



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)



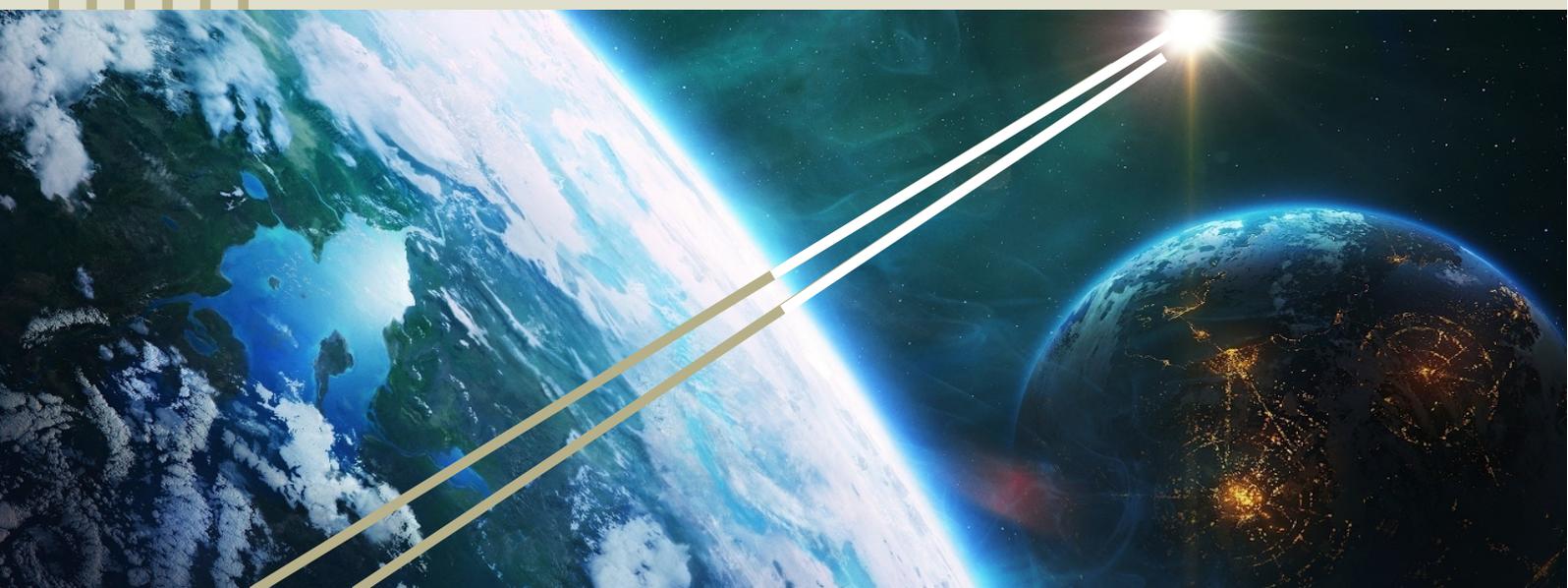
ИНСТИТУТ ЗЕМНОГО
МАГНЕТИЗМА, ИОНОСФЕРЫ
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ
РАДИОВОЛН
имени Н.В. Пушкова РАН

Научно-практический семинар

**«ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО
ПОЛЯ ЗЕМЛИ КАК ФАКТОР
ПРОГРЕССА НАЦИОНАЛЬНОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ РОССИИ»**

12 мая 2022

СБОРНИК ДОКЛАДОВ



Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
имени Н.В. Пушкова РАН

**Научно-практический семинар
«ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ
КАК ФАКТОР ПРОГРЕССА
НАЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИИ»**

12 мая 2022

Сборник докладов

Санкт-Петербург
2022

УДК 550.38(08)+550.380.8108

ББК Д214.3я43+3222.1-5я43

И88

И88 «Исследование магнитного поля Земли как фактор прогресса национальной безопасности России»: сб. докладов научно-практического семинара. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПбФ ИЗМИРАН. 2022. – 74 с.

На научно-практическом семинаре «Исследование магнитного поля Земли как фактор прогресса национальной безопасности России» рассматривались вопросы магнитного поля Земли на магнитном судне, поиска подземных приемников электромагнитных волн, подземных и подводных приемников электромагнитных волн как фактор совершенствования для связи и управления, магнитометры как основа выполнения системных исследований электромагнитного поля Земли, а также использования беспилотных летательных объектов для поиска источников аномалий электромагнитного поля Земли.

Актуальные вопросы проектирования элементов несущих конструкций радиоэлектронной аппаратуры для измерения магнитного поля Земли

П. Н. Афонин

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
pnafonin@etu.ru

Е. А. Лебедева

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
lenlea28@gmail.com

Аннотация. В работе рассматриваются аспекты совершенствования проектирования элементов несущих конструкций радиоэлектронной аппаратуры для измерения магнитного поля Земли с учетом потенциала кафедры Прикладной механики и инженерной графики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» и текущих задач импортозамещения.

