

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Василий Федорович Гордеев

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 10/3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (913)820-00-67, e-mail: gordeev@imces.ru

Сергей Юрьевич Малышков

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 10/3, старший научный сотрудник, тел. (913)820-00-27, e-mail: msergey@imces.ru

Виталий Игорьевич Поливач

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 10/3, младший научный сотрудник, тел. (913)820-00-37, e-mail: Polivach@imces.ru

Задачи оценки устойчивости горных пород на подрабатываемых территориях требуют не только предварительных изысканий, но и непрерывного оперативного мониторинга с возможностью информирования о потенциальных угрозах провалов. Использование данных ОНЧ мониторинга в составе аппаратно-программного комплекса автоматизированной системы контроля геодинамических процессов позволяет решать эти задачи. Авторы описывают использование оригинального метода, основанного на регистрации естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) и делают выводы об эффективности примененных решений для мониторинга опасных геодинамических процессов на подрабатываемых территориях. Суть метода заключается в выделении пространственных вариаций интенсивности сигнала ЕИЭМПЗ на фоне суточных изменений и сигналов техногенного происхождения. Экспериментально показано взаимосвязь относительной интенсивности сигнала от напряженно – деформированного состояния горного массива.

Ключевые слова: мониторинг, естественное импульсное электромагнитное поле Земли, ЕИЭМПЗ, подрабатываемые территории, геодинамика, провал.

GEOPHYSICAL MONITORING OF TECHNOGENIC HAZARDS ON ANTHROPOGENIC SOILS

Vasily F. Gordeev

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskii Prospect St., Tomsk, 634055, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (913)820-00-67, e-mail: gordeev@imces.ru

Sergey Yu. Malyshkov

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskii Prospect St., Tomsk, 634055, Russia, Senior Researcher, phone: (913)820-00-27, e-mail: msergey@imces.ru

Vitaly I. Polivach

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskiiy Prospect St., Tomsk, 634055, Russia, Junior Researcher, phone: (913)820-00-37, e-mail: Polivach@imces.ru

Rock stability estimation tasks on anthropogenic soils require both preliminary survey and ongoing real-time monitoring providing alerts on possible cave-in threats. Using VLF monitoring data incorporated into software-hardware geodynamical processes automated surveillance system allows to accomplish that task. Authors describe a unique method, based on Earth's natural pulsed electromagnetic field (ENPEMF) recording and make conclusions on the efficiency of the solutions applied for hazardous geodynamic processes monitoring on anthropogenic soils. The principle of the method is to distinguish spatial variations of ENPEMF signal against diurnal oscillations and technogenic signals. Correlation between relative signal intensity and stress-strained state of the rocks is experimentally demonstrated.

Key words: monitoring, Earth's natural pulsed electromagnetic field, ENPEMF, anthropogenic soils, geodynamics, cave-in.

Введение

В 1925 г. было открыто Верхнекамское месторождение калийных солей, которое является одним из крупнейших в мире. Его соляные запасы составляют более 3 млрд тонн, а соляная залежь распространяется с севера на юг на 200 км шириной до 50 км и занимает площадь 6,5 тыс. кв. км. Составляющими частями месторождения являются подстилающая каменная соль, калийная и калийно-магниева соли и покровная каменная соль. Минеральный состав промышленных пластов – сильвин, галит, карналлит с некоторым количеством карбонатов, сульфатов кальция и глинистых минералов.

На базе Верхнекамского месторождения в 1934 г. начал работать первенец отечественной калийной промышленности – Соликамский (первый калий был получен еще в 1930 г.), а с 1954 г. – Березниковский калийные комбинаты. ОАО «Сильвинит» является правопреемником Соликамского калийного комбината, являющегося родоначальником калийной отрасли России. Производственное объединение «Уралкалий» создано в 1964 г., в 1992 г. после приватизации было переименовано в ОАО «Уралкалий».

Активная добыча полезных ископаемых в конце XX и начале XXI вв. привело к тому, что на подрабатываемой территории стали проявляться провалы в земной коре не только на промышленных объектах, но и в жилых массивах. Последний такой провал образовался в районе города Соликамска 18 ноября 2014 г. на территории садовых участков и эпицентр его располагался в 1,3 км от оси магистрального газопровода (рис. 1). К 2016 г. размеры провала увеличились в 25 раз, и было принято решение провести инженерные мероприятия по укреплению горного массива с целью предотвращения дальнейшего его развития.

