

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МЕТОД ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

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

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

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

В работе предложен метод изучения строения и оценки напряженно-деформированного состояния мерзлых грунтов, основанный на регистрации параметров естественного импульсного электромагнитного поля Земли. В отличие от ранее применяемых для решения подобных задач геофизических методов, основанных на измерении электрических и магнитных свойств мерзлых пород, впервые применен метод, основанный на определении структурных, прочностных и деформационных свойств горных пород. Алгоритм и аппаратно-программный комплекс для его реализации апробирован при инженерно-геокриологическом картировании территории размещения линейных сооружений сбора углеводородов на Чаяндинском нефтегазоконденсатном месторождении в Якутии. Приведены примеры обнаружения разнообразных по морфологии криогенных образований и показана возможность применения метода для мониторинга геокриологических процессов при воздействии техногенной нагрузки и глобального потепления.

Ключевые слова: естественное импульсное электромагнитное поле Земли, многолетнемерзлые грунты.

ELECTROMAGNETIC METHOD FOR PERMAFROST GEOPHYSICAL RESEARCH

Sergey Yu. Malyshev

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

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

Vitaly I. Polivach

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

The work suggest a method to research structure and estimate stress-strained state of permafrosts, based on Earth's natural pulsed electromagnetic field parameters recording. Unlike previously used geophysical methods applied for such tasks, based on measuring electric and magnetic permafrosts properties, for the first time the method applied is based on determining structural, strength and deformational properties of the rocks. Algorithm and software-hardware system implementing the method is tested during engineering-cryological mapping of the Yakutia's Chayadinsk oil, gas and condensate field territory where line facilities are located. Examples of varying morphology cryogenic formations detection are demonstrated as well as method's capacity to be applied to monitor geocryological processes in conditions of technogenic influence and global warming.

Key words: earth's natural pulsed electromagnetic field, premafrost.

Введение

В связи с естественной динамикой климата и техногенным изменением поверхностных условий при проектировании инженерных сооружений и их эксплуатации возникает острая необходимость, как оценки несущей способности многолетнемерзлых грунтов (ММГ), так и мониторинге их состояния. В России термокарсту подвержено около 45 % ее территории. Его воздействие проявляется в 72 городах. Значительный интерес проблема термокарста вызывает в последнее время в связи с глобальным потеплением климата и интенсификацией опасных геокриологических процессов. Дальнейшее развитие этих тенденций может привести к значительным изменениям рельефа на многих важных промышленных объектах с крайне негативными последствиями. Свод правил инженерно-геологических изысканий для строительства в условиях ММГ определяет необходимость прогноза изменений во времени и в пространстве инженерно-геокриологических условий исследуемой территории для безопасной эксплуатации сооружений. Расчетный срок прогноза определяется в общем случае расчетным сроком эксплуатации проектируемых объектов, поскольку изменения условий будут воздействовать на эти объекты в течение всего времени их существования. Изменения, вызванные действием естественных факторов, сказываются весьма медленно, но существуют короткопериодные непрогнозируемые колебания климата и техногенные изменения геокриологических условий, учесть который в долгосрочном прогнозе сложно, что подтверждается весьма значительной долей деформируемых зданий и сооружений от общего их числа, сооружаемого в районах распространения ММГ. Поэтому, наряду с оценкой состояния грунтов при проектировании, возникает необходимость наблюдения за динамикой состояния грунтов, особенно на промышленных площадках объектов повышенной опасности.

В настоящее время не проработана достаточная нормативная база для геокриологических изысканий при проектировании и эксплуатации промышленных объектов в условиях ММГ. Имеющиеся рекомендации прошлого века [1] предписывают использование электроразведки на постоянном токе. Их использование основывается на дифференциации мерзлых и талых грунтов по электрическим сопротивлениям. Но при изучении мерзлых толщ часто приходится

