

В. Ф. Гордеев^{1}, С. Г. Шталин², С. Ю. Мальшиков¹, В. И. Поливач¹*

Внедрение методов механоэлектрических преобразований вузовской и академической науки

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН), г. Томск, Российская Федерация

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, (ТУСУР) г. Томск, Российская Федерация
* e-mail: gordeev@imces.ru

Аннотация. Внедрение научных разработок всегда имеет большое значение, когда исследования проводятся вузовским и академическим коллективом, позволяющим комплексно подходить к решению поставленных задач. В качестве объектов исследования использовались конструкционные материалы радиопромышленности и твердотопливных ускорителей, элементы летательных аппаратов, включая качество приклейки теплозащитных плиток космического летательного аппарата многоразового использования «Буран», материалы и объекты строительной отрасли, оползни, картирование живущих геологических разломов, литологических нарушений, разработка научных основ геофизических методов, включая поиск месторождений углеводородов. Описан неразрушающий контроль диэлектрических материалов по параметрам электромагнитной эмиссии (ЭМЭ). Систематические исследования естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) при фундаментальном подходе к изучению механизмов данного явления позволили внедрить новый геофизический метод в области наук о Земле. Приведены технические средства, основанные на использовании явления механоэлектрических преобразований в твердых телах, внедренных, как неразрушающий контроль качества, в народное хозяйство. В работе представлены фактические результаты опережающего прогноза геодинамических процессов по параметрам ЕИЭМПЗ на оползневом склоне магистрального газопровода «Уренгой-Помары-Ужгород». Практическое использование автоматизированной системы оценки напряженно-деформированного состояния горных пород на объектах ПАО «Газпром» доказывает свою эффективность, надежность и достоверность уже более 15 лет.

Ключевые слова: электромагнитная эмиссия, неразрушающий контроль, технология, мониторинг, геодинамика, естественное импульсное электромагнитное поле Земли

V. F. Gordeev^{1}, S. G. Shtalin², S. Yu. Malyshkov¹, V. I. Polivach¹*

Implementation of dynamoelectric conversion methods by university and academic science

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russian Federation

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation
* e-mail: gordeev@imces.ru

Abstract. Implementation of research results always has wide significance when research is carried out by the joint university and academic team. Such collaboration allows to use comprehensive approach solving problems. We studied the following objects in this work: construction materials of radio industry and solid boosters, aerial vehicles' elements, including quality of thermal-insulation

tiles adhesion for reusable space vehicle “Buran”, materials and object of construction industry, landslides, mapping of live geological fractures, lithological faults, development of scientific basis for geophysical methods, including hydrocarbon deposits exploration. Nondestructive monitoring of dielectric materials based on electromagnetic emission parameters (EME) is described. Systematic study of Earth’s natural pulsed electromagnetic field (ENPEMF) combined with a fundamental approach to researching mechanics of that phenomenon allowed to implement novel geophysical methods in the area of Earth sciences. We provide technical equipment based on dynamoelectric conversions in solid bodies, implemented as a nondestructive quality monitoring into industry. The work represents results of anticipatory forecasting of geodynamic processes based on ENPEMF parameters on landslide slope of main gas pipeline “Urengoy-Pomary-Uzhgorod”. Practical application of the automated system for stress-deformed state of the rocks estimation on PAO “Gazprom” objects proves its effectiveness, reliability and accuracy for over 15 years.

Keywords: electromagnetic emission, nondestructive monitoring, technology, monitoring, geodynamics, Earth’s natural pulsed electromagnetic field

Введение

Начало исследования механоэлектрических преобразований в диэлектрических твердых телах положила гипотеза о «грозе в Земле» профессора Томского политехнического института (сейчас ТПУ) А.А. Воробьева, высказанная в конце 60-х годов прошлого столетия [1, 2]. Идея заключалась в том, что в эпицентре землетрясения, за счет механоэлектрических преобразований, возникают электрические поля, которые могут прямым лучом или по волноводу выходить на поверхность Земли и служить предвестниками готовящихся геодинамических проявлений. Первые теоретические и полевые работы не подтвердили гипотезу, однако гипотеза положила начало систематическим исследованиям в проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники диэлектриков и полупроводников (ПНИЛ ЭДИП), которые обнаружили электромагнитную эмиссию (ЭМЭ) при различных видах механического, теплового и радиационного воздействия на хрупкие диэлектрические материалы, включая и горные [3,4].