Задача оценки устойчивости горного массива имеет широкое применение в инженерных и геодезических областях. Преимущественно методы таких оце-

нок связаны с решением задачи количественного оценивания напряженно-деформированного состояния горных пород, предваряя проектные или строительные работы в соответствующей местности [1–2]. Однако, в последние годы активно развивается новое направление исследований в данной области, связанное с оперативной оценкой, контролем и прогнозированием инженерной устойчивости грунтов. В данном подходе важным источником информации о возможных опасных геодинамических процессах, включая и провалы на обрабатываемых территориях, могут быть исследования параметров естественно-го импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) [3–8].

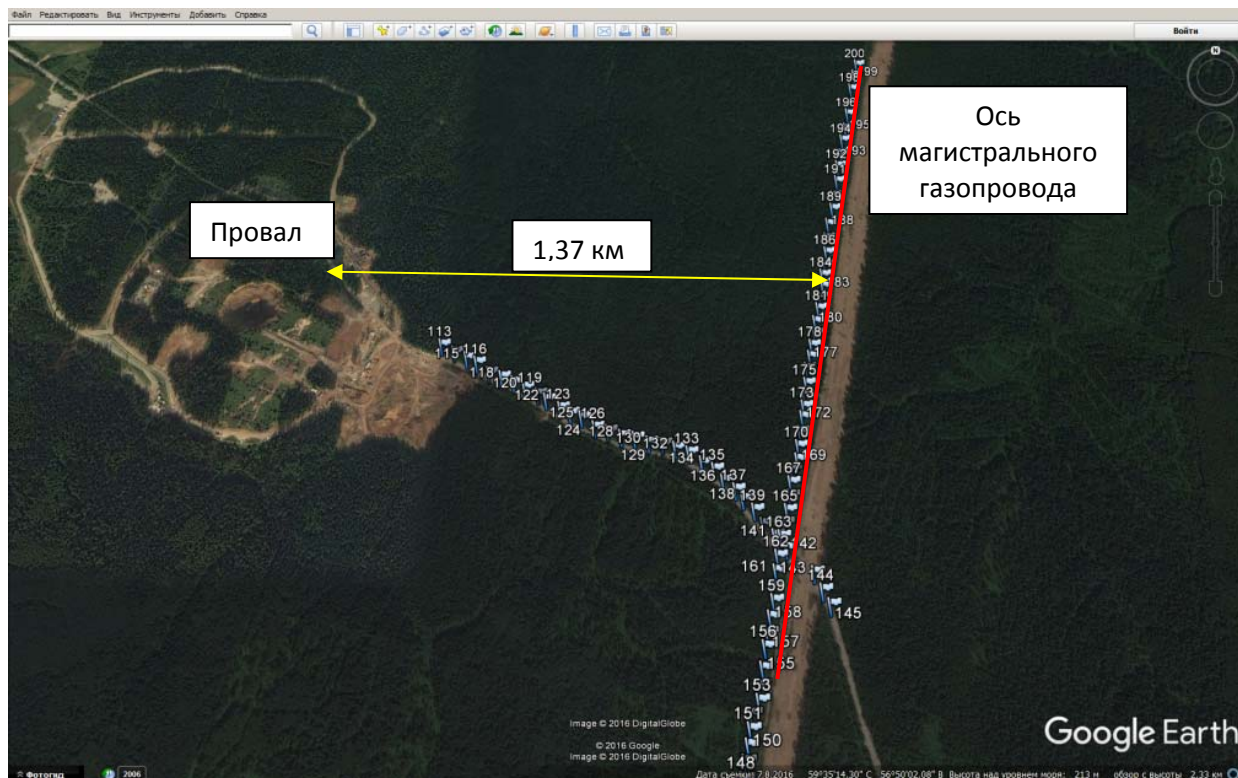


Рис. 1. Схема работ в районе Соликамского провала

Методика измерений

Для измерения параметров ЕИЭМПЗ, в Институте мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН), разработаны специализированные многоканальные геофизические регистраторы «МГР-01» [9]. В «МГР-01» предусмотрена регистрация импульсных сигналов по электрической и магнитной составляющим поля, причем по магнитной компоненте измерения ведутся на узкой полосе частот в ОНЧ-диапазоне по двум взаимно перпендикулярным направлениям приема сигналов. Регистраторы «МГР-01» сертифицированы (сертификат № 24184), зарегистрированы в государственном реестре средств измерений и допущены к применению в Российской Федерации.

