

УДК 550.3

DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-35-44

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

Современное развитие экономики требует увеличения добычи полезных ископаемых шахтным способом, что повышает риски возникновения катастрофических проявлений на подрабатываемых территориях. Задача оценки устойчивости горных пород на подрабатываемых территориях требует не только предварительных инженерно-строительных изысканий, но и непрерывного оперативного мониторинга техногенной геодинамики с возможностью информирования о потенциальных угрозах провалов. Для решения этой задачи необходимо использовать принципиально новые физические принципы оценки напряженно-деформированного состояния горного массива. В работе описывается использование оригинального геофизического метода, основанного на регистрации естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ). Суть метода заключается в выделении пространственных вариаций интенсивности сигнала ЕИЭМПЗ на фоне суточных изменений и сигналов техногенного происхождения. Экспериментально показана пространственная взаимосвязь относительной интенсивности сигнала от напряженно-деформированного состояния горного массива, что может быть использовано для геофизического мониторинга опасных техногенных проявлений на подрабатываемых территориях. Апробация метода проводилась в течение двух лет, на возникшем провале в районе г. Соликамска. Авторы делают выводы об эффективности примененных решений для мониторинга техногенной геодинамики на подрабатываемых территориях.

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

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. км². Составляющими частями месторождения являются подстилающая каменная соль, калийная и калийно-

магнезиевая 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 XIX в. привела 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, 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.

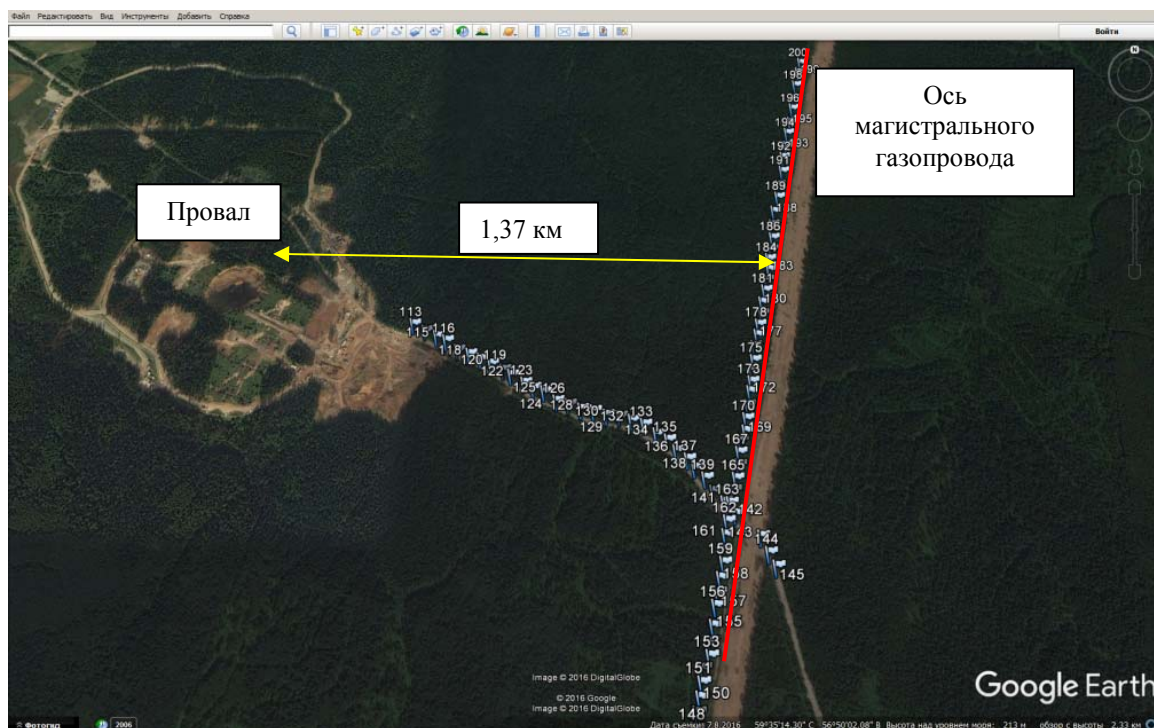


Рис. 1. Схема работ в районе Соликамского провала

Методика измерений

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 процессах техногенной геодинамики, включая и провалы на подрабатываемых территориях, могут быть исследования параметров естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) [3–8].