иметь дело с разрезами, представляющими собой сочетание горизонтальных или слабонаклонных границ с крутопадающими. Последние связаны с боковыми контактами талых и мерзлых пород. Крутопадающие границы вызывают такие изменения на кривых вертикального электрического зондирования, которые в большинстве случаев по внешним признакам не отличаются от изменений, наблюдаемых над горизонтально-слоистыми или градиентными средами. Интерпретация искаженных кривых приводит к крупным ошибкам, не поддающимся учету. В настоящее время в связи с началом активного освоения Арктической зоны постоянно ведется поиск новых экологически чистых и достоверных методов геоэкологических изысканий. Например, криологические задачи, такие, как определение границ многолетнемерзлых пород, поиск криопеггов, таликов, термокаст и других геоморфологических объектов используются методы георадиолокации. Но эффективность георадарных работ в районах арктического побережья, где распространены мерзлые суглинистые породы остается низкой [2]. Во введенном в действие в 2000 г. основном нормативном документе для проведения инженерных изысканий в районе Крайнего Севера [3] для решения задач определения местоположения, глубины залегания и формы зон трещиноватости и тектонических нарушений, оценки их современной активности в многолетнемерзлых грунтах, как вспомогательный, рекомендован метод естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ). Однако методик и оборудования для производстве этих работ в условиях Крайнего Севера в настоящее время не существует.

Метод ЕИЭМПЗ позволяет локализовать все нарушения сплошности горных пород в условиях их естественного залегания, в том числе разломы, разрывные нарушения, зоны трещиноватости, карсты, талики, прочие неоднородности и контролировать их динамику [4]. Применяемые радиоволновые методы основаны на явлении электромагнитной эмиссии – способности диэлектрических материалов излучать электромагнитные сигналы при воздействии на них [5]. Электромагнитная эмиссия возникает в процессе образования и релаксации зарядов на плоскостях трещин при изменении напряженного состояния массива горных пород [6], как при изменении сплошности материалов-диэлектриков, так и при разрыве, заполненных электролитом капилляров. В горных породах источниками естественных электромагнитных полей являются неоднородности структуры грунтов, разнонапряженные структуры, трещины и микротрещины. В результате механоэлектрических преобразований под действием деформационных волн из нижней мантии [7–11], приливных сил, микросейсмических колебаний, ветровой и техногенной нагрузки на этих источниках возникают импульсные электромагнитные поля, которые и создают естественный электромагнитный фон литосферного происхождения [12]. Наблюдения за процессом электромагнитного излучения позволяет контролировать напряженно-деформированное состояние горного массива [13–17]. В переменном поле тектонических напряжений (сжатие – растяжение) породы, содержащие минералы-диэлектрики, благодаря механоэлектрическим преобразованиям, излучают электромагнитные импульсы, интенсивность и амплитудно-частотный состав

которых определяется их структурными, прочностными и деформационными свойствами. Эти процессы приводят к появлению импульсного электромагнитного излучения.

Методы и материалы

Проверка возможности картирования элементов экзогенной геодинамики в условиях ММГ проводилась на Чаяндинском нефтегазоконденсатном месторождении в Якутии. В районе исследований площадь развития мерзлых грунтов достигает более 60 %. Наибольшая мощность мерзлой зоны на равнинах и плато составляет 100–250 м. Максимальная глубина сезонного оттаивания составляет в песках – 3,0–4,6 м, в суглинках – 2,0–2,7 м. Термокарстовые образования развиваются преимущественно в сильнольдистых аллювиальных и болотных отложениях. Прогрессируют процессы термокарста в парагенезисе с пучением. Причинами развития термокарста являются повышение среднегодовой температуры пород и изменение степени обводненности участков. В настоящее время процессы термокарста развиты на плоских вершинах водораздела, сложенных элювиальными образованиями на породах терригенно-карбонатной формации, и выражены в небольших котловинах глубиной до 0,5 м. Связаны процессы термокарста с вытаиванием сегрегационных льдов. Интенсивно процессы термокарста стали развиваться с началом хозяйственного освоения в процессе разведки нефтегазового месторождения.

При камеральной обработке аномалии ЕИЭМПЗ сопоставлялись с результатами инженерно-геокриологического бурения, снегомерной съемки, полевыми и лабораторными исследованиями водно-физических свойств грунтов, а также анализа фондовых материалов дистанционного морфотектонического анализа.