Ключевые слова: *конструирование, 3D-моделирование, несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры, магнитное поле Земли, расчет на прочность, напряженно-деформированное состояние элементов конструкций, биомеханика, инженерная графика*

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие научно-технического прогресса в области средств измерения параметров различных физических полей определило формализацию стека технических и эксплуатационных характеристик соответствующей аппаратуры, включая показатели прочности, надежности, устойчивости ее несущих элементов, проектирование и расчет которых, с учетом конфигурационных особенностей и требований надлежащей привлекательности с позиций промышленного дизайна, должен осуществляться с использованием соответствующих САД систем. Постановка государственной задачи импортозамещения, требует актуализации исследований в области разработки конструкторских решений, в том числе, в отношении несущих конструкций радиоэлектронной аппаратуры для измерения магнитного поля Земли, что и определило актуальность настоящего исследования, целью которого является повышение эффективности проектирования элементов несущих конструкций радиоэлектронной аппаратуры для измерения магнитного поля Земли, для достижения которой были поставлены следующие задачи:

- анализ потенциала Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» (далее – Университет) в части реализации конструкторской подготовки студентов различных специальностей и направлений подготовки;
- разработка предложений по совершенствованию существующей практики проектирования

элементов несущих конструкций радиоэлектронной аппаратуры для измерения магнитного поля Земли.

II. КОНСТРУИРОВАНИЕ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ В СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Университет, осуществляя комплексную подготовку инженеров в области приборостроения, робототехники одной из ключевых задач учебного процесса видит в формировании компетенций по использованию современных средств 3D проектирования сложных конструктивных элементов, таких как КОМПАС-График, расчету их механических характеристик в среде Ansys в условиях как статических, так и динамических нагрузок. Реализация подготовки осуществляется силами профессорско-преподавательской корпорации кафедры Прикладной механики и инженерной графики, образованной в 1977 г. на базе старейших в Университете кафедр: теории механизмов и машин, деталей машин; основ конструирования механизмов и инженерной графики. В разное время на кафедре работали выдающиеся ученые и педагоги, внесшие большой вклад в развитие науки и техники: профессор Н.Н. Митинский (1899–1911) – один из инициаторов и участников электрификации железных дорог; профессор С.П. Тимошенко (1911–1917) известнейший ученый в области теории упругости, сопротивления материалов и строительной механики; академик Н.И. Мухомеловичи, чл.-корр. АН СССР; Г.В. Колосов и профессор С.Г. Лехницкий, внесшие большой вклад в отечественную науку о прочности; профессор А.А. Пиковский (1959–1967) – автор монографии по расчетам стержневых систем; профессор К.В. Соляник-Красса (1959–1971) – специалист в области пространственных задач теории упругости; профессор Н.Н. Разумовский – автор книг по электрическим измерительным приборам; профессор Ю.Д. Первицкий – специалист в области конструирования и расчета механизмов, приборов и автоматических систем; профессора П.И. Бегун и О.П. Кормилицын (учениками которых являются и авторы настоящей статьи) заложили фундамент нового направления деятельности кафедры – биомеханики, в рамках которого подготовлена замечательная плеяда профильных кандидатов и докторов наук, опередивших своими научными открытиями и новыми практическими результатами

ученых других отечественных и зарубежных школ, создавших учебно-методический базис для подготовки специалистов в области медицинского приборостроения в России и за ее пределами [5, 6]. Неизменной особенностью деятельности кафедры было стремление обеспечить максимальный стык между задачами учебного процесса и потребностями ведомственных и промышленных партнеров – традиционно принимающих на работу выпускников Университета.

Несмотря на всю инвариантность задач проектирования радиоэлектронной аппаратуры, преподаваемые на кафедре дисциплины:

- Инженерная компьютерная графика,
- Прикладная механика,
- Конструирование и технология средств приборостроения,

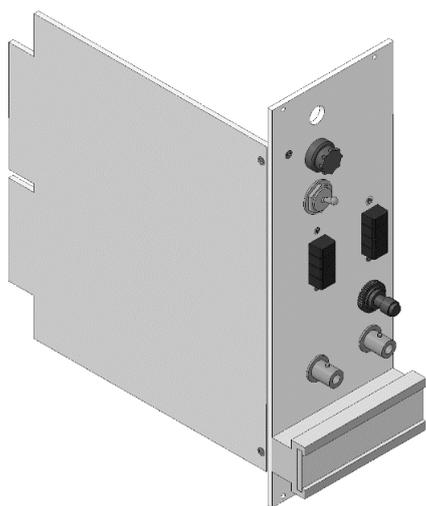


Рис. 1. Пример выполнения учебного задания «Проектирование модуля радиоэлектронной аппаратуры»

Несмотря на типичность решаемых при конструировании задач, специфические особенности реальной практики могут определять наличие научной проблематики [1, 7, 2, 3], рассмотрение которой становится важным аспектом совершенствования учебного процесса на кафедре Прикладной механики и инженерной графики Университета.

Проектирование и расчет элементов несущих конструкций радиоэлектронной аппаратуры для измерения магнитного поля Земли является факультативной задачей, решение которой проводится в рамках действующего при кафедре студенческого научного общества. Особенности задачи

- Автоматизация проектирования и дизайн приборов и систем,

имеют свои особенности и обеспечивают максимальную адаптацию тематической наполненности расчетно-графических задач, контрольных и курсовых работ применительно к потребностям будущей профессиональной деятельности обучающихся. В частности, в рамках подготовки специалистов медицинского приборостроения обеспечивается расчет чувствительных элементов инвазивной и неинвазивной аппаратуры контроля состояния человека, при подготовке студентов радиотехнического факультета проводится 3D проектирование (рис. 1, 2) и расчет прочностных характеристик модулей радиоэлектронной аппаратуры, при подготовке студентов факультета электротехники и автоматики предусмотрен расчет конструктивных элементов манипуляторов-роботов.

