

Развитие пассивной радиоволновой информационно-измерительной технологии мониторинга динамических процессов взаимодействия литосферы, криосферы и атмосферы

В.Ф. Гордеев¹, С.Ю. Малышков¹, В.А. Крутиков¹, В.И. Поливач¹,
М.М. Кабанов¹, С.Н. Капустин¹, С.Г. Шталин^{1,2}, К.Н. Пустовалов^{1*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Томский университет систем управления и радиоэлектроники
634055, г. Томск, пр. Ленина, 40

Поступила в редакцию 20.10.2021 г.

Представлены результаты многолетних исследований естественного импульсного электромагнитного поля Земли в диапазоне очень низких частот в различных регионах. В лабораторных и натурных экспериментах показано наличие существенной доли литосферной составляющей в структуре этого поля, позволяющей осуществлять надежный инструментальный мониторинг состояния пространственных литосферных структур, неоднородностей и параметров динамических процессов взаимодействия литосферы, криосферы и атмосферы. Дано краткое описание разработанной аппаратуры и методов обработки, позволяющих проводить широкий спектр геофизических исследований в условиях возмущенных электромагнитных полей.

Ключевые слова: естественное импульсное электромагнитное поле земли, атмосферно-литосферные взаимодействия, напряженно-деформированное состояние горных пород, геофизическая разведка, мониторинг опасных геодинамических процессов; Earth's natural pulsed electromagnetic field, atmosphere–lithosphere interactions, stress-deformed state of the rocks, geophysical survey, dangerous geodynamic processes monitoring.

Введение

Толчком к исследованию закономерностей изменения параметров естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) послужила гипотеза профессора Томского политехнического института (ныне ТПУ) А.А. Воробьева, высказанная в конце 60-х гг. XX в., о «грозе в Земле» [1]. Суть гипотезы в том, что в эпицентре землетрясения за счет механоэлектрических преобразований возникают электрические поля, которые могут прямым лучом выходить на поверхность Земли и служить предвестниками готовящихся геодинамических проявлений. Ожидалось, что повышенная интенсивность потока импульсов будет наблюдаться накануне и в момент сильных землетрясений, сначала за счет накопления энергии, а потом за счет разрушения горных пород в эпицентральных районах очага события. Гипотеза не подтвердилась, но по-

служила поводом для начала исследований литосферной составляющей импульсных электромагнитных полей, и именно в Томской научной школе были получены первые результаты, показывающие связь процессов в земной коре с ЕИЭМПЗ [2].

Последующие лабораторные и натурные исследования показали, что большинству горных пород присущи механоэлектрические преобразования за счет движения зарядов, образованных при раскрытии или электризации трещин, колебаний контактов дефектов и вмещений, изменения дипольных моментов как на стадии деформации, так и при микро и макроразрушениях, особенно в момент нарушения целостности материала. В последних случаях часто наблюдаются даже разрядные явления. И если в лабораторных условиях были сразу предложены механизмы возникновения электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) при механическом воздействии на неметаллические материалы и даже созданы научные основы неразрушающего метода контроля механической прочности по параметрам ЭМЭ [3], то об источниках и механизмах появления импульсной литосферной составляющей электромагнитного поля единого мнения у исследователей не было. Предлагались различные модели механоэлектрических преобразований в земной коре [4],

* Василий Федорович Гордеев (gordeev@imces.ru); Сергей Юрьевич Малышков (msergey@imces.ru); Владимир Алексеевич Крутиков (urmant@mail.ru); Виталий Игоревич Поливач (polivach@imces.ru); Михаил Михайлович Кабанов (mike.kabanov@gmail.com); Сергей Николаевич Капустин (skm@imces.ru); Сергей Георгиевич Шталин (sersh1965@gmail.com); Константин Николаевич Пустовалов (const.pv@yandex.ru).