Регистрация параметров ЕИЭМПЗ производилась многоканальными геофизическими регистраторами «МГР-01». Регистратор разработан авторами данной работы, зарегистрирован в государственном реестре средств измерений под № 31892-06 и допущен к применению в Российской Федерации [18]. При производстве работ один из регистраторов использовался, как вариационный (реперный) и устанавливался ежедневно перед началом профильных измерений в пределах объекта исследования для измерения фоновых вариаций ЕИЭМПЗ в режиме непрерывных измерений. Остальными регистраторами производилась съемка пространственно-временных вариаций ЕИЭМПЗ по заранее заданным пикетам. Синхронизация регистраторов по времени производилась ежедневно перед началом работ.

Методически выделение пространственных аномалий ЕИЭМПЗ проводилось путем сравнения данных интенсивности импульсного потока, зарегистрированных на каждом пикете измерений с данными вариационного (реперного) регистратора [4]. Таким образом, из пространственно-временных вариаций ЕИЭМПЗ вычитаются фоновые шумы и выделяются аномалии, связанные со строением земной коры в точке измерения.

Результаты

На рис. 1 представлены пространственные вариации ЕИЭМПЗ в местах отсутствия тектонических нарушений и экзогенной геодинамики земной коры. На этом и следующих графиках тонкой линией с точками приведены данные фактических измерений, жирной кривой результат их сглаживания скользящим окном по 3 точкам. Хотя в целом исследуемая территория имеет сложную тектоническую структуру, аномалии электромагнитных шумов на этом участке не превышают 40 % относительно фоновых.

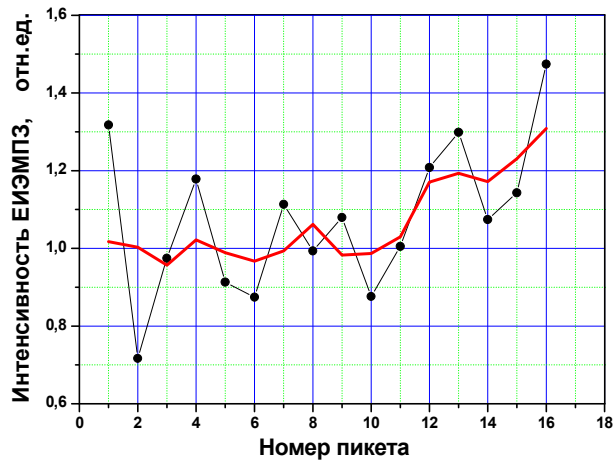


Рис. 1. Пространственные вариации электромагнитных шумов в местах отсутствия нарушений сплошности земной коры

На рис. 2–4 представлены пространственные вариации ЕИЭМПЗ вблизи разнообразных по морфологии криогенных образований. На этих графиках аномальные значения шумов в 30–40 раз превышают фоновые значения.

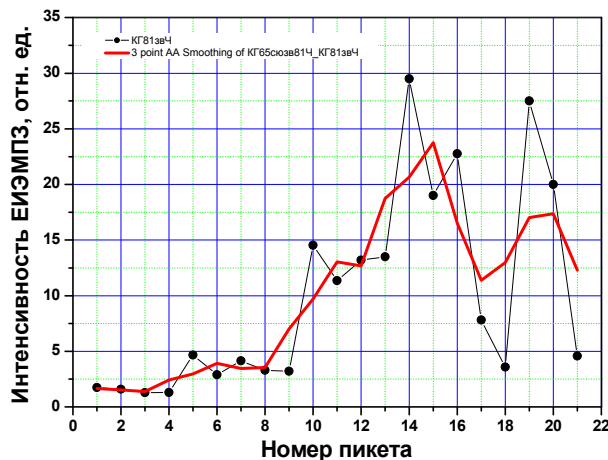


Рис. 2. Пространственные вариации электромагнитных шумов по профилю, пересекающему термокарстовая воронка

По результатам комплексного геофизического исследования места вблизи указанных нарушений земной коры по инженерно – геокриологическим условиям относится к особо опасной категории. Категория сложности условий освоения – «очень сложные». Многолетнемерзлые породы имеют прерывистое распространение.