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) «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 км от исследуемой территории на основании изучения фондовых материалов геологического строения земной коры. Относительно этой точки в дальнейшем оценивается величина и динамика напряженно-деформированного состояния массива горных пород [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, 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. Стати-

стическая 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 ($Nh1\text{ var}$, $Nh2\text{ var}$). 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.

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

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). Желтая зона 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, которое может служить критерием активизации опасных 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 м (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, пробуренные 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.

До начала проведения инженерных работ относительная интенсивность сигнала ЕИЭМПЗ (рис. 2, кривая 1) на расстоянии до 500 м от провала превышала более чем в два раза ($h2 > 1$ – красная зона) фоновые значения реперного регистратора, что соответствовало 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).

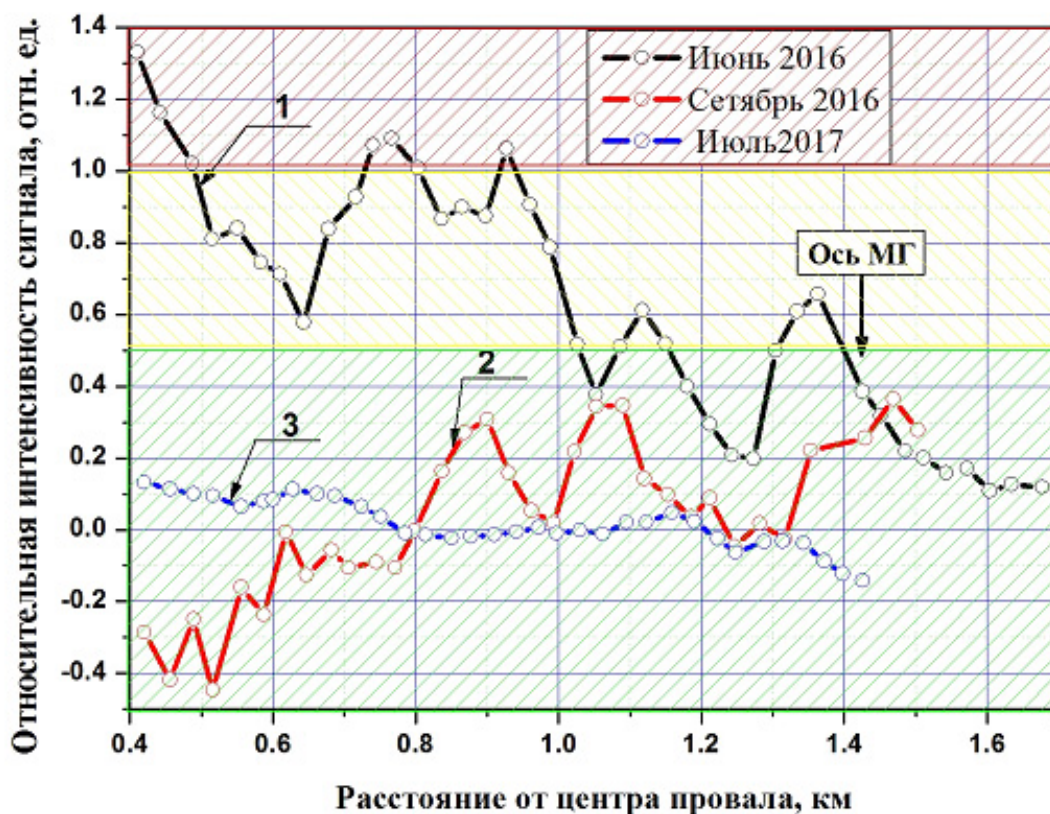


Рис. 2. Зависимость относительной интенсивности сигнала ЕИЭМПЗ от расстояния до провала (1 – в июне, 2 – в сентябре 2016 г., 3 – в июле 2017 г.)