но ни одна из них не описывала в полной мере основные закономерности суточных и сезонных изменений ЕИЭМПЗ. Ни вариации приливных сил, оказывающих наиболее сильные деформационные воздействия на кору Земли, ни динамика других известных внешних полей не совпадают с суточными и сезонными изменениями параметров ЕИЭМПЗ. Назрела необходимость фундаментальных исследований с целью развития физической модели модуляции ЕИЭМПЗ литосферными процессами, и для решения этих задач в 2000 г. научная группа исследователей из ТПУ перешла в ИМКЭС СО РАН.

Источники и механизмы формирования ЕИЭМПЗ

В основу новой физической модели модуляции ЕИЭМПЗ литосферными процессами была взята оригинальная идея, предложенная Ю.П. Малышковым, объясняющая основные закономерности типичных суточных и сезонных вариаций литосферной составляющей ЕИЭМПЗ возможным воздействием внутреннего ядра Земли на литосферу изнутри, за счет эксцентричного смещения ядра Земли при ее вращении вокруг Солнца. Математическая обработка уже имеющихся к тому времени в научном коллективе результатов многолетних непрерывных натурных измерений интенсивности ЕИЭМПЗ позволила построить проекцию трассы смещения внутреннего ядра Земли на Северный полюс. Предложенная физическая модель хорошо объясняет и все известные в настоящее время неравномерности вращения Земли. Гипотеза об эксцентричном смещении ядра Земли и его воздействии на земную оболочку казалась фантастической, и соответствующая статья [5] была опубликована в 2009 г. лишь благодаря личной рекомендации академика Н.Л. Добрецова. Дальнейшее развитие информационно-измерительной сети наблюдений ЕИЭМПЗ и сейсмических событий, а также новые методы обработки сейсмических эффектов катастрофических землетрясений подтвердили [6], что твердое ядро Земли никогда не бывает в ее геометрическом центре и с течением времени направление вектора смещения меняется [7, 8].

Для оценки доли литосферной составляющей в структуре ЕИЭМПЗ были проведены комплексные атмосферно-литосферные исследования [9], когда в качестве поглощающего экрана от атмосферных источников электромагнитных полей использовались природные водоемы с различным уровнем минерализации воды. Исследованы особенности изменения атмосферно-электрических и метеорологических характеристик во время прохождения над пунктом исследования конвективной облачности фронтального и внутримассового происхождения и в периоды отсутствия возмущающих полей. Для интерпретации результатов дополнительно использовались синоптические карты, карты нефанализа и прогноза эволюции облачных образований, а также

данные спектрорадиометра MODIS (КА Terra, Aqua) и полученных на их основе термодинамических и оптических параметров облачности. Полученные метеорологические данные сопоставлялись с данными ближайшей к месту исследований (~10 км) метеорологической станции Шира.

Программа эксперимента предусматривала круглосуточный мониторинг фоновых вариаций ЕИЭМПЗ в районе проведения работ и измерение параметров ЕИЭМПЗ под поглощающими экранами. Для экранирования от атмосферного электричества регистраторы в герметичных радиопрозрачных контейнерах погружались на различные глубины в озерах с различной удельной проводимостью воды. В эксперименте использовался скин-эффект — уменьшение амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящей среды. Сравнивались значения атмосферной и литосферной составляющих ЕИЭМПЗ, зарегистрированные на суше, и соответствующие значения с ослабленной поглощающим электрическим экраном атмосферной составляющей.

Было экспериментально показано, что ослабление электромагнитного поля, вызванного грозовым разрядом в атмосфере, согласуется с затуханием, рассчитанным по уравнениям Максвелла для распространения электромагнитных волн в проводящих средах. В периоды отсутствия близких грозовых разрядов отношение интенсивности поля, зарегистрированного на вариационном регистраторе, к интенсивности поля под экраном не соответствует отношению, рассчитанному для чисто атмосферных источников. Экспериментальные данные подтвердили существенную долю литосферной составляющей в структуре ЕИЭМПЗ.