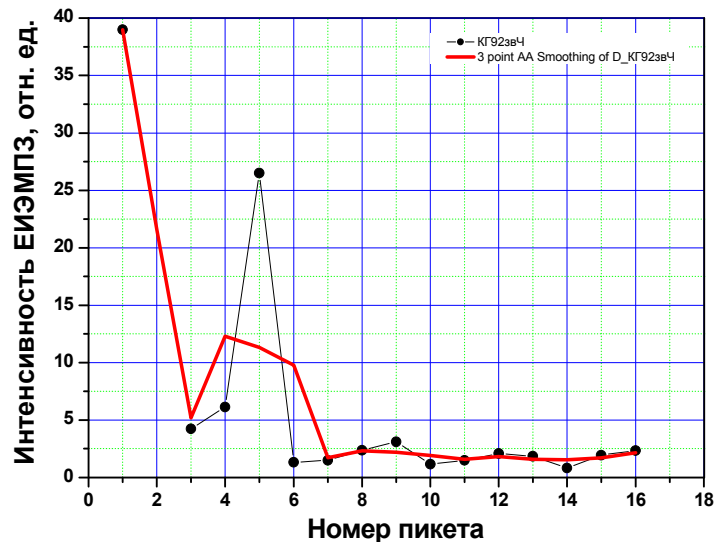


Рис. 3. Пространственные вариации электромагнитных шумов по профилю, пересекающему криогенное образование, связанное с морозным пучением

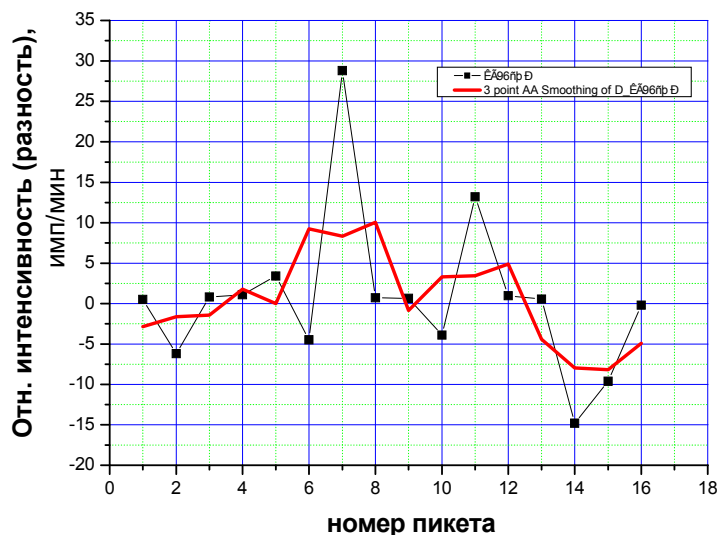


Рис. 4. Пространственные вариации электромагнитных шумов по профилю, пересекающему талик

Обсуждение

При полевых работах в местах геофизических аномалий выявленных методом ЕИЭМПЗ ставился комплекс инженерно-геокриологических работ: бурение, снегомерная съемка, полевые и лабораторные исследования водно-физических свойств грунтов, а также анализ фондовых материалов дистанционного морфотектонического анализа. Это позволило заверить результаты исследований другими методами и интерпретировать полученные аномалии.

Одна из аномалий (см. рис. 2) была связана процессами термокарста на исследуемой площадке. Территория площадки располагается на водоразделе и пологом склоне. Первый от поверхности геолого-генетический комплекс в пределах водораздела сложен дресвяным и щебнистым суглинком (содержание дресвы и щебня 25–50 %), в пределах склона суглинками с дресвой и щебнем (15–25 %) четвертичного возраста и имеют мощность до 5 м. На площадке отмечается как прерывистое распространение ММП, с температурой $-0,5 \div -1,5$ °С, так и сплошное с температурой $-1,5 \div -2,5$ °С. Мощностью сезонно-талого слоя 1,5–2,0 м. В естественных условиях экзогенные геологические процессы развиваются локально, но при освоении территории возможно их развитие. По инженерно-геокриологическим условиям территория площадки относится к опасной категории. Категория сложности условий освоения – очень сложные.