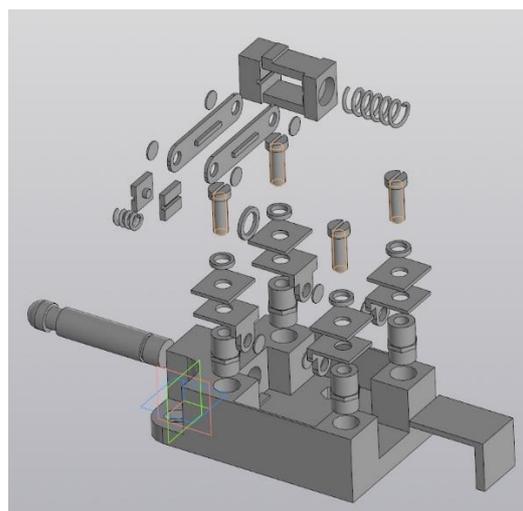
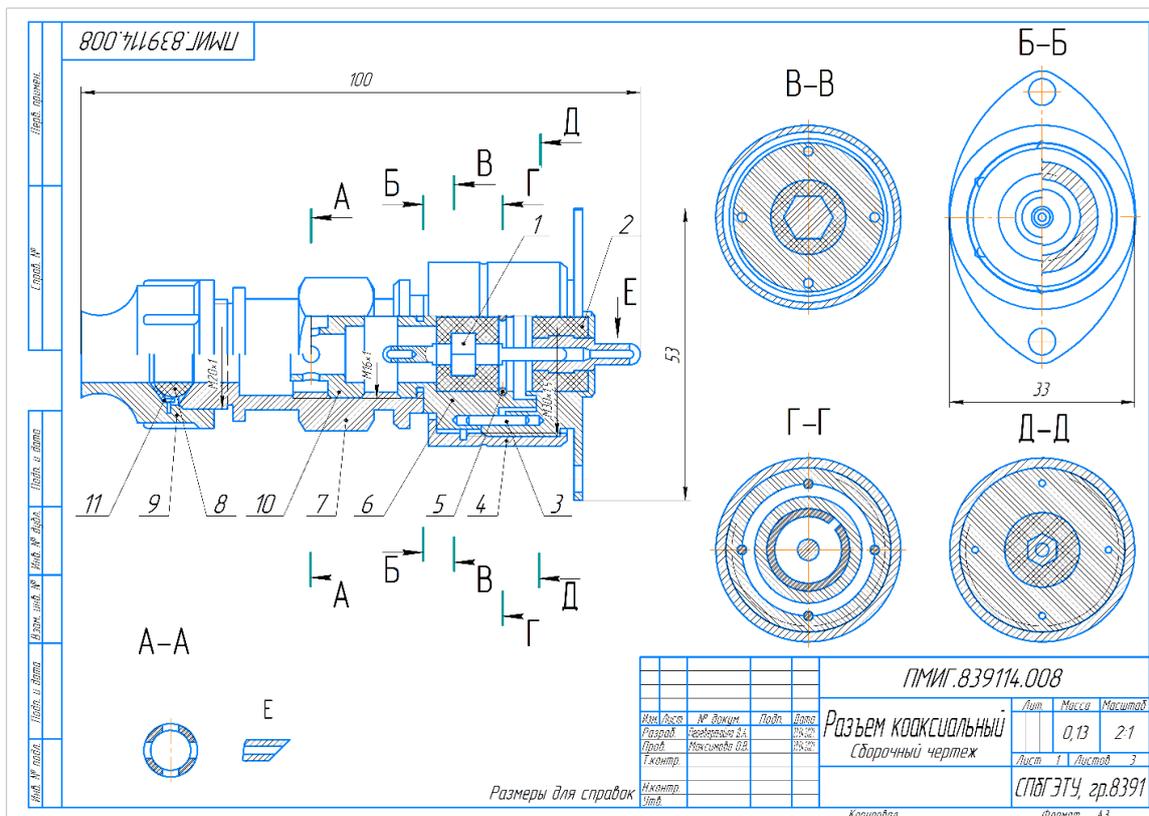
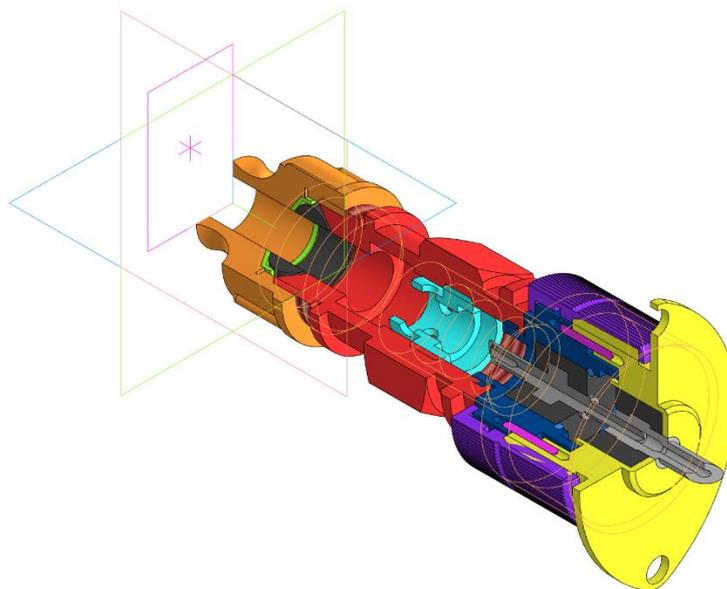


Рис. 2. Пример выполнения учебного задания «Проектирование конструкции переключателя»

проектирования указанной аппаратуры является принятие во внимание особенностей условий ее эксплуатации, а также требований к потенциальному размещению на современных беспилотных летательных аппаратах, что определяет существенные ограничения ее массогабаритных характеристик, а также требования по виброударопрочности и виброудароустойчивости. Вместе с тем, отличительной особенностью задач, связанных с проектированием аппаратуры для измерения магнитного поля Земли является необходимость одновременной разработки тренажерных комплексов по ее использованию, в том числе в рамках реализации технологии дополненной реальности [4].