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 (см. 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 м от провала. Этот факт может свидетельствовать об изменении напряжений растяжения на напряжения сжатия в горном массиве, причем их величина соответствует слабому проявлению геодинамических процессов ($h2 < -0,5$ – зеленая зона). На протяжении всего маршрута значения $h2$ 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. (см. 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 геомеханических 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 величины и динамики напряженно-деформированного состояния горных пород, прогнозирования инженерной устойчивости грунтов на подрабатываемых территориях, с целью предотвращения катастрофических последствий процессов техногенной геодинамики.

По результатам профильных измерений выявлена 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 динамики напряженно-деформированного состояния горного массива.

Авторы статьи выражают благодарность С. Г. Шталину за разработку и создание оригинального аппаратно-программного многоканального геофизического регистратора «МГР-01», С. А. Капустину и М. М. Кабанову за обсуждение результатов исследований и разработку интернет-портала автоматизированной системы контроля горных пород (АСК-ГП) [22].

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» // III Международная научно-техническая конференция «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» : сб. тезисов (27–28 октября 2009 г.). – пос. Развилка, Московская обл. (Россия) : ВНИИГАЗ. – С. 4.
2. Обеспечение надежности транспортировки газа на участках развития опасных геологических процессов с использованием новых технологий диагностики / А. В. Завгороднев, А. Н. Колотовский, Н. Г. Ткаченко, А. Ю. Астанин, С. Г. Петров // Газовая промышленность. – 2011. – № 10. – С. 10–14.
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. – Томск : ЕИЭМПЗ, 1979. – 585 с. – Рукопись представлена Томским политехническим институтом. Деп. в ВИНТИ.

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. Сейсмoeлектромагнитные 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 (г. Красноярск, 9–15 сентября 2001 г.) / 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 (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГГА. Т. 2. – С. 13–18.
11. Detection of geodynamic activity areas based on the Earth's electromagnetic noise parameters / V. F. Gordeev, S. Yu. Malyshev, S. G. Shtalin, V. I. Polivach, V. A. Krutikov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – Vol. 48. – 012026. doi: 10.1088/1755-1315/48/1/012026.
12. Малышков Ю. П., Гордеев В. Ф., Малышков 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» (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГГА. 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» (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГГА. 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. – № 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. Lightning discharge bearing by monitoring of dangerous geological processes with a system based on Earth's natural pulsed electromagnetic field parameters / V. F. Gordeev, S. Yu. Malyshev, V. A. Krutikov, V. I. Polivach, S. G. Shtalin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 211. – 012073. doi: 10.1088/1755-1315/211/1/012073.
17. Malyshev S. Yu., Gordeev V. F., Pustovalov N. A. 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. – Vol. 211. – 012077. doi: 10.1088/1755-1315/211/1/012077.
18. Electromagnetic Fields: Principles, Engineering Applications and Biophysical Effects. Chapter 1 / Y. P. Malyshev, S. Yu. Malyshev, V. F. Gordeev, S. G. Shtalin, V. I. Polivach,

V. A. Krutikov, M. M. Zaderigolova // Earth's Natural Electromagnetic Noises in a Very-Low Frequency Band. – Nova Science Publishers, Inc., 2013. – P. 1–86.

19. 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 / Y. P. Malyshkov, S. Yu. Malyshkov, V. F. Gordeev, S. G. Shtalin, V. I. Polivach, V. A. Krutikov, M. M. Zaderigolova // Journal of Magnetohydrodynamics, Plasma, and Space Research. – 2015. – Vol. 20, No. 2. – 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 : тезисы междунар. науч.-технич. конференции (5–9 ноября 2018 г.). – Севастополь : РИО ИПТС, 2018. – С. 96.

21. Gordeev V. F., Malyshkov S. Y., Polyvach V. I. Electromagnetic Method for Exogenetic Geodynamic Elements Mapping in Permafrost Environment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 189, No. 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 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 189, No. 1. – 012015.