В предлагаемом нами способе из регистрируемого потока импульсов удаляются импульсы атмосферного происхождения и импульсы, источники которых находятся за пределами интересующей территории [10–13]. Регистрируемый поток импульсов определяется пространственно-временными вариациями. В случае выполнения геофизических работ из зарегистрированного сигнала должны быть удалены временные вариации полей и все импульсы от удаленных источников. Это достигается с помощью системы из нескольких синхронно работающих регистраторов «МГР-01».

Во время профильных измерений один из регистраторов используется как реперный (вариационный) для регистрации временных вариаций ЕИЭМПЗ. Он устанавливается на удалении не более 20 километров от исследуемой территории на основании изучения фондовых материалов геологического строения земной коры. Относительно этой точки в дальнейшем оценивается геодинамическая активность горных пород и их напряженно-деформированное состояние [14–15]. Привязка результатов измерений по времени осуществляется с использованием внутренних часов регистраторов МГР. Синхронизация регистраторов производится перед началом профильных измерений. Разница во времени в показаниях различных регистраторов не превышает нескольких долей секунды. Это позволяет удалять из показаний импульсы, пришедшие одновременно на все регистраторы, а, следовательно, имеющие внешнее происхождение. В качестве информативного параметра используется частное между показаниями маршрутных и реперных регистраторов. Время дискретизации 1 секунда. На каждой точке (пикете) производится не менее 300 измерений интенсивности сигнала. Статистическая обработка результатов измерений предусматривает исключение суточного хода и импульсов внешнего происхождения [16–17].

Результатом напряженно-деформированного состояния горного массива в радиусе до 50 метров является отношение сигнала в точке измерения ($Nh1, Nh2$) к сигналу вариационной станции ($Nh1var, Nh2var$). Физически это величина относительного превышения или понижения сигнала в точке измерения к фоновому сигналу по двум взаимно перпендикулярным направлениям приема (Север – Юг, Запад – Восток) соответственно.

$$h1 = \frac{Nh1}{Nh1\ var} - 1; \quad h2 = \frac{Nh2}{Nh2\ var} - 1.$$

Если результат $h1, h2 > 0$ это свидетельствует о том, что в зоне измерения существуют напряжения растяжения, а если результат $h1, h2 < 0$, то зона сжатия [18–21]. Условно считается, что относительное превышение или понижение сигнала в точке измерения к фоновому сигналу от $-0,5$ до $+0,5$ соответствует слабому проявлению геодинамических процессов в горном массиве и не может привести к нарушению устойчивости поверхности Земли (зеленая зона). Зона (желтая) от $\pm 0,5$ до $\pm 1,0$ считается умеренно активной с точки зрения геодинамики и свидетельствует о начале изменения напряженно-деформированного состояния горного массива, которые могут служить критерием активизации опас-

ных геодинамических процессов. Если значения $h1$ или $h2 > 1,0$, то это свидетельствует, о критическом состоянии в данном месте, которое может привести к разрушению горных пород и проявиться в виде провала или оползня.

Эксперимент

Маршрутные измерения проводились от провала до оси газопровода с шагом между пикетами 25 метров (см. рис. 1) при этом реперный (вариационный) регистратор находился в 4 км южнее точки пересечения.

Измерения проводились в три этапа: в июне, сентябре 2016 г. и в июле 2017 г. В этот период проводились инженерные работы по стабилизации напряженно-деформированного состояния горного массива методом нагнетания специальных растворов в скважины пробуренных вокруг провала.

На рис. 2 представлены результаты маршрутных измерений относительной интенсивности сигнала ЕИЭМПЗ по направлению приема Запад – Восток ($h2$) от провала до пересечения с осью магистрального газопровода.

