунтов по регистрации электромагнитного излучения.

Методика позволяет оперативно выявить наиболее вероятные зоны развития деформаций массива и крепи и прогнозировать негативное воздействие геомеханических процессов, происходящих во вмещающем массиве на состояние крепи выработки по мере проявления стадий геодинамической активности, начиная со стадии упругого деформирования.

Выявление наиболее деформируемых областей во вмещающем массиве на ранних стадиях и контроль развития геомеханических процессов позволяет заблаговременно выполнить комплекс маркшейдерских, геомеханических и геофизических работ и перейти к принятию обоснованных инженерных мероприятий по защите крепи горной выработки от разрушения.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В рецензируемых изданиях**

1) Романевич К. В. «Горно-экологический мониторинг при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей в г. Сочи». Вестник СГУТиКД. 2011. № 3 (17). Стр. 272 – 278.

2) Басов А. Д., Романевич К. В. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния горных пород и конструкций крепи при строительстве тоннеля на участке Сочи-Адлер Северокавказской железной дороги//«Инженерная геология». №6/2013 год, стр. 28 – 37

### **В других изданиях**

3) Безродный К.П., Басов А.Д., Романевич К.В. "Контроль напряженно-деформированного состояния массива горных пород при строительстве тоннелей методом ЕЭМИ. //Известия ТулГУ. Науки о Земле. Вып. 1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 227-234.

4) Безродный К.П., Исаев Ю.С., Басов А.Д., Романевич К.В. Проблемы оценки напряженно-деформированного состояния горных пород методом ЕЭМИ. / «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», Всероссийская конференция с участием иностранных ученых (2011; Новосибирск). Труды Всероссийской конференции «Геодинамика и напря-

женное состояние недр Земли», посвященной 80-летию академика М.В. Курлени (с участием иностранных ученых) (3-6 октября 2011 г.). В двух томах. Т. 1. – Новосибирск: Ин-т горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, 2011. С. 233-238.

5) Романевич К. В. «Бесконтактный метод оценки напряженно-деформированного состояния горных пород при строительстве транспортных тоннелей в Сочи». НАУКОВІ УКРНДМІ НАН УКРАЇНИ. Випуск 9 (частина I) / Під заг. ред. А. В. Анциферова. – Донецьк, УкрНДМІ НАН України, 2011. – Стр. 154 – 163.

6) Басов А.Д., Романевич К.В. Регистрация естественного электромагнитного излучения в строящихся тоннелях. //Метро и тоннели. №6. – М, 2011. С. 31-32.

7) Романевич К. В. «Мониторинг геодинамической активности методом естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ)», Наука Кубани №2, 2012 год, стр.51 – 56

8) Басов А. Д., Романевич К. В., Шляев С. А. «Электомагнитное излучение в зонах деформационных предвестников землетрясений» Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: тезисы докладов IX Международной школы-семинара, Иркутск, 2-6 сентября 2013 г. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. 115 с.

9) Романевич К.В., Малинникова О.Н. Методика выявления геодинамически активных зон по регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) для решения задач комплексного горнотехнического мониторинга транспортных тоннелей/ Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр//Международная научная школа ак. К.Н. Трубецкого. М.: ИПКОН РАН. - 2014. - С.162-165.

Лицензия ЛР №21037. Подписано в печать с оригинал-макета 24.02.2015 г. Формат 60x84 1/16. Бумага «Мега Сору Office». Печать офсетная. Набор компьютерный. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 209.

---

Издание ИПКОН РАН  
111020 г. Москва, Крюковский тупик, д. 4