а



б

Рис. 3. Пример выполнения учебного задания «Разработка конструкции разъема коаксиального»: а – сборочный чертёж; б – 3D модель

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, следует считать, что Университет обладает надлежащим опытом проектирования несущих конструкций радиоэлектронной аппаратуры различного типа и потенциал кафедры Прикладной механики и инженерной графики может быть задействован для решения прикладных задач, связанных с проектированием элементов несущих конструкций радиоэлектронной аппаратуры для измерения

магнитного поля Земли. Совершенствование проектирование такого рода аппаратуры связывается с решением задачи моделирования напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, оптимизацией состава аппаратуры с учетом задач импортозамещения, а также разработкой тренажерно-моделирующих комплексов, использующих технологии дополненной реальности.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность своим учителям – профессору Олегу Павловичу Кормилицину и светлой памяти профессору Петру Иосифовичу Бегуну, вложившим неоценимый вклад в развитие и становление школы прикладной механики и биомеханики в Университете и в России в целом, а также всему коллективу кафедры Прикладной механики и инженерной графики Университета, обеспечивающему контроль за становлением молодых ученых-исследователей Университета, разрабатывающему упреждающие методики преподавания инженерной графики с учетом стратегических задач предприятий индустриальных партнеров Университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Акимов А.А., Зуев В.Д., Козин Р.Р. Особенности проектирования и изготовления малогабаритных подстроечных резисторов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2020. Т. 2. С. 62-63.
- [2] Анисимов В.Г. и др. Модель и метод оптимизации решений при управлении развитием технических средств таможенного контроля / В.Г.Анисимов, Е.Г.Анисимов, П.Н.Афонин, М.Р.Гапов, Т.Н.Сауренко // В сборнике: Таможенные чтения – 2017. Современная наука и образование на страже экономических интересов Российской Федерации. сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием : В 3 т. 2017. С. 11-21.
- [3] Афонин Д.Н., Афонин П.Н. Совершенствование приборов и методов идентификации скрытых пороков древесины при таможенном контроле // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2 (45). С. 17.
- [4] Афонин П.Н. и др. Тренажерно-моделирующие комплексы формирования навыков работы с информационно-техническими средствами таможенного контроля / П.Н. Афонин, Д.Н. Афонин, В.А. Зубов, Н.Ю. Яргина // Современное образование: содержание, технологии, качество. 2011. Т. 2. С. 120-121.
- [5] Бегун П.И., Афонин П.Н. Моделирование в биомеханике: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. дипломир. специалистов "Биомед. техника" и направлению подгот. бакалавров и магистров "Биомед. инженерия". Москва, 2004.
- [6] Вихров С.П. и др. Биомедицинское материаловедение. ч. 1. Общие свойства материалов и их совместимость с биологическими средами / С.П. Вихров, Т.А. Холомина, П.И. Бегун, П.Н. Афонин: учеб. пособие. Саратов, 2003.
- [7] Сафонов А.Л. Автоматизация проектирования электрических соединителей на основе формализации и типизации проектных процедур: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12. / Брянский государственный технический университет. Брянск, 2010. 219 с.

Особенности возбуждения электромагнитного поля в диапазоне менее 100 Гц заземленным или заводненным горизонтальным излучателем

П. Е. Терещенко^{1,2}

¹Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн

им. Н.В.Пушкова Российской академии наук;

²Санкт-Петербургский научный центр РАН
tereshchenko@gmail.com

Аннотация. Диапазон сверхнизкочастотных (СНЧ) и крайненизкочастотных (КНЧ) электромагнитных волн используется в управлении заглубленными в воду или землю объектами, а так же в геофизических исследованиях и геологоразведке. В работе приведены результаты нескольких экспериментов по генерации и приему магнитного поля в низкочастотном диапазоне (0.3–90 Гц). Показано влияние ионосферы, литосферы и других внешних факторов на распространение этих волн.

Ключевые слова: СНЧ, КНЧ, распространение радиоволн, ионосфера, магнитное поле, проводимость

I. ВВЕДЕНИЕ

Исследуемый в работе диапазон сверхнизкочастотных (СНЧ) и крайненизкочастотных (КНЧ) электромагнитных волн (30–300 Гц, 3–30 Гц, в соответствии с международным регламентом радиосвязи) используется в управлении заглубленными в воду или землю объектами, а так же в геофизических исследованиях и геологоразведке.

Стимулирующим посылом для применения активных крайненизкочастотных и сверхнизкочастотных сигналов в различных областях послужили испытания ВМС США в конце 1950-х годов. Исходя из предположения, что чрезвычайно низкочастотные радиоволны могут глубоко проникать в океаны и обеспечивать связь с глубоководными атомными подводными лодками без их приближения к поверхности, было рассмотрено несколько различных концепций подобной системы управления. В результате был реализован проект «Сангвин» – система связи с двумя передатчиками и антенной системой над землей. В настоящее время по экономическим и политическим причинам комплекс законсервирован с 2004 года.