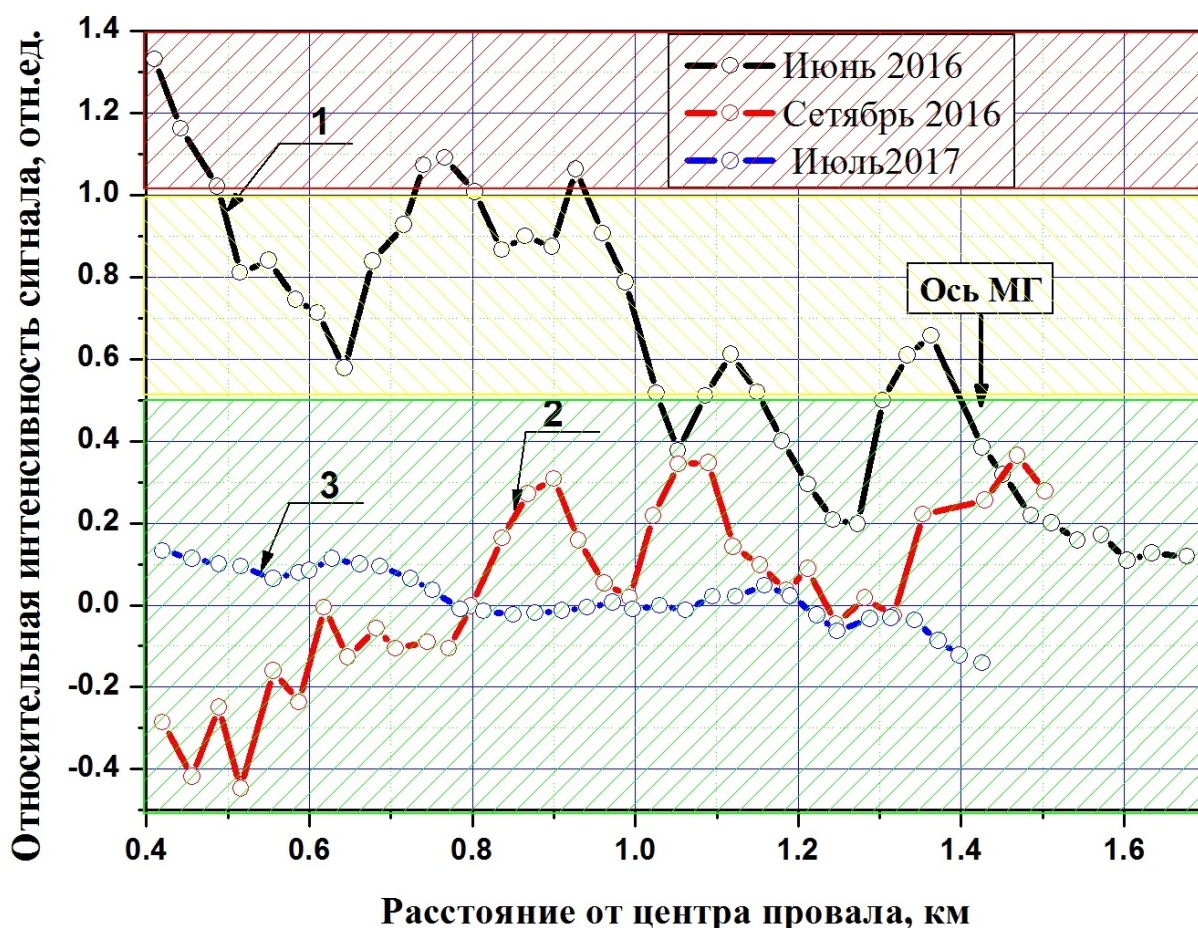


Рис. 2 Зависимость относительной интенсивности сигнала ЕИЭМПЗ от расстояния до провала:

1 – в июне; 2 – в сентябре месяце 2016 г.; 3 – в июле 2017 г.

До начала проведения инженерных работ, относительная интенсивность сигнала ЕИЭМПЗ (рис. 2, кривая 1) на расстоянии до 500 метров от провала, превышала более чем в два раза ($h_2 > 1$ – красная зона) фоновые значения (реперного регистратора), что соответствовала критическому состоянию геодинамических процессов в данной области. Положительное превышение сигнала свидетельствует о напряжениях растяжения в горном массиве, и это состояние прослеживается на протяжении всего маршрута до 1,4 км (пересечение с осью газопровода).

В течение четырех месяцев июнь – сентябрь 2016 г. проводились интенсивные инженерные работы по нагнетанию специальных растворов в скважины вокруг провала, для стабилизации напряженно-деформированного состояния горного массива, были проведены повторные измерения параметров ЕИЭМПЗ по маршруту от провала до пересечения с осью магистрального газопровода (рис. 2, кривая 2). Из графика видно, что относительная интенсивность сигнала уменьшилась более чем в три раза, при этом изменила знак с положительного на отрицательный на расстоянии до 800 метров от провала. Этот факт может свидетельствовать об изменении напряжений растяжения на напряжения сжатия в горном массиве, причем их величина соответствует слабому проявлению геодинамических процессов ($h_2 < -0,5$ – зеленая зона). На протяжении всего маршрута значения h_2 не выходят за границы зеленой зоны, с трендом до $\pm 0,4$, что свидетельствует о положительном эффекте инженерных работ по релаксации аномальных значений напряженно-деформированного состояния горного массива в данной области.

Контрольный замер интенсивности импульсного потока ЕИЭМПЗ по предыдущему маршруту был проведен в июле 2017 г. (рис. 2, кривая 3). Из графика видно, что сигнал на всем протяжении маршрута, меняется в пределах $\pm 0,2$ отн. единиц, это соответствует слабому проявлению геодинамических процессов в горном массиве, которые не могут привести к нарушению ландшафта.

Таким образом, можно достоверно утверждать, что метод мониторинга параметров ЕИЭМПЗ позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние горного массива и следить за его динамикой.

Заключение

Геофизический метод, основанный на регистрации относительной интенсивности сигнала естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ), может быть использован для мониторинга опасных тектонических проявлений на подрабатываемых территориях.

По результатам профильных измерений выявлено однозначная взаимосвязь параметров ЕИЭМПЗ в зависимости от инженерных работ по нагнетанию специальных растворов в скважины вокруг провала (в районе г. Соликамска, 2016–2017 гг., Северный Урал), для стабилизации напряженно-деформированного состояния горного массива.

Используя опыт работ на оползневых склонах [22], целесообразно применять на подрабатываемых территориях аппаратно-программный комплекс автоматизированной системы постоянного контроля геодинамических процессов по параметрам естественного импульсного электромагнитного поля Земли, с целью упреждающих инженерных мероприятий для предотвращения техногенных аварий.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность Шталину С. Г. за разработку и создание оригинального аппаратно – программного многоканального геофизического регистратора «МГР-01», Капустину С. А. и Кабанову М. М. за обсуждение результатов исследований и разработку Интернет портала автоматизированной системы контроля горных пород (АСК-ГП).

Исследование было выполнено в рамках госбюджетной темы № АААА-А17-117013050036-3 и при поддержке гранта РФФИ № 18-47-700005p_a.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аксютин О. Е. Повышение надежности функционирования газотранспортных систем ОАО «Газпром». Сб. тезисов III Межд. конф. 27-28.10.2009. ВНИИГАЗ, с. 4.
2. Нормативно-методическое пособие Минтопэнерго РФ «Основы повышено-экологической безопасности объектов ТЭК. ч. I, разд. 6, 7. МИНТОПЭНЕРГО. – М., 1997.
3. Воробьев А. А. О возможности электрических разрядов в недрах Земли // Геология и геофизика. – 1970. – № 12. – С. 3–13.
4. Воробьев А. А. Тектоноэлектрические явления и возникновение естественного импульсного электромагнитного поля Земли – ЕИЭМПЗ – Томск, 1979. – 585 с. – Рукопись представлена Томским политехническим институтом. Деп. в ВИНТИ: Ч. 1 – № 4296-79 – 202 с.; Ч. 2 – № 4297 – 79 – 149 с.; Ч. 3 – № 380-80 – 243 с.
5. Импульсное электромагнитное излучение минералов и горных пород, подверженных механическому нагружению / Р. М. Гольд, Г. П. Марков, П. Г. Могила, М. А. Самохвалов // Физика Земли. – 1975. – № 7. – С. 109–111.
6. Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений / М. Б. Гохберг, В. А. Моргунов, Е. А. Герасимович, Е.А. Матвеев. – М. : Наука, 1985. – 116 с.
7. Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмоэлектромагнитные явления. – М. : Наука, 1988. – 174 с.
8. 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.
9. Автоматизированная станция оперативного прогноза землетрясений (опыт четырехлетней эксплуатации) / С. Г. Шталин, С. Ю. Малышков, Ю. П. Малышков, В. Ф. Гордеев, О. К. Масальский // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород : материалы 1-й Междунар. школы-семинара (9–15 сент., 2001, г. Красноярск) / ред. В. А. Мансуров. – Красноярск : СибГАУ, 2002. – С. 324–330.
10. Малышков С. Ю., Гордеев В. Ф., Поливач В. И. Картирование аномалий напряженно-деформированного состояния грунтов и оценка опасности разрывных нарушений для промышленных объектов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 13–18.