Метод ЕИЭМПЗ для мониторинга геологических процессов и геофизической разведки

Фундаментальные исследования имеют и большое прикладное значение. В ИМКЭС продолжают начатые в ТПУ работы по созданию технологий опережающего прогноза опасных геодинамических проявлений и новых методов геофизической разведки. Создан ряд многоканальных геофизических регистраторов для решения различных инженерных задач. Регистратор МГР-01 сертифицирован как средство измерений [10]. Поскольку в земной коре существует сложное пространственно-временное поле механических напряжений, для приема сигналов от максимально возможного числа природных источников импульсов в приборе используются несколько приемников поля. В базовом варианте МГР-01 содержит два канала измерения магнитной составляющей электромагнитного поля и канал измерения электрической составляющей. В зависимости от решаемых задач регистратор может быть оснащен дополнительным каналом и GSM-модемом, совмещенным с блоком управления питанием. Мо-

дем предназначен для передачи данных на сервер по GPRS-каналу. Регистраторы оснащаются внутренней батареей питания, позволяющей работать автономно не менее суток. Наличие встроенной батареи позволяет корректно завершить рабочие процессы микроконтроллера и закрыть файловую систему при отключении питания регистратора. Блок управления питанием предназначен для регулирования тока заряда встроенной батареи, ее защиты от перезаряда и переразряда. Дополнительное питание регистратора и зарядка встроенного аккумулятора может осуществляться при помощи внешнего источника питания с постоянным напряжением или внешней аккумуляторной батареи повышенной емкости.

Для приема магнитной составляющей ЕИЭМПЗ используются магнитные ферритовые антенны в направлениях север-юг и запад-восток, принимающие сигнал в диапазоне очень низких частот. Взаимно ортогональное расположение этих антенн позволяет получить диаграмму направленности системы, близкую к круговой. В качестве антенны для приема электрической составляющей ЕИЭМПЗ используется дифференциальный емкостной датчик, работающий в ближней зоне приема в диапазоне частот 500 Гц – 100 кГц. Предусмотрена возможность программного изменения настроек усилительных трактов и частоты регистрации, в том числе через удаленное соединение. Это позволяет быстро менять алгоритмы сбора и предварительной обработки данных. Файл зарегистрированных данных содержит календарную дату и текущее время, номер канала, число импульсов, пришедших на данный канал за один заранее заданный программно дискретный интервал времени, и амплитуду первого импульса, пришедшего на данный канал в данный интервал.

Для регистрации параметров ЕИЭМПЗ регистратор программно устанавливается в режим непрерывного мониторинга либо в режим полевых измерений для поиска структурных и литологических неоднородностей земной коры. В режиме непрерывного мониторинга данные накапливаются в энергонезависимой флэш-памяти регистратора и при наличии сети сотовой связи по заранее заданному расписанию передаются на HTTP-сервер для хранения и обработки.

Регистратор имеет встроенные часы реального времени. Привязка каждого измерения к текущему времени позволила разработать современную информационно-измерительную технологию геофизических исследований с использованием распределенной сети регистраторов, часть из которых регистрирует фоновые значения.

Мы уже отмечали, что в структуре ЕИЭМПЗ присутствует сигнал, не связанный с состоянием горных пород в точке наблюдений, и что интенсивность этих полей может сильно изменяться со временем. Нами был предложен алгоритм выделения пространственных аномалий ЕИЭМПЗ, связанных со свойствами грунтов в месте регистрации, из пространственно-временных вариаций с применением вариационных регистраторов поля. Одним или несколькими регистраторами выполняются измерения

параметров ЕИЭМПЗ по заранее заданным профилям в пределах исследуемой территории; один или несколько регистраторов устанавливаются стационарно в месте, не затронутом опасными геологическими процессами на расстоянии не более длины волны от объекта исследований (10–100 км). В качестве информативного признака при проведении геофизических работ используется коэффициент, отражающий свойства горных пород в месте регистрации, который рассчитывается по формуле

$$K = \begin{cases} N_m / N_r - 1, & \text{если } N_m \geq N_r; \\ 0 - N_r / N_m + 1, & \text{если } N_m \leq N_r, \end{cases}$$

где N_r – интенсивность ЕИЭМПЗ, зарегистрированная вариационным регистратором; N_m – интенсивность ЕИЭМПЗ, зарегистрированная маршрутным регистратором.

При таком способе обработки положительные и отрицательные аномалии в структуре ЕИЭМПЗ могут изменяться в одинаковом диапазоне с одинаковым коэффициентом пропорциональности. Несмотря на то, что приборное и методическое оснащение метода ЕИЭМПЗ для геофизической разведки и инженерно-геологических изысканий продолжает развиваться, предложенная технология уже сейчас применяется в промышленности. Метод используется для картирования активных геологических разломов и мест с возможными опасными геологическими процессами с целью обоснования мест строительства объектов атомной промышленности, оконтуривания месторождений углеводородов и руд. Метод включен в основную нормативно-разрешительную строительную документацию [11] для оценки трещиноватости и напряженно-деформированного состояния горных пород.

Как отмечалось ранее, метод ЕИЭМПЗ основан на регистрации сигналов ЭМЭ, которые зависят от свойств излучающего материала и воздействия на него. Поэтому предложенный метод можно использовать не только для картирования неоднородностей в земной коре, но и для мониторинга динамики литосферы различных масштабов. В настоящее время наиболее распространенное применение в промышленности получила система мониторинга НДС (напряженно-деформированного состояния) грунтов и прогноза экзогенных процессов. В 2010 г. для объединения данных измерений и обеспечения распределенного доступа пользователей к мониторингу и анализу была спроектирована и реализована автоматизированная система контроля геодинамических процессов (АСК-ГП). При проектировании системы были сформулированы следующие ключевые требования к программному решению.

1. *Надежность сбора данных.* Система должна использовать простейшие протоколы для сбора данных измерений с конечного оборудования. Необходимо обеспечить максимальную сохранность данных при возможных сбоях в каналах связи.

2. *Простота доступа к данным.* Доступ к данным и средствам мониторинга не должен требовать

специального клиентского программного обеспечения. Достаточно наличия у пользователя доступа в Интернет и интернет-браузера.

3. *Масштабируемость.* Система должна обеспечивать масштабируемость по нескольким параметрам – устойчивость к растущим объемам данных, простота модификации для включения новых версий измерительного оборудования, простота в добавлении нового функционала мониторинга и анализа данных, возможность разграничения прав доступа пользователей по доступному функционалу и совокупности видимых данных.

С учетом данных требований АСК-ГП разработана на платформе Java 2 EE +JBoss Application Server, хранение данных организовано в системе управления базами данных MySQL. Данные с измерительных приборов с помощью технологии IoT поступают на буферный ftp-сервер, откуда в автоматическом режиме с контролем ошибок импортируются информационной системой в базу данных [12].

Более 10 лет бесперебойной работы системы подтвердили правильность решений, принятых при проектировании этой архитектуры. В процессе эксплуатации информационная система АСК-ГП непрерывно развивалась и модифицировалась. Административный функционал системы был дополнен возможностями управления правами и ролями пользователей, средствами диагностики и управления параметрами оборудования, расширен функционал экспорта данных измерений, оптимизирована эффективность запросов к данным. Для улучшения качества мониторинга и обнаружения опасных геологических явлений в АСК-ГП был добавлен сравнительный анализ динамики измерений экспериментальных и реперной станций на основе коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Такой подход позволяет игнорировать расхождения в амплитуде измерений, если общая их динамика сохраняет согласованность с динамикой реперной станции. Также был разработан отдельный интерфейс для визуализации пространственно-разнесенной сети станций и наглядного мониторинга текущего состояния. Сеть станций отображается на географической карте (отдельно для каждого канала измерений). Вероятность развития опасного геологического процесса маркируется цветом фоновой поверхности вблизи соответствующей станции. Кроме просмотра текущего состояния сети оператор имеет возможность просмотра выбранного временного интервала измерений в режиме анимации для оценки динамики развития ситуации на наблюдаемом участке. В целом за более чем десятилетний период своего использования и развития информационная система АСК-ГП показала свою высокую надежность и эффективность, неоднократно позволив заранее предупредить о развитии опасных геологических процессов.

Заключение

Несмотря на то, что исследования литосферной составляющей ЕИЭМПЗ начаты относительно недавно, к настоящему времени достаточно полно опи-

саны основные источники и механизмы появления этих полей. Разработанная аппаратура и пассивная радиоволновая информационно-измерительная технология мониторинга динамических процессов позволяют изучать процессы глобального масштаба, вплоть до исследований внутреннего строения Земли, и прогнозировать мелкомасштабные экзогенные процессы. Поскольку электромагнитная эмиссия зависит не только от электрических, но и от физико-химических и структурных свойств горных пород, был реализован метод геофизической разведки, сочетающий в себе достоинства электромагнитных и сейсмических методов разведки. С учетом актуальности мониторинга криогенных процессов в многолетнемерзлых грунтах в условиях глобального потепления климата в ИМКЭС СО РАН формируется комплексная научно-исследовательская программа адаптации разработанных методов геофизической разведки для криологических исследований.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (проект № 121031300155-8).

1. Воробьев А.А. О возможности электрических разрядов в недрах Земли // Изв. АН СССР. Сер. геология и геофизика. 1970, № 12. С. 3–14.
2. Матов 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.
3. Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Чухлов В.Л., Фурса Т.В., Биллер В.К., Елисеев В.П. Электромагнитная эмиссия диэлектрических материалов при статическом и динамическом нагружении // ЖТФ. 1994. Т. 64, вып. 4. С. 57–67.
4. Электромагнитные предвестники землетрясений / М.А. Садовский (ред.). М.: Наука, 1982. 88 с.
5. Малышков Ю.П., Малышков С.Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра земли // Геология и геофизика. 2009. № 2. С. 152–172.
6. Yang Y., Song X. Origin of temporal changes of inner-core seismic waves // Earth Planet. Sci. Lett. 2020. V. 541. P. 116267.
7. Malyshev Yu.P., Malyshev S.Yu., Gordeev V.F., Shtalin S.G., Polivach V.I., Krutikov V.A., Zaderigolova M.M. Earth's natural electromagnetic noises in a very-low frequency band // Electromagnetic Fields: principles, engineering applications and biophysical effects / Myung-Hee Kwang, Sang-Ook Yoon (eds.). New York: Nova Science Publishers, 2013. P. 1–87.
8. Malyshev Yu.P., Malyshev 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 // Horiz. World Phys. 2015. V. 283. P. 43–128.
9. Malyshev S.Y., 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 // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2017. V. 189, N 012023. DOI:10.1088/1757-899X/189/1/012023.
10. Шталин С.Г., Гордеев В.Ф., Малышков С.Ю., Поливач В.И., Малышков Ю.П. Регистратор импульсных электромагнитных полей для мониторинга геоди-

- намических процессов и геофизической разведки // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 32–37.
11. СП-11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. М.: ПНИИИС Госстроя России, 1997. 42 с.
12. Кабанов М.М., Капустин С.Н., Колтун П.Н., Мулованцев П.Б. Интернет портал системы контроля геодинамических процессов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2011. Т. 1, Ч. 1. С. 138–142.

V.F. Gordeev, S.Yu. Malyshkov, V.A. Krutikov, V.I. Polivach, M.M. Kabanov, S.N. Kapustin, S.G. Shtalin, K.N. Pustovalov. Development of passive radiowave information-measuring technique for monitoring dynamic lithosphere–cryosphere–atmosphere interaction processes.

Results of long-term study of the Earth's natural pulsed electromagnetic field in a very low frequency band in different regions are presented. Laboratory and field experiments show a substantial part of the lithosphere component in the field structure, which allows robust instrumental monitoring of spatial lithospheric structures and irregularities and parameters of dynamic lithosphere–cryosphere–atmosphere interaction processes. The hardware, software, and processing techniques developed are briefly described, which allow a wide variety of geophysical research under conditions of distorted electromagnetic fields.