Лабораторные и натурные исследования показали, что не проводящие горные породы обладают механоэлектрическими преобразованиями за счет движения заряженных частиц на границах дефектов и изменения их дипольных моментов, как на стадии деформации, так и при микро- и макроразрушениях, особенно в момент нарушения целостности материала за счет разрядных механизмов [5,6]. Были предложены механизмы возникновения электромагнитной эмиссии при механическом воздействии на неметаллические материалы и созданы научные основы неразрушающего метода контроля механической прочности по параметрам ЭМЭ [7–12].

Первое внедрение состоялось в Институте технического стекла (г. Москва) для контроля изделий остекления летательных аппаратов [13]. Внедрен контроль качества ячеистых и сотовых конструкций для радиопрозрачных укрытий и слоистых материалов твердотопливных ускорителей.

Совместно с профессором В.Л. Чахловым (Институт интроскопии при ТПУ) были созданы аппараты для оценки качества приклейки теплозащитных плиток КЛАМИ «Буран» [3]. При финансовой поддержке Дирекции дорожного фонда

Томской обл. и проф. ТГАСУ В.М. Картопольцева разработан ряд приборов «Прочность», для определения марки бетона изделий строительной отрасли, включая фундаменты, опоры, пролетные строения мостов и путепроводов [14].

Именно в Томской научной школе были получены первые результаты, показывающие связь процессов в земной коре с ЕИЭМПЗ [15–17].

В полевых условиях были определены суточные и сезонные изменения параметров ЕИЭМПЗ [18]. Из анализа этих закономерностей не был ясен механизм воздействия на оболочку Земли, который можно было бы связать с механоэлектрическими преобразованиями в литосфере. Ни вариации приливных сил, оказывающих наиболее сильные деформационные воздействия на кору Земли, ни другие известные внешние поля не совпадают с суточными и сезонными изменениями параметров ЕИЭМПЗ. Необходимы были фундаментальные исследования с целью определения модели модуляции ЕИЭМПЗ, а также необходимо было создать аппаратуру и технологии мониторинга геодинамических процессов по параметрам электромагнитных полей в литосфере.

В 2000 году в Институте мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН) в лаборатории геоинформационных технологий под руководством д.ф.-м.н. В.А. Крутикова начались систематические исследования ЕИЭМПЗ с целью фундаментальных разработок механизмов и дальнейшего внедрения новых технологий в народное хозяйство. Продолжаются начатые в ТПУ работы по созданию технологий опережающего прогноза опасных геодинамических проявлений, разработки новых методов геофизической разведки и технологий раннего оповещения оползневых процессов по параметрам ЕИЭМПЗ [19]. Создан ряд многоканальных геофизических регистраторов (МГР) для решения различных инженерных задач. Регистратор МГР-01 сертифицирован, как средство измерений RU.C.34.007.A №24184.

Источники и механизмы формирования ЕИЭМПЗ

В 2009 году [20] была предложена оригинальная идея о воздействии внутреннего ядра Земли на литосферу изнутри (деформационными волнами [21]), объясняющая основные закономерности типичных суточных и сезонных вариаций ЕИЭМПЗ за счет трассы прохождения внутреннего ядра Земли в течение суток и сезона.

Позже были поставлены натурные эксперименты по оценке доли литосферной составляющей в структуре ЕИЭМПЗ, когда в качестве поглощающего экрана от атмосферных источников использовались природные водоемы с различным уровнем минерализации воды. Экспериментальные данные подтвердили наличие существенной доли литосферной составляющей электромагнитного поля ОНЧ диапазона в структуре ЕИЭМПЗ.

Результаты исследования и полученный фактический материал

В 2010 году была спроектирована и реализована автоматизированная система контроля геодинамических процессов (АСК-ГП) на правобережном

оползневом склоне участка подводного перехода трасс магистрального газопровода (МГ) через р. Кама. Система работает в режиме мониторинга экзогенных процессов и обеспечивает распределенный доступ пользователей к результатам анализа данных мониторинга. Размер склона составлял 700x700 метров, по которому проходит трасса МГ «Уренгой-Помары-Ужгород» из 9-ти трубопроводов. Начиная от береговой линии, условно показаны направления трасс МГ, расстояние между трубами составляет примерно 50 метров.