11. V. F. Gordeev, S. Yu. Malyshkov, S. G. Shtalin, V. I. Polivach, V. A. Krutikov. Detection of geodynamic activity areas based on the Earth's electromagnetic noise parameters IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 48 (2016) V. 48. 012026. doi:10.1088/1755-1315/48/1/012026.
12. Малышков В. Ф., Гордеев С. Ю. Регистратор импульсных электромагнитных полей для геофизической разведки // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 68–72.
13. Гордеев В. Ф., Поливач В. И., Малышков С. Ю. Метод естественного импульсного электромагнитного поля Земли для мониторинга динамики грунтов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 152–157.
14. Малышков С. Ю., Гордеев В. Ф., Поливач В. И. Полевые исследования динамики техногенного оползня // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – No 2. – С. 82–90.
15. Разработка и реализация программного обеспечения для визуализации и анализа данных геофизических регистраторов / В. Ф. Гордеев, С. Ю. Малышков, И. А. Ботыгин, В. С. Шерстнёв, А. И. Шерстнёва// Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : тезисы докладов XXIII Междунар. симпозиума. – Иркутск, 2017. – С. D514–D518.
16. Vasily F. Gordeev, Sergey Yu. Malyshkov, Vladimir A. Krutikov, Vitaly I. Polivach and Sergey G. Shtalin. Lightning discharge bearing by monitoring of dangerous geological processes with a system based on Earth's natural pulsed electromagnetic field parameters // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 211 (2018) 012073, doi:10.1088/1755-1315/211/1/012073.
17. S. Yu. Malyshkov, V. F. Gordeev and N. A. Pustovalov. Detailing the tectonic structure of a nuclear industry construction site using an Earth's natural pulsed electromagnetic field method// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 211 012077, doi:10.1088/1755-1315/211/1/012077.
18. Yury P. Malyshkov, Sergey Yu. Malyshkov, Vasily F. Gordeev, Sergey G. Shtalin, Vitaly I. Polivach, Vladimir A. Krutikov, Michail M. Zaderigolova. Electromagnetic Fields: Principles, Engineering Applications and Biophysical Effects. Chapter 1, Earth's Natural Electromagnetic Noises in a Very-Low Frequency Band // Nova Science Publishers, Inc. 2013. P. 1–86.
19. Yury P. Malyshkov, Sergey Yu. Malyshkov, Vasily F. Gordeev, Sergey G. Shtalin, Vitaly I. Polivach, Vladimir A. Krutikov, and Michail M. Zaderigolova, Earth's Natural Electromagnetic Noises: Their Deep-Seated Origin, Effect on People, Recording and Application in Geophysics, Institute of Monitoring of Climate and Ecosystems, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Russia, and others// Journal of Magnetohydrodynamics, Plasma, and Space Research, Volume 20, Number 2, 2015, p. 107–192.
20. Анализ предвестников напряженного состояния региональных геосистем / Н. Н. Черedyкo, В. А. Тартаковский, Ю. В. Волков, В. А. Крутиков, В. Ф. Гордеев, С. Ю. Малышков // Системы контроля окружающей среды – 2018 : междунар. науч.-технич. конференция. 5–9 ноября 2018 г. Севастополь : [тезисы] – Севастополь, РИО ИПТС, 2018. – С. 96.
21. V. F. Gordeev, S. Y. Malyshkov, V. I. Polyvach. Electromagnetic Method for Exogenetic Geodynamic Elements Mapping in Permafrost Environment, 2017// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 189 (1), 012006.
22. Gordeev V. F., Kabanov M. M., Kapustin S. N. Algorithm and Software for Landslide Slopes Stability Estimation with Online Very Low Frequency Monitoring/ 2017 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 189(1), 012015.

© В. Ф. Гордеев, С. Ю. Малышков, В. И. Поливач, 2019