Получено 28.03.2019

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

GEOPHYSICAL MONITORING OF TECHNOGENIC HAZARDS ON ANTHROPOGENIC SOILS

Vasily F. Gordeev

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademichesky Prospect, Tomsk, Russia, 634055, 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, Akademichesky Prospect, Tomsk, Russia, 634055, 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, Akademichesky Prospect, Tomsk, Russia, 634055, 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. To resolve this task it is necessary to apply novel approach to stress-strained state of the rocks estimation. The work describes a unique method, based on Earth's natural pulsed electromagnetic field (ENPEMF) recording. Method's key feature is distinguishing time variations of ENPEMF signal against diurnal oscillations and technogenic signals. Spatial correlation between relative signal intensity and stress-strained state of the rocks is experimentally demonstrated, indicating that the method can be used for technogenic hazards monitoring on anthropogenic soils. Field testing of the method was carried out for two years on the cave-in occurrence near Solikamsk town. Authors make conclusions on the efficiency of the solutions applied for dangerous geodynamic processes monitoring on anthropogenic soils.

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

REFERENCES

1. Aksyutin, O. E. (2009). Increasing OAO Gazprom gas transportation systems functional reliability. In *Sbornik tezisev III Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Gazotransportnye sistemy: nastoyashchee i budushchee" [Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference "Gas Transmission Systems: the Present and the Future"* (p. 4). Moscow region (Russia): VNIIGAZ Publ. [in Russian].
2. Zavgorodnev, A. V., Kolotovskij, A. N., Tkachenko, N. G., Astanin, A. Ju., & Petrov, S. G. (2011). Ensuring the reliability of gas transportation in the areas of development of hazardous geological processes using new diagnostic technologies. *Gazovaja promyshlennost' [Gas Industry Magazine]*, 10, 10–14 [in Russian].
3. Vorobiev, A. A. (1970). On the possibility of electric discharges in Earth's interior. *Geologia I geofizika [Geology and Geophysics]*, 12, 3–13. [in Russian].
4. Vorobiev, A. A. (1979). *Tectono-electric phenomena and Earth's natural pulsed electromagnetic field emergence [Tectonoelectric phenomena and the occurrence of the natural pulsed electromagnetic field of the Earth]*. Tomsk: EIEMPZ Publ., 585 p. [in Russian].
5. Gold, R. M., Markov, G. P., Mogila, P. G., & Samokhvalov, M. A. (1975). Pulsed electromagnetic emission of minerals and rocks, subjected to mechanical loading. *Fizika Zemli [Earth Physics]*, 7, 109–111 [in Russian].
6. Gokhberg, M. B., Morgunov, V. A., Gerasimovich, E. A., & Mateveev, E. A. (1985). *Operativnye elektromagnitnye predvestniki zemletryasenij [Real-time electromagnetic earthquake precursors]*. Moscow: Nauka Publ., 116 p. [in Russian].
7. Gokhberg, M. B., Morgunov, V. A., & Pokhotelov, O. A. (1988). *Sejsmoelektromagnitnye yavleniya [Seismoelectromagnetic phenomena]*. Moscow: Nauka Publ., 174 p. [in Russian].
8. Mastov, Sh. R., Salomatin, V. N., & Yavorovich, L. V. (1983). Revealing landslide plots' level of deformation using electromagnetic field pulse recording method. *Inzhenernaya geologiya [Engineering Geology]*, 2, 98–101 [in Russian].
9. Shtalin, S. G., Malyshev, S. Yu., Malyshev, Yu. P., Gordeev, V. F., & Masalskiy, O. K. (2002). Automated station for real-time earthquake prediction. In *Sbornik materialov 1-j Mezhdunarodnoj shkoly-seminara: Fizicheskie osnovy prognozirovaniya razrusheniya gornyh porod [Proceedings of the 1st International School-Seminar: Physical Basis for Forecasting the Destruction of Rocks]* (pp. 324–330). V.A. Mansurov (Ed.). Krasnoyarsk: SibSAU Publ. [in Russian].
10. Malyshev, S. Yu., Gordeev, V. F., & Polivach, V. I. (2016). Mapping stress-strained state of the rocks anomalies and estimating fracture hazards for industrial objects. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 13–18). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
11. Gordeev, V. F., Malyshev, S. Yu., Shtalin, S. G., Polivach V. I., & Krutikov, V. A. (2016). Detection of geodynamic activity areas based on the Earth's electromagnetic noise parameters. In *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 48, 012026. doi: 10.1088/1755-1315/48/1/012026.
12. Malyshev, S. Yu., & Gordeev, V. F. (2016). Pulsed electromagnetic field recorder for geophysical survey. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 2. Subsoil Use. Mining. Di-*