По результатам геоморфологических исследований в 2006 году было установлено, что на склоне имеются два оползня (Северный и Южный). Граница между оползнями проходит с Востока на Запад от береговой линии. Выявленные нами зоны повышенной активности оползневых процессов по параметрам ЕИЭМПЗ в пространственно-временных вариациях достаточно хорошо совпали с данными геоморфологических исследований.

При проектировании и строительстве магистрального газопровода был сглажен участок Северного оползня, но не до основания. Становится понятным, почему на указанном участке чаще всего проявляются аномалии в пространственно-временных вариациях ЕИЭМПЗ, начиная с момента постоянного мониторинга системы АСК-ГП. По видимому, искусственно нарушив природный слой Северного оползня, изменили напряженно-деформированное состояние горных пород, что привело к вероятностному увеличению геодинамики района, который может быть связан с периодическими проявлениями аномалий грунта сезонного и гидрогеологического характера.

В 2006 году были выполнены комплексные исследования НДС горных пород на оползневом склоне, с целью определения мест для размещения аппаратуры системы АСК-ГП при постоянном мониторинге различных физических полей (радиоволновые, эманация радона, уровень и минерализация грунтовых вод, линейная деформация и др.). На оползневом склоне были определены места расположения герметичных, радиопрозрачных бункеров с регистраторами «МГР-01» автоматизированной системы (АСК-ГП). Для уменьшения помех от анодной защиты, регистраторы «МГР» были расположены между трубами.

Система состояла из 12 постов наблюдения (бункеров с регистраторами типа «МГР»), местоположения 10 из которых определены по результатам картирования аномальных зон комплексных исследований (геоморфологических и методом ЕИЭМПЗ), как места с возможным проявлением оползневых процессов в районе Северного оползня. Так как в 2006 году результаты пространственных вариаций интенсивности ЕИЭМПЗ не выявили аномальных зон оползнеопасных проявлений на Южном участке склона, решено было установить лишь один контрольный бункер между 1-й и 2-й нитками магистрального газопровода. Двенадцатый пост (Т04) был установлен на прямолинейном участке, который не подвержен геодинамическим процессам. Этот пост являлся реперным (вариационным), относительно которого определялись участки на склоне с возможностью оползнеопасных проявлений.

Результаты мониторинга отражались через интернет на специальном сервере, в реальном режиме времени. Далее производилось сравнение и анализ одноименных параметров ЕИЭМПЗ различных областей оползневого участка, с целью оценки активизации опасных геодинамических процессов для возможности принятия упреждающих инженерных решений, предотвращающих аварийную ситуацию.

На каждом трубопроводе в верхней и нижней части склона расположены интеллектуальные вставки (УВ). Вставки представляют, из себя набор тензодатчиков, которые регистрируют изгибные моменты трубы, а операторы дистанционно отслеживают значения деформаций.

В качестве алгоритма контроля геодинамических процессов при постоянном мониторинге параметров ЕИЭМПЗ в реальном времени системой АСК-ГП используется два критерия [22]. Первый критерий показывает отличие интенсивности показаний регистраторов, расположенных в точках контроля напряженно-деформированного состояния горных пород от показаний реперного (Т04). Второй – оценивает корреляцию формы суточных вариаций интенсивности ЕИЭМПЗ реперной и *i*-ой измерительной станции по формуле Спирмана.

Рассмотрим работу системы АСК-ГП с 26 августа по 03 сентября 2021 года, эффект который был замечен единственный раз в текущем году (окно оператора Рис.1). Слева представлены первичные данные суточных ходов интенсивности импульсного потока ЕИЭМЗ по направлению приема Н1 – Север-Юг и Н2 – Запад-Восток.

Справа на рис. 1 представлены результаты прогноза оползнеопасного проявления на склоне по относительной разнице параметров ЕИЭМПЗ измерительной станции к реперной (вариационной Т04). На рисунке видно, что 26 августа интенсивность импульсного потока на регистраторе Т03 по направлению приема сигнала Север - Юг стала выше «зеленой» зоны и постепенно увеличивалось до «красной» к 29 августа, что говорит о растущем напряжении растяжения. При этом показания на регистраторе Т11 вначале стали отрицательными, а потом с 28 августа стали расти до «желтой» зоны 29 августа. Также, 29 августа показания Т02 и Т07 перешли в «желтую» зону, а показания Т02 достигли «красной» 31 августа.

31 августа показания прогноза на станции Т11 сменили знак с минуса на плюс и это свидетельствует о том, что изменились напряжения растяжения на сжатия. Таким образом можно с большой долей вероятности утверждать, что в этот момент в районе станции Т11 происходили какие-то значительные проявления в геодинамике. 01 сентября НДС горных пород всех станций стали возвращаться в исходное состояние и 02 сентября все напряжения вернулись в «зеленую» зону.

Представим вышеизложенный материал (Рис. 2) по методике расчета, описанной в работе [19], позволяющей получать положительные и отрицательные аномалии в структуре ЕИЭМПЗ в одинаковом диапазоне с одинаковым коэффициентом пропорциональности.

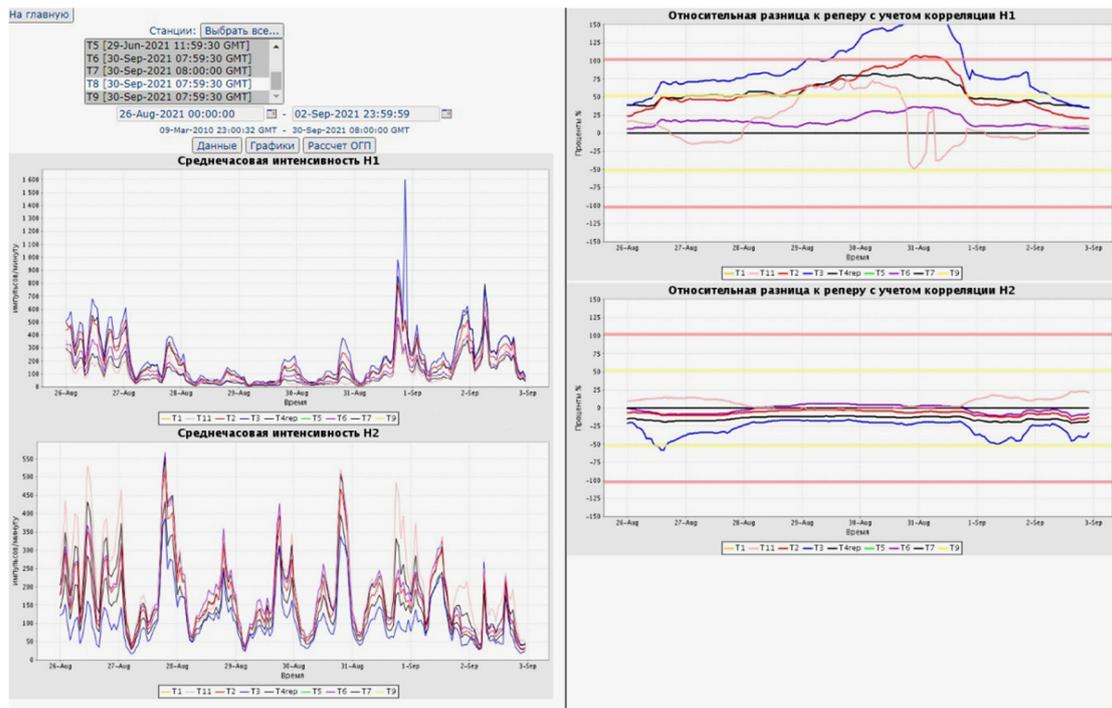


Рис. 1. Копия окна оператора системы АСК-ГП на склоне

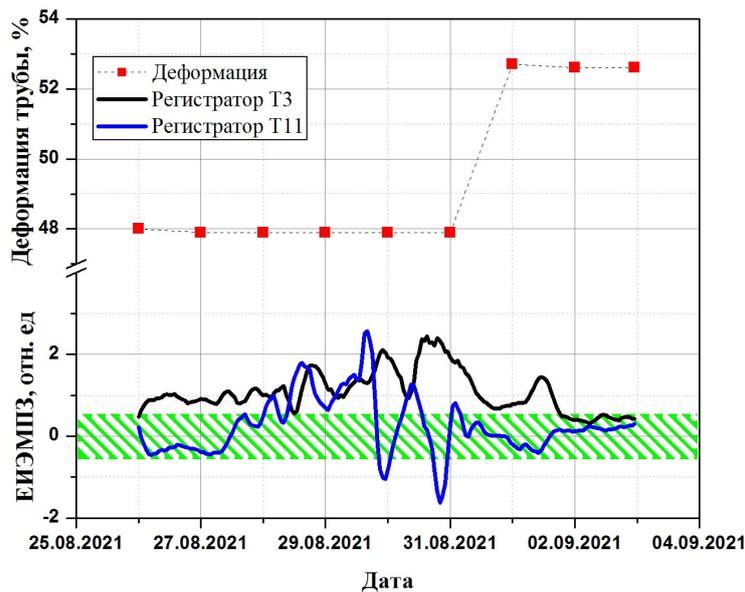


Рис. 2. Результаты относительной интенсивности ЕИЭМПЗ в районах станций Т03 и Т11 к реперной Т04, а также показания деформации трубы

«Зеленая» зона соответствует отклонению интенсивности ЕИЭМПЗ от показаний вариационной станции не более 50%, что соответствует отсутствию напряженно-деформированного состояния грунта в исследуемой области.

Начиная с 26 августа в районе станции Т03, а с 28 августа и в районе станции Т11 начались изменения в НДС грунтов, достигая максимальных значений напряжений растяжения 29 августа в районе станции Т11. Затем напряжения

растяжения в этой области стали не стабильными и сменили знак на отрицательный, что соответствует напряжениям сжатия. Скачок деформации трубы произошел 01 сентября 2021 года. Из графиков отчетливо видно, что метод ЕИЭМПЗ может быть использован для опережающего прогноза оползневых процессов не менее чем за 2-4 суток.

По статистике на описанном участке магистрального газопровода в течение 16 лет (с 1990 по 2005 годы) произошло 7 аварий с отказом, из которых 4 с разрывом трубы.

Следовательно, в период времени с 2006 по 2021 годы на газопроводе могло бы произойти по статистике не менее 7 аварий. Однако с внедрением опережающего прогноза оползнеопасных проявлений на склоне, по параметрам ЕИЭМПЗ, начиная с 2006 года, как нам стало известно, предпринимались инженерные мероприятия по предупреждению аварий и отказов.

Заключение и выводы

1. Гипотеза профессора ТПИ (ТПУ) А.А. Воробьева положила начало систематическим исследованиям явления механоэлектрических преобразований в диэлектрических твердых телах, которые проводились вузовским и академическим коллективами, что позволило комплексно подойти к решению внедрения научных разработок в народное хозяйство. Научные основы неразрушающего метода контроля качества диэлектрических материалов по параметрам ЭМЭ позволили разработать аппаратуру, которая использовалась в качестве средств неразрушающего контроля при производстве конструкционных материалов, твердотопливных ускорителей, элементов летательных аппаратов, включая качество приклейки теплозащитных плиток КЛАМИ «Буран», материалов и объектов строительной отрасли.

2. Отличительной чертой технологии мониторинга ЕИЭМПЗ является сравнение относительной разницы результатов измерения контрольного регистратора к реперному (вариационному).

3. Представленные фактические результаты технологии опережающего прогноза геодинамических процессов на оползневом склоне, по которому проходит магистральный газопровод ПАО «Газпром» доказывают свою эффективность, надежность и достоверность уже более 15 лет.

Благодарности

Авторы статьи искренне благодарны С. А. Капустину и М. М. Кабанову за разработку Интернет портала АСК-ГП.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН, проект №121031300155-8.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьев А. А. О возможности электрических разрядов в недрах Земли // Геология и геофизика. – 1970. – № 12. – С. 3–13.
2. Воробьев А. А. Тектоноэлектрические явления и возникновение естественного импульсного электромагнитного поля Земли. – Томск : ЕИЭМПЗ, 1979. – 585 с. – Рукопись представлена Томским политехническим институтом. Деп. в ВИНТИ.

3. Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Дементьев Ю.С., Коннов В.В., Майер Г.Р., Семченков А.М. Прогнозирование прочности на отрыв многослойной теплозащитной конструкции методом регистрации электромагнитного сигнала. В кн. : НПО "Молния", Сборник трудов, Москва, 1987. – Вып. 8. – С. 198-202. (ДСП).
4. Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Чахлов В.Л., Фурса Т.В., Биллер В.К., Елисеев В.П. Электромагнитная эмиссия диэлектрических материалов при статическом и динамическом нагружении // Журнал технической физики. – 1994. – Том 64, в.4. – С. 57- 67.
5. Беляев Л.М., Мартышев Ю.Н., Набатов В.В. О времени высвечивания в процессах трибо- и кристаллолюминесценции. - Кристаллография, 1962, Т. 7, вып. 4, с. 576-580.
6. Мартышев Ю.Н. Исследование свечения и электризации кристаллов LiF при их деформации // Кристаллография. – 1965. – Т. 10, вып. 2. – С. 224-226.
7. Журков С.П., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // Докл. АН СССР. – 1981. – Т. 259, № 6. – С. 1350– 1353.
8. Гор А.Ю., Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Фролов Л.И. Концентрационный порог разрушения и прогноз горных ударов. // ФТПРПИ. – 1989. – № 3. – С. 54—60.
9. Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Данн Д.Д. Разработка метода контроля динамики изменения дефектности бетона под действием циклического замораживания-оттаивания на основе явления механоэлектрических преобразований. // Письма в Журнал технической физики. – 2011. – Т. 37. – № 7. – С. 1-7.
10. Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Батулин Е.А. Источники акустоэлектрических преобразований в бетонах. // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69. – № 10. – С. 51-55.
11. Суржиков А.П., Фурса Т.В., Хорсов Н.Н. К вопросу о механизме механоэлектрических преобразований в бетонах. // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71. – № 1. – С. 57-61.
12. Фурса Т.В., Суржиков А.П., Осипов К.Ю. Диагностика качества адгезионного контакта в армированных композиционных материалах с использованием явления механоэлектрических преобразований. // Дефектоскопия. – 2008. – № 3. – С. 86-93.
13. Дмитриев В.П., Смирнов В.А., Воробьев А.А., Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф. Контроль разрушающих нагрузок силикатных стекол методом регистрации электромагнитного сигнала // Стекло и керамика. – 1982. – № 10. – С. 10 -11
14. Чахлов В.Л., Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф., Фурса Т.В., Чахлов Б.В., Картапольцев В.М. Электромагнитная эмиссия бетонов при ударном нагружении // Изв. вузов. Строительство. – 1995. – № 5, 6. – С. 54-58.
15. Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. – Новосибирск : Параллель, 2008. – 315 с.
16. Мастов Ш. Р., Саломатин В. Н., Яворович Л. В. Выявление степени деформации участков оползня методом регистрации импульсов электромагнитного поля // Инженерная геология. – 1983. – № 2. – С. 98–101.
17. Мастов Ш.Р., Гольд Р.М., Саломатин В.Н., Яворович Л.В. Изучение прогрессирующего разрушения при развитии оползневого процесса методом регистрации электромагнитных сигналов // Инженерная геология. – 1984, № 1. – С. 68-71.
18. Малышков Ю.П., Джумабаев К.Б., Омуркулов Т.А., Гордеев В.Ф. Влияние литосферных процессов на формирование импульсного электромагнитного поля Земли, прогноз землетрясений // Вулканология и сейсмология. – 1998 – №1 – С. 92-105.
19. Гордеев В. Ф., Малышков С. Ю., Крутиков В. А., Поливач В. И., Кабанов М. М., Капустин С. Н., Шталин С. Г., Пустовалов К. Н. Развитие пассивной радиоволновой информационно-измерительной технологии мониторинга динамических процессов взаимодействия литосферы, криосферы и атмосферы. // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35. – № 02. – С. 105–109. DOI: 10.15372/AOO20220204.

20. Малышков Ю.П., Малышков С.Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра земли. // Геология и геофизика. – 2009. – № 2. – С. 152-172.

21. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР. – 1991. – 219 с.

22. V.F. Gordeev, M.M. Kabanov, S.N. Kapustin Algorithm and Software for Landslide Slopes Stability Estimation with Online Very Low Frequency Monitoring/ 2017// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 189 (1).

© В. Ф. Гордеев, С. Г. Шталин, С. Ю. Малышков, В. И. Поливач, 2023