В СССР существовала своя программа СНЧ связи с подводными объектами. В 1972 было принято решение о создании на Кольском полуострове СНЧ комплекса «Зевс». Проведенные научно-исследовательские работы позволили выбрать область для размещения антенн в месте, где Земная кора обладает крайне низкой проводимостью в 10^{-5} См/м до глубин в 10–15 км, что обеспечивает высокий магнитный момент источника. Комплекс состоит из двух генераторов, нагруженных на две горизонтальные параллельные антенны вблизи от западных заземленных концов. Антенны имеют длину около 60 км и расположены с востока на запад (EW).

Передатчик работает в диапазоне от 20 до 200 Гц и обеспечивает ток в антеннах от 200 до 300 А [1]. В настоящее время находится в эксплуатации ВМФ.

Также интерес к разработке комплексов передачи в диапазоне КНЧ-СНЧ проявляют Китай и Индия, однако эти проекты засекречены и достоверной информации об их реализации не удалось обнаружить.

Помимо постройки стационарных КНЧ-СНЧ комплексов управления подводными и подземными объектами с монохроматическим низкочастотным сигналом, начиная с середины 60-х годов в США, а позднее в Канаде, Южной Африке и СССР проводились эксперименты по импульсной генерации КНЧ полей для исследования строения литосферы с помощью промышленных ЛЭП.

В исследованиях на территории США с помощью линий электропередач длиной от 100 до 200 км с током 200–300 А генерировались электромагнитные поля в диапазоне 0.02–5 Гц, что позволило обнаружить аномалии проводимости на глубинах до 70 км. Позднее сходные методы на более короткой линии в 37 км были использованы в Канаде, приведя к построению трехслойной модели литосферы до глубины в 25 км. Подобные исследования велись вплоть до конца 1970-х годов, различаясь только длиной используемых линий, которые достигали 600 км.

Однако результаты вышеуказанных зондирований характеризуются значительным разбросом данных, в том числе из-за несовершенства приемной аппаратуры, обладающей невысокой чувствительностью. Поэтому дальнейшее развитие подобных исследований связано с увеличением силы тока. Так в Южной Африке в течение 1973–1975 годов была проведена серия генераций с током до 3000 А, а в СССР были проведены исследования на линии «Волгоград-Донбасс» с токами до 1400 А.

С 1976 годов по 1990 год на Кольском полуострове в рамках эксперимента «Хибины» велось зондирование литосферы при помощи уникального оборудования – заводненного импульсно магнито-гидродинамического (МГД) генератора. Заводнение МГД генератора на два залива по разные стороны полуострова Рыбачий позволило использовать акваторию заливов и Баренцева моря в качестве естественного морского контура. В результате в нем создавался ток до 22 кА, но 90 % энергии импульса приходилось на частоты меньше

0.25 Гц. По результатам этих экспериментов была построена карта проводимости Кольского полуострова, выявлены основные блоки, с отличающейся на порядки проводимостью, обнаружены токопроводящие каналы, в дальнейшем интерпретированные как разломы в Земной коре.

Несмотря на успехи импульсного зондирования, работать с монохромным сигналом лучше, так как проще контролировать распределение тока как пространственное, так и частотное. Поэтому в середине 90-х, когда в рамках конверсии стало возможным использовать упомянутый выше комплекс «Зевс» для геофизических целей, был проведен ряд исследовательских работ с использованием КНЧ-СНЧ полей.

В частности, было выявлено влияние лунных приливов на проводимость литосферы, проведено частотное электромагнитное зондирование Земной коры, показано влияние ионосферы на КНЧ поле вблизи источника, экспериментально обнаружено увеличение вертикальной компоненты магнитного поля на разломах в литосфере [2, 3], проведено электромагнитное зондирование Кольского залива [4]. Рассмотрено влияние солнечного затмения на распространение СНЧ поля [5].

Результат развития приемной и передающей аппаратуры, а также опыт конверсионного использования источника «Зевс», привели к тому, что в двухтысячных годах стало возможно использовать достаточно компактные генераторы синусоидального тока, нагруженные на ЛЭП, электромагнитное поле от которых более чем на порядок превышает естественный электромагнитный шум на расстояниях до 1000 км. В результате были проведены эксперименты FENICS-2007 и FENICS-2009 по глубинному электромагнитному зондированию литосферы Фенноскандинавского щита с использованием двух взаимноортогональных ЛЭП. Полученный в них опыт был использован для исследований литосферы и ионосферы в ходе экспериментов FENICS-2014 и FENICS-2019 и нашло отражение в данной работе.

Характерной особенностью рассматриваемого диапазона электромагнитных волн является их глубокое проникновение в литосферу и ионосферу. Это создает преимущество в их использовании в задачах дистанционного зондирования окружающей среды, но, с другой стороны, в настоящее время в силу малой изученности параметров внешней ионосферы и глубинных слоев литосферы затрудняет решение задачи о возбуждении и распространении КНЧ-СНЧ поля.

Поэтому в настоящее время перед исследователями стоит как задача развития теории прямых задач, так и проведение натурных экспериментов для подтверждения теоретических представлений. Следует отметить, что имеются две характерные области в пространстве, связанные с возбуждением и распространением низкочастотных волн. Это область вблизи передатчика, где формируется поле, и влияние ионосферы в которой не является определяющим, и волновая зона на расстоянии от излучателя более двух высот эквивалентного волновода, где более ярко проявляется структура ионосферы.