rections and Technologies of Prospecting, Exploration and Development of Mineral Deposits. *Geoecology*] (pp. 68–72). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

13. Gordeev, V. F., Polivach, V. I., & Malyshkov, S. Yu. (2016). Earth's natural pulsed electromagnetic field method for soils dynamics monitoring. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoekologiya* [Proceedings of Interekspo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 2. Remote Sensing of the Earth and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology] (pp. 152–157). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

14. Malyshkov, S. Yu., Gordeev, V. F., & Polivach, V. I. (2017). Technogenic landslide dynamic field research. *Geologiya i geofizika yuga Rossii* [Geology and Geophysics of the South of Russia], 2, 82–90 [in Russian].

15. Gordeev, V. F., Malyshkov, S. Yu., Botygin, I. A., Sherstnev, V. S., & Sherstneva, A. I. (2017). Development and implementation of software for visualization and analysis of geophysical recorders data. In *Tezisy dokladov XXIII Mezhdunarodnogo simpoziuma: Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery* [Proceedings of XXIII International Symposium: Optics of Atmosphere and Ocean] (pp. D514–D518). Irkutsk [in Russian].

16. Gordeev, V. F., Malyshkov, S. Yu., Krutikov, V. A., Polivach, V. I., & Shtalin, S. G. (2018). Lightning discharge bearing by monitoring of dangerous geological processes with a system based on Earth's natural pulsed electromagnetic field parameters. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 211, 012073. doi:10.1088/1755-1315/211/1/012073.

17. Malyshkov, S. Yu., Gordeev, V. F., & Pustovalov, N. A. (2018). Detailing the tectonic structure of a nuclear industry construction site using an Earth's natural pulsed electromagnetic field method. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 211, 012077. doi:10.1088/1755-1315/211/1/012077.

18. Malyshkov, Y. P., Malyshkov, S. Yu., Gordeev, V. F., Shtalin, S. G., Polivach, V. I., Krutikov, V. A., & Zaderigolova, M. M. (2013). *Electromagnetic Fields: Principles, Engineering Applications and Biophysical Effects: Chapter 1, Earth's Natural Electromagnetic Noises in a Very-Low Frequency Band* (pp. 1–86). Nova Science Publishers, Inc.

19. Malyshkov, Y. P., Malyshkov, S. Yu., Gordeev, V. F., Shtalin, S. G., Polivach, V. I., Krutikov, V. A., & Zaderigolova, M. M. (2015). 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*, 20(2), 107–192.

20. Cheredko, N. N., Tartakovskiy, V. A., Volkov, Yu. V., Krutikov, V. A., Gordeev, V. F., & Malyshkov, S. Yu. (2018). Regional geosystems' stressed state precursors analysis. In *Tezisy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii: Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy* [Abstracts of the International Scientific and Technical Conference: Environmental Control Systems] (p. 96). Sevastopol: RIO IPTS Publ. [in Russian].

21. Gordeev, V. F., Malyshkov, S. Y., Polyvach, V. I. (2017). Electromagnetic Method for Exogenetic Geodynamic Elements Mapping in Permafrost Environment. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 189(1), 012006.

22. Gordeev, V. F., Kabanov, M. M., & Kapustin, S. N. (2017). Algorithm and Software for Landslide Slopes Stability Estimation with Online Very Low Frequency Monitoring. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 189(1), 012015.

Received 28.03.2019

© V. F. Gordeev, S. Yu. Malyshkov, V. I. Polivach, 2019