

УДК 622.1:550.3

DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-26-36

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МЕТОД ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Сергей Юрьевич Малышков

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС 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 (ИМКЭС 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 Игоревич Поливач

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

Несмотря на то, что постоянно ведется поиск новых экологически чистых и достоверных методов геокриологических изысканий, в настоящее время эффективность применяемых геофизических методов оценки напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых пород остается низкой. Целью работ, описанных в статье, было исследование возможностей метода естественного импульсного электромагнитного поля Земли для поиска криогенных образований и оценки несущей способности мерзлых грунтов. 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. Полученные результаты свидетельствуют о применимости предложенного метода для обнаружения разнообразных по морфологии криогенных образований. В работе показана возможность применения метода для мониторинга геокриологических процессов при воздействии техногенной нагрузки и глобального потепления климата, и это может послужить толчком для продолжения исследований в этом направлении.

Ключевые слова: естественное импульсное электромагнитное поле Земли, многолетнемерзлые грунты, геокриологические изыскания, напряженно-деформированное состояние горных пород, геофизическая разведка, мониторинг опасных геодинамических процессов, криогенный процесс.

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 мониторинга 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 которые 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 геокриологических изысканий. Например, при решении криологических задач, таких как определение границ многолетнемерзлых пород, поиск криопегов, 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 норматив-

ном 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 позволяют 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 трем точкам. Хотя в целом исследуемая территория имеет сложную тектоническую структуру, аномалии электромагнитных шумов на этом участке не превышают 40 % относительно фоновых.

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.

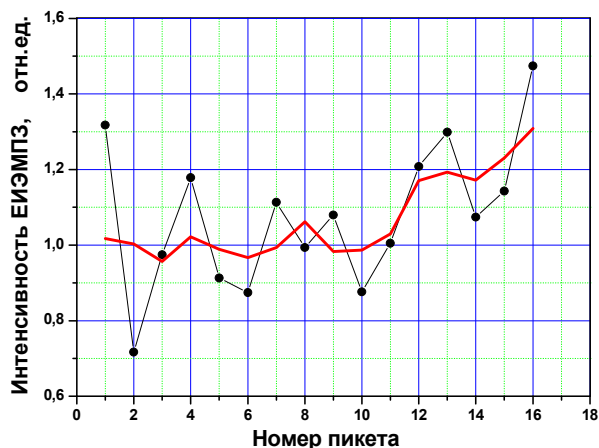


Рис. 1. Пространственные вариации электромагнитных шумов в местах отсутствия нарушений сплошности земной коры

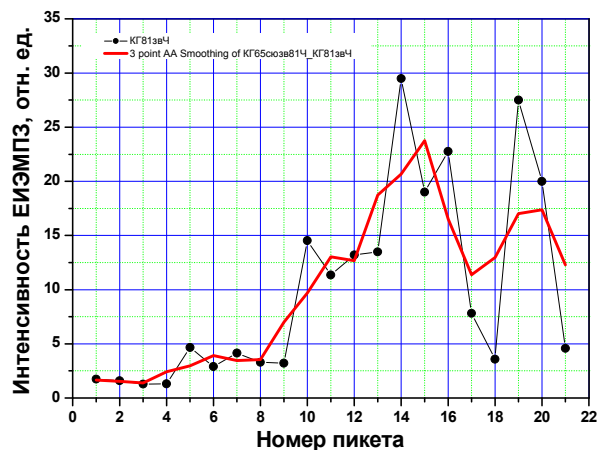


Рис. 2. Пространственные вариации электромагнитных шумов по профилю, пересекающему термокарстовую воронку

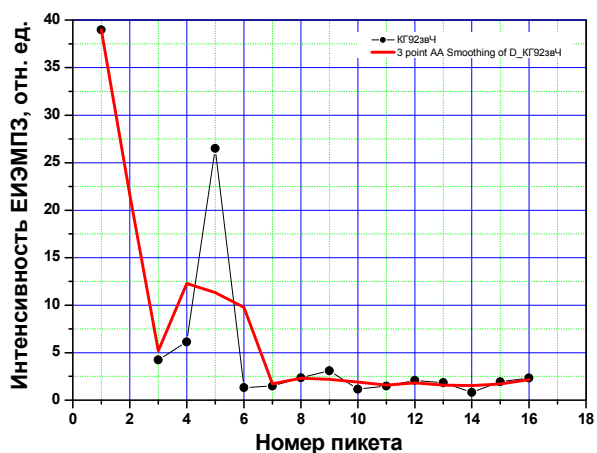


Рис. 3. Пространственные вариации электромагнитных шумов по профилю, пересекающему криогенное образование, связанное с морозным пучением

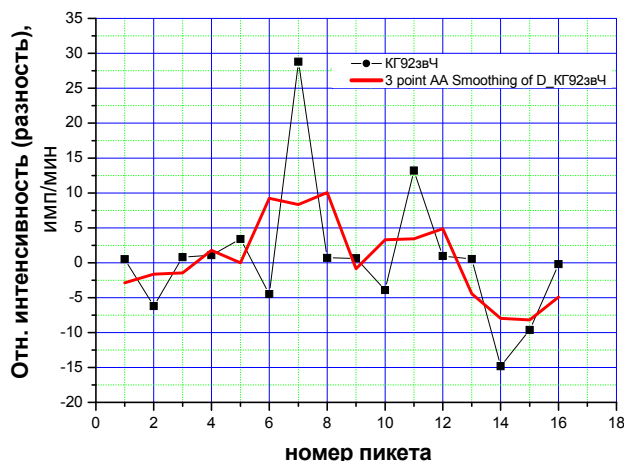


Рис. 4. Пространственные вариации электромагнитных шумов по профилю, пересекающему талик

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

Обсуждение

При полевых работах в местах геофизических аномалий, выявленных методом ЕИЭМПЗ, ставился комплекс инженерно-геокриологических работ: бурение, снегомерная съемка, полевые и лабораторные исследования воднофизических 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, имеющими мощность до 5 м. На площадке отмечается как прерывистое распространение ММП, с температурой от –0,5 до –1,5 °С, так и сплошное с температурой от –1,5 до –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 в 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, имеющими мощность до 5 м. На площадке развиты биогенные отложения (торф), мощностью до 0,5 м. ММП имеют прерывистое распространение, с температурами от –0 до –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 температурами от –0,5 до –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. Регистри-

руемые сигналы определяются 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 / ПНИИИС Госстроя СССР. – М. : Стройиздат, 1984. – 108 с.
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) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geolraz.com/data/files/Novosti/7d1b23bd07599932b15f874dce10a99d.pdf>.
3. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (одобрен Письмом Госстроя РФ от 03.11.1999 № 5-11/140) [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
4. Пат. 2414726 Российская Федерация, МПК G 01 V 3/08 (2006/01). Способ геофизической разведки / 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 : сборник. – Рига : 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. Eccentric Motion of the Earth's Core and Lithosphere: Origin of Deformation Waves and their Practical Application // *The Earth's Core: Structure, Properties and Dynamics* / Editor Jon M. Phillips. – Nova Science Publishers, Inc., 2012. – 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. – Vol. 48. – P. 012028.
10. Malyshkov Yu. P et al. Earth's Natural Electromagnetic Noises in a Very-Low Frequency Band // *Electromagnetic Fields: Principles, Engineering Applications and Biophysical Effects* / Editors: Myung-Hee Kwang and Sang-Ook Yoon. – Nova Science Publishers, Inc., 2013. – P. 1–86.
11. Мальшков Ю. П., Мальшков С. Ю. Признаки воздействия ядра Земли на население планеты // *Биофизика*. – 2015. – Том 60, вып. 3. – С. 589–624.
12. Earth's Natural Electromagnetic Noises: Their Deep-Seated Origin, Effect on People, Recording and Application in Geophysics / Yu. P. Malyshkov, S. Yu. Malyshkov, V. F. Gordeev, S. G. Shtalin, V. I. Polivach, V. A. Krutikov, M. M. Zaderigolova // *Horizons in World Physics*. – 2015. – Vol. 283. – P. 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. – Vol. 189 (1). – P. 012015.
15. Мальшков С. Ю., Гордеев В. Ф., Поливач В. И. Полевые исследования динамики техногенного оползня // *Геология и геофизика Юга России*. – 2017. – № 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. – Vol. 189 (1). – P. 012006.
17. Estimation of the Lithospheric Component Share in the Earth Natural Pulsed Electromagnetic Field Structure / S. Yu. Malyshkov, V. F. Gordeev, V. I. Polyvach, S. G. Shtalin, K. N. Pustovalov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 189 (1). – P. 012023.
18. Шталин С. Г. и др. Регистратор импульсных электромагнитных полей для мониторинга геодинамических процессов и геофизической разведки // *Датчики и системы*. – 2012. – № 4. – С. 32–37.
19. Development and implementation of the software for visualization and analysis of data geophysical loggers / V. F. Gordeev, S. Yu. Malyshkov, I. A. Botygin, V. S. Sherstnev, A. I. Sherstneva // *Proc. SPIE*. – 2017. – Vol. 10466. – P. 104665D-1-6. doi: 10.1117/12.2286726.
20. Development of software for geodynamic processes monitoring system / M. M. Kabanov, S. N. Kapustin, V. F. Gordeev, I. A. Botygin, V. A. Tartakovskiy // *Proc. SPIE*. – 2017. – Vol. 10466. – P. 104665G-1-5. doi: 10.1117/12.2286817.

Получено 28.03.2019

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

ELECTROMAGNETIC METHOD FOR GEOPHYSICAL RESEARCH OF PERMAFROST SOIL

Sergey Yu. Malyshkov

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

Despite the continuing research of new eco-friendly and accurate geocryological survey methods, current efficiency of geophysical methods for permafrost stress-strain state estimation remains relatively low. The work described in the paper concentrates on the research of Earth's natural pulsed electromagnetic field method capability in locating cryogenic occurrences and permafrost bearing capacity estimation. Unlike previously used geophysical methods applied for such tasks, based on measuring electric and magnetic permafrost properties, for the first time the applied method 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. Obtained results indicate that the method is applicable for detection of varying morphology cryogenic formations. The work demonstrates method's capacity to monitor geocryological processes in conditions of technogenic influence and global warming, which could give a nudge to a continuing research in that direction.

Key words: earth's natural pulsed electromagnetic field, permafrost, geocryological survey, stress-strain state of the rocks, geophysical survey, dangerous geodynamic processes monitoring, freeze-thaw action.

REFERENCES

1. Recommendations on geocryological surveying and zoning of lowland areas for the location of oil and gas industry facilities by design stages. PNIIS. (1984). Moscow: Stroyizdat Publ., 108 p. [in Russian].
2. Conclusion of the Scientific and Methodological Council on geological and geophysical technologies for prospecting and exploration of solid minerals (NMS GGT) of the Ministry of Natural Resources of Russia 18.12.2014. (89th session). Retrieved from <http://www.geolraz.com/data/files/Novosti/7d1b23bd07599932b15f874dce10a99d.pdf> [in Russian].
3. Code of Practice 11-105-97. Engineering and geological surveys for construction: Part IV, Rules of work in areas of permafrost. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
4. Malyshev, Yu. P., Malyshev, S. Yu., Shtalin, S. G., Gordeev, V. F., & Polivach, V. I. (2011). Geophysical survey method. Patent No. 2414726. Tomsk: IP Russian Federation [in Russian].
5. 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].
6. Belyaev, L. M., Martyshov, Yu. N., & Nabatov, V. V. (1962). Study of the glow in the destruction of minerals. Flash times. In *Sbornik: Fizika shchelochno-galoidnykh kristallov [Proceedings of Physics of Alkali Galoid Crystals]* (pp. 179–182). Riga: Latv. University Publ. [in Russian].
7. Malyshev, Yu. P., & Malyshev, S. Yu. (2009). Periodicity of Geophysical fields and seismicity: possible link with core motion. *Geologia i geofizika [Geology and Geophysics]*, 50(2), 115–130 [in Russian].
8. Malyshev, Yu. P., & Malyshev, 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 (pp. 115–212). Jon M. Phillips (Ed.). Nova Science Publishers, Inc.

9. Malyshkov, Y. P., & Malyshkov, S. Yu. (2016). The algorithm for calculating the Earth's core runs on the parameters of natural pulsed electromagnetic field of the Earth. In *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 48, p. 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* (pp. 1–86). Myung-Hee Kwang and Sang-Ook Yoon (Eds.). Nova Science Publishers.

11. Malyshkov, Y. P., & Malyshkov, S. Yu. (2015). Signs of the Impact of the Earth's core on the Planet's Population. *Biofizika*, 60(3), 589–624.

12. Malyshkov, Yu. 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. *Horizons in World Physics*, 283, 43–127.

13. Kabanov, M. M., Kapustin, S. N., Koltun, P. N., & Milovantsev, P. B. (2011). Internet portal of the control system for geodynamic processes. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2011: T. 1, ch. 1 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia 2011: Vol. 1, Part 1]* (pp. 138–142). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

14. 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), p. 012015.

15. Malyshkov, S. Yu., Gordeev, V. F., & Polivach, V. I. (2017). Field studies of the dynamics of technogenic landslide. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii [Geology and Geophysics of the South of Russia]*, 2, 82–90 [in Russian].

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

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

18. Shtalin, S. G., et al. (2012). Recorder of pulsed electromagnetic fields for monitoring geodynamic processes and geophysical prospecting. *Datchiki i sistemy [Sensors and Systems]*, 4, 32–37 [in Russian].

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

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

Received 28.03.2019

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