Для увеличения дальности распространения электромагнитного поля антенны стационарных КНЧ-СНЧ излучателей располагают в областях с крайне низкой проводимостью литосферы, где величина скин-слоя в КНЧ диапазоне может быть сопоставима с высотой ионосферы. Поэтому на расстояниях меньших или сравнимых с высотой волновода неприменимы импедансные граничные условия и для описания поля требуется решать строгую электродинамическую задачу. На небольших расстояниях, значительно меньших радиуса Земли, можно пренебречь сферичностью волновода и рассматривать задачу в плоском приближении.

Вычисление электромагнитного поля, возбуждаемого источником на границе раздела между двумя полупространствами с разной проводимостью, в удобном для использования виде, было предложено В. А. Фоком. В дальнейшем эта работа получила развитие и послужила обоснованием импедансного подхода в задачах электроразведки. Для обобщения на неоднородные среды обычно используется метод возмущений. При этом считается, что влиянием ионосферы на расстояниях меньших или сравнимых с высотой эквивалентного волновода можно пренебречь.

Что касается волновой зоны, то Р. R. Bannister разработал в рамках импедансного подхода теорию распространения радиоволн в волноводе Земля-ионосфера в диапазоне СНЧ, которая затем была обобщена J. P. Casey. В середине 90-х годов были начаты теоретические работы в КНЧ диапазоне. В. В. Кирилловым проведено обобщение теории телеграфного уравнения на КНЧ диапазон.

При помощи метода телеграфного уравнения были исследованы частные модельные задачи, учитывающие сферичность Земли, гиротропию и неоднородность ионосферы, но не получено решение, одновременно учитывающее все указанные свойства среды. Кроме того в методе имеются ограничение на минимальное расстояние от источника, не учитываются реальная проводимость литосферы на больших глубинах, а также структура проводимости ионосферы, особенно в высоких широтах, но в высоких широтах.

II. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Целью данной работы является изложение теоретических и экспериментальных исследований возбуждения и распространения электромагнитных полей КНЧ-СНЧ диапазона, генерируемых горизонтальным источником в волноводе Земля-ионосфера, включающие натурные измерения полей и построение теории, объясняющей результаты проведенных экспериментов по генерации и приему полей в диапазоне 0.2–90 Гц.

В первом эксперименте [5] исследуется сверхнизкочастотное поле заземленного горизонтального электрического диполя на высокоширотной субмеридиональной трассе с протяженностью до 1000 км. В отличие от большинства предшествующих работ, рассмотрено распространение волн поперёк оси диполя, когда основной компонентой магнитного поля является радиальная.

По измерениям поля на расстоянии менее трёх высот ионосферы найдена частотная дисперсия проводимости земли под источником, определяющая коэффициент возбуждения волновода Земля-ионосфера. Типичные параметры распространения сверхнизкочастотных волн уточнены с учётом специфики используемой в эксперименте трассы. Показана важность учёта проводимости Земли при распространении излучения вдоль низкопроводящих областей. Отмечена теоретическая возможность определения фазовой скорости волны по отношению измеренных компонент магнитного поля на больших расстояниях.

Установлено, что в дневное время возможен немонотонный характер зависимости амплитуды от частоты. В ночное время аналогичные осцилляции объясняются специфической структурой профиля электронной концентрации во внешней ионосфере. Просачивание КНЧ-волн во внешнюю ионосферу днем возможно в высоких широтах благодаря наличию главного ионосферного провала, который не описывается имеющимися эмпирическими моделями среднеширотной ионосферы. Поэтому при высокоширотном расположении источника или трассы распространения осцилляции импеданса ионосферы и изменения амплитуды поля с частотой могут возникать и в дневное время. Таким образом, более высокая чувствительность КНЧ-волн (по сравнению с СНЧ) к изменениям во внешней ионосфере открывает хорошие возможности использования этого диапазона в исследованиях околоземного пространства.

Второй эксперимент [6] посвящен наблюдениям за распространением искусственных радиоволн с частотой 82 Гц в волноводе Земля-ионосфера во время солнечного затмения на частично и полностью затененных трассах протяженностью 450–1200 км. Возбуждение контролировалось путем синхронных измерений поля вблизи передатчика, исключающих влияние ионосферы. Обнаружена вариация амплитуды поля в удаленных точках, близкая по времени к проходящему затмению. Особенности вариаций связаны также с динамикой угла возвышения Солнца. Предварительный анализ показывает, что изменения структуры нижней ионосферы во время затмения могут качественно сводиться к уменьшению эффективной высоты отражения СНЧ-волн. Наблюдаемые эффекты показывают реакцию распространяющегося поля на изменения структуры ионосферной стенки волновода и впервые наблюдались в этом частотном диапазоне во время солнечного затмения.

Третий эксперимент [2] направлен на изучение изменения фазы сверхнизкочастотного магнитного поля на разломной тектонике. Были измерены фазы трех компонент напряженности магнитного поля мощного контролируемого источника излучения сверхнизкочастотного диапазона вдоль двух ортогональных направлений на разломной тектонике. В ходе эксперимента обнаружены резкие изменения фазы величиной около 180° между некоторыми точками измерения. Установлена их связь с токопроводящими геологическими разломами и, соответственно, возможность локализации таких разломов.