На рис. 3 приведен пример аномалии интерпретированной, как криогенное образование, связанное с морозным пучением. Территория площадки располагается на пологом склоне и пойме реки. Первый от поверхности геолого-генетический комплекс в пределах склона сложен дресвяным и щебнистым суглинком (содержание дресвы и щебня 25–50 %), в пределах поймы – сложен суглинками, супесями с прослоями песков, с включением гравия и гальки четвертичного возраста и имеют мощность до 5 м. На площадке развиты биогенные отложения (торф), мощностью до 0,5 м. ММП имеют прерывистое распространение, с температурами $0 \div -1,5$ °С, мощностью сезонно-талого слоя 2,0–2,5 м. На территории площадки развито многолетнее пучение, при освоении территории возможно его усиление. По инженерно-геокриологическим условиям территория площадки относится к особо опасной категории. Категория сложности условий освоения – очень сложная.

Пространственные вариации электромагнитных шумов по профилю пересекающему талик приведены на рис. 4. Территория площадки располагается на водораздельном плато. Первый от поверхности геолого-генетический комплекс сложен дресвяным и щебнистым суглинком (содержание дресвы и щебня 25–50 %) четвертичного возраста и имеет мощность до 5 м. ММП имеют прерывистое распространение, с температурам $-0,5 \div -1,5$ °С, мощностью сезонно-талого слоя 2,0–2,5 м. На территории площадки находится озеро, под ним в естественных условиях развит талик. По инженерно-геокриологическим условиям территория площадки относится к особо опасной категории. Категория сложности условий освоения – очень сложные.

Полученные результаты подтверждают возможность использования предложенного радиоволнового метода для геокриологических исследований. Возможность применения метода ЕИЭМПЗ для мониторинга динамики изменения напряженно-деформированного состояния грунтов подтверждена [14, 19–20] успешно действующими системами прогноза опасных геологических процессов на магистральных газопроводах. Предложенное применение обработки сигналов ЕИЭМПЗ и использование системы разнесенных в пространстве станций обеспечило высокоточные, хорошо воспроизводимые результаты, отражающие активность геодинамических процессов, с высокой достоверностью. Применение данной системы позволяет в реальном масштабе времени выявлять в структуре склона зоны повышенной и пониженной активности оползневых процессов, зоны растяжения и относительного сжатия, пространственную ориентацию напряжений. Систему, аналогичную описанной выше и внедренной для прогноза подвижек оползней, можно использовать и для мониторинга состояния ММГ.

Заключение

Проведенные полевые исследования в районе распространения ММГ показали возможность применения метода естественных импульсных электромагнитных полей для картирования элементов экзогенной геодинамики. Регистрируемые сигналы определяется структурными, прочностными и деформационными свойствами горных пород, этим новый метод геофизической разведки качественно отличается от традиционно применяемых методов основанных на измерении электрических и магнитных свойств мерзлых пород. Метод естественных импульсных электромагнитных полей Земли уже сейчас может применяться при выборе мест для строительства инженерных сооружений в условиях ММГ. В работе показана возможность мониторинга состояния этих грунтов в условиях техногенной нагрузки. Целью дальнейшего развития работ является разработка алгоритмов оценки несущей способности ММГ, ее динамики в условиях техногенной нагрузки и глобального потепления климата. Решение прикладной задачи невозможно без фундаментальных исследований. Необходима оценка связи аномалий различных видов геофизических процессов друг с другом, с процессами в атмосфере, а также с различными проявлениями внешних, в том числе антропогенных, воздействий на геосферу.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность С. Г. Шталину за разработку многоканального геофизического регистратора «МГР-01».

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рекомендации по геокриологической съемке и районированию равнинных территорий для размещения объектов нефтяной и газовой промышленности по стадиям проектирования / ПНИИС. – М. : Стройиздат, 1984.
2. Заключение научно-методического Совета по геолого-геофизическим технологиям поиска и разведки твердых полезных ископаемых (НМС ГГТ) Минприроды России 18.12.2014. (89-я сессия).
3. Свод правил 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.
4. Способ геофизической разведки: пат. 2414726 Рос. Федерация: МПК G01V 3/08 (2006/01) / Малышков Ю. П., Малышков С. Ю., Шталин С. Г., Гордеев В. Ф., Поливач В. И. 2009100934/28 ; заявл. 13.06.2009 ; опубл. 20.03.2011, Бюл № 8.
5. Воробьев А. А. О возможности электрических разрядов в недрах Земли // Геология и геофизика. – 1970. – № 12. – С. 3–13.
6. Беляев Л. М., Мартышев Ю. Н., Набатов В. В. Исследование свечения при разрушении минералов. Времена высвечивания // Физика щелочно-галлоидных кристаллов. – Изд-во Латв. ун-та, 1962. – С. 179–182.
7. Малышков Ю. П., Малышков С. Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра земли // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 2. – С. 152–172.
8. Malyshkov Yu. P., Malyshkov S. Yu. 2012. Eccentric Motion of the Earth's Core and Lithosphere: Origin of Deformation Waves and their Practical Application. In *The Earth's Core: Structure, Properties and Dynamics*, Editors: Jon M. Phillips, Nova Science Publishers, Inc. ISBN: 978-1-61324-584-2, p. 115–212.
9. Malyshkov Y. P., Malyshkov S. Yu. The algorithm for calculating the Earth's core runs on the parameters of natural pulsed electromagnetic field of the Earth // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2016, 48 012028.
10. Malyshkov Yu. P et al. 2013 Earth's Natural Electromagnetic Noises in a Very-Low Frequency Band; In *Electromagnetic Fields: Principles, Engineering Applications and Biophysical Effects*, Editors: Myung-Hee Kwang and Sang-Ook Yoon, Nova Science Publishers, Inc. ISBN: 978-1-62417-063-8, p. 1–86.
11. Малышков Ю. П., Малышков С. Ю. Признаки воздействия ядра Земли на население планеты // *Биофизика*. – 2015. – Т. 60, вып. 3. – С. 589–624.
12. Malyshkov Yu. P., Malyshkov S. Yu., Gordeev V. F., Shtalin S. G., Polivach V. I., Krutikov V. A., Zaderigolova M. M. Earth's Natural Electromagnetic Noises: Their Deep-Seated Origin, Effect on People, Recording and Application in Geophysics// *Horizons in World Physics*. 2015, v. 283, pp. 43–127.
13. Интернет-портал системы контроля геодинамических процессов / М. М. Кабанов, С. Н. Капустин, П. Н. Колтун, П. Б. Милованцев // *ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.)*. – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 138–142.
14. 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, 189 (1), 012015.
15. 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.
16. Gordeev V. F., Malyshkov S. Yu., Polyvach V. I., Electromagnetic Method for Exogenetic Geodynamic Elements Mapping in Permafrost Environment // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2017 189(1), 012006.

17. Malyshkov S. Yu., Gordeev V. F., Polyvach V. I., Shtalin S. G., Pustovalov K. N. Estimation of the Lithospheric Component Share in the Earth Natural Pulsed Electromagnetic Field Structure // 2017, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 189(1), 012023.

18. Регистратор импульсных электромагнитных полей для мониторинга геодинамических процессов и геофизической разведки / С. Г. Шталин и др. // Датчики и системы. – 2012. – № 4. – С. 32–37.

19. Gordeev V. F., Malyshkov S. Yu., Botygin I. A., Sherstnev V. S., Sherstneva A. I. Development and implementation of the software for visualization and analysis of data geophysical loggers // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. p. 104665D-1-6. doi: 10.1117/12.2286726.

20. Kabanov M. M., Kapustin S. N., Gordeev V. F., Botygin I. A., Tartakovsky V. A. Development of software for geodynamic processes monitoring system // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. PP. 104665G-1-5. doi: 10.1117/12.2286817.

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