В четвертом и пятом эксперименте проводилось электромагнитное зондирование мощным удаленным источником Кольского залива Баренцова моря.

В первом из них [7] сравнивались результаты одновременных исследований электромагнитных шумов на дне Кольского залива и на острове вблизи точки погружения аппаратуры, а также в обсерватории, расположенной на значительном расстоянии от места измерения в заливе. Показано влияние разломной тектоники на структуру естественного магнитного поля, приводящее к усилению его вертикальной составляющей в заливе.

Во втором натурном эксперименте [4] сигналы на нескольких частотах порядка десятков Гц от удаленного мощного сверхдлинноволнового передатчика были зарегистрированы в шести точках дна на профиле, пересекающем Кольский залив. Несмотря на то, что по техническим причинам не в каждой точке все шесть компонент были успешно записаны, в целом, качество экспериментальных данных оказалось вполне пригодным для интерпретации.

В результате априорная геоэлектрическая модель района Кольского залива, построенная на основе обобщения предшествующих геолого-геофизических данных, в частности, на данных наземного магнитотеллурического зондирования и магнитотеллурического профилирования, привела к величинам полей далеким от экспериментально измеренных. Однако пошаговая модификация исходной модели привела к вполне удовлетворительному совпадению полей. Результирующая модель позволяет внести коррективы в имеющиеся региональные геологогеофизические представления, особенно касающиеся разломной тектоники.

В шестом [8] и седьмом эксперименте [9] исследовались особенности возбуждения волн крайненизкочастотного и более низкого частотных диапазонов в волноводе Земля-ионосфера.

В результате рассмотрен вопрос о возбуждении электромагнитного поля диапазона КНЧ и более низких частот в ближней зоне в волноводе Земля-ионосфера. Экспериментальные исследования показали наличие вариаций амплитуды и поляризационных характеристик поля в нижней части КНЧ диапазона и на более низких частотах в различных геофизических условиях при отсутствии вариаций в диапазоне СНЧ. Эти особенности поведения поля подтверждены теоретическими расчетами, показывающими, что при низкой проводимости земли влияние ионосферы в ближней зоне может быть заметным.

Полученные результаты следует принимать во внимание в задачах глубинного зондирования Земли и мониторинга состояния ионосферы с применением контролируемых источников, в особенности, при работах на экстремально низких частотах в областях с низкой проводимостью Земли.

Далее рассмотрено влияние ионосферы на возбуждение волн крайненизкого и более низкого частотного диапазона контролируемым источником в волноводе Земля-ионосфера. Описан эксперимент, выполненный на Кольском полуострове, и приведены

результаты измерений поля в диапазоне частот 0.4–95 Гц. Выявлен немонотонный характер изменения магнитного поля с частотой. Показано, что вариации поля связаны состоянием ионосферы и зависят от геомагнитной активности. Обсуждается важность влияния внешней ионосферы на структуру исследуемого поля.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено сравнение экспериментальных данных с теоретически ожидаемыми для объяснения изменения фазы сверхнизкочастотного магнитного поля на разломной тектонике, влияния ионосферы и структуры литосферы на амплитуду низкочастотного магнитного поля, а также на поляризационные характеристики низкочастотного магнитного поля при блочной горизонтально неоднородной литосфере.

Впервые теоретически и экспериментально оценено влияние ионосферы на КНЧ поле на расстояниях, не превышающих или сопоставимых с высотой эквивалентного ионосферного волновода. Эти результаты показали влияние ионосферы в КНЧ диапазоне на поле на расстояниях, не превышающих или сопоставимых с высотой эквивалентного ионосферного волновода.

Оценена эффективность использования активных источников низкочастотных сигналов для исследования сложных, включающих разломы, геологических структур (на примере района Кольского залива). Исследовано поведение КНЧ-СНЧ поля в волновой зоне и влияние на его структуру среды, образующей волновод.

Впервые в практику исследований с активным крайненизкочастотным сигналом введены поляризационные измерения, эффективно демонстрирующие влияние крупномасштабных неоднородных образований в литосфере на

поляризационные характеристики горизонтальной компоненты магнитного поля.

Результаты выполненных экспериментов показали, что низкочастотные электромагнитные поля могут быть эффективно использованы как для изучения строения литосферы, так и ионосферы (нижней и внешней).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Велихов Е.П. [и др.] Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ-диапазона // Докл. РАН. 1994. Т. 338, No 1. С. 106–109.
- [2] Терешенко Е.Д. [и др.] Влияние разломной тектоники на структуру естественного электромагнитного поля в Кольском заливе // Вестник Кольского Научного Центра РАН: Кольский научный центр РАН (Апатиты). 2013. 3 (14). С. 34–39.
- [3] Терешенко Е.Д., Терешенко П.Е., Сидоренко А.Е. Поляризационные характеристики КНЧ–СНЧ магнитного поля, возбуждаемого линейным вибратором // Наука и технологические разработки. Москва, 2020. 2 (99). С. 5–17.
- [4] Grigoryev V. [et al.] Preliminary Results of Marine Electromagnetic Sounding with a Powerful, Remote Source in Kola Bay off the Barents Sea // International Journal of Geophysics. 2013. Vol. Article ID 160915. P. 1–16.
- [5] Терешенко Е.Д. [и др.] Немонотонная амплитудно-частотная зависимость магнитного поля контролируемого наземного КНЧ-источника в дневное время // Вестник Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 9, No 3. С. 104–110.
- [6] Tereshchenko E.D. [et al.] Effect of the total solar eclipse of 20 march 2015 on the elf propagation over high-latitude paths [Text] // Geophysical Research Letters. United States, 2015. Vol. 42, no. 17. P. 6899–6905.
- [7] Терешенко Е.Д. [и др.] Влияние разломной тектоники на структуру естественного электромагнитного поля в Кольском заливе // Вестник Кольского Научного Центра РАН: Кольский научный центр РАН (Апатиты). 2013. 3 (14). С. 34–39.
- [8] Терешенко Е.Д., Терешенко П.Е., Сидоренко А.Е. Поляризационные характеристики КНЧ–СНЧ магнитного поля, возбуждаемого линейным вибратором // Наука и технологические разработки. Москва, 2020. 2 (99). С. 5–17.
- [9] Tereshchenko P.E. Effect of the Ionosphere on the Controlled-Source Field in the Frequency Range Between 0.4 and 95 Hz // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2022. T. 21, No 1. С. 208–211.

Применение геоинформационной технологии для мониторинга и оценки параметров окружающей среды

А. А. Минина¹, Е. Н. Жданова²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹aaminina@etu.ru, ²enzhdanova@etu.ru

Аннотация. Описывается актуальность применения геоинформационной технологии для обеспечения оперативной достоверной информации при изменениях параметров окружающей среды, в том числе электромагнитного поля Земли. Приведены особенности геофизической картографии как один из подходов визуализации информации. В докладе представлены реализованные проекты в области геоинформационных систем кафедры информационно-измерительных систем и технологий.

Ключевые слова: геоинформационные системы; магнитное поле Земли; окружающая среда; геофизическая картография

I. ВВЕДЕНИЕ

Всё чаще проблема корректной организации и проведения мониторинговых исследований существенно актуализируется, и данные о состоянии природной среды все больше используются в различных сферах деятельности. Эта информация нужна: в повседневной жизни людей – для обеспечения нормальной функциональной активности; при деятельности в чрезвычайных обстоятельствах – для прогнозов потенциально опасных явлений окружающей среды. Важно отметить, что изменения (трансформации) в состоянии среды обитания, особенно в последние десятилетия происходят и под воздействием техногенных процессов, связанных с деятельностью человека, что существенно модифицирует физическую структуру биосферы, и последствия для существования живых систем зачастую мало прогнозируемы. Как пример, можно констатировать, что Земля, по ряду оценок, является самой яркой «звездой» Солнечной системы, излучающей в радиочастотном диапазоне. Определение вклада антропогенных изменений представляет собой достаточно сложную и специфическую задачу [1].

Мониторинг параметров окружающей среды определяется, как информационно-измерительная система наблюдений, оценки и прогнозирования изменений в состоянии окружающей среды, которая выявляет закономерности влияния факторов внешней среды на биосферу и выделения антропогенной составляющей этих изменений на фоне природных процессов.

Согласно [2] схема системы мониторинга выглядит следующим образом (рис. 1).

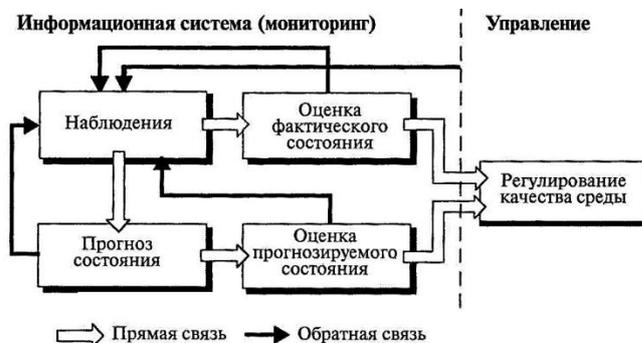


Рис. 1. Схема системы мониторинга

Независимо от особенностей объекта наблюдения, процесс мониторинга всегда включает в себя четыре основных этапа:

1. наблюдение за объектом (объектами) мониторинга;
2. оценка физического состояния объекта (объектов) мониторинга;
3. прогнозирование возможных изменений состояния объекта (объектов) мониторинга (источники и причины воздействия на окружающую среду);
4. оценка состояния объекта (объектов).

Объединяя всё вышеперечисленное, следует отметить актуальность применения геоинформационных систем (ГИС) в задачах мониторинга параметров окружающей среды.

Применение ГИС позволяет автоматизировать процессы обработки и анализа больших объемов данных, поступающих в результате измерений в точках наблюдения за состоянием физического объекта (явления, события и т. п.), а также оперативно оценивать и прогнозировать развитие наблюдаемого объекта (явления, события) [3].

К параметрам окружающей среды, для которых могут быть созданы карты для их дальнейшего анализа и прогнозирования, относятся:

1. температура;
2. концентрация загрязняющих веществ;
3. напряженность электромагнитного поля;
4. радиоактивность;

5. влажность;
6. скорость и направление ветра и др.

При разработке систем мониторинга с использованием ГИС появляется возможность проводить:

1. измерения и визуализацию расположения объектов наблюдения на фоне топографической или тематической карты;
2. обработку измерений для исключения шумов и ошибок;
3. анализ методами математической статистики;
4. изучение пространственных распределений показателей методами интерполяции;
5. построение карт изолиний для получения величин явлений и выявление изменчивости этих величин во времени, их продолжительности, повторяемости, одновременности наступления и т. д.;
6. формирование отчётов и построение графиков изменения показателей с течением времени.

Таким образом, доклад направлен на освещение особенностей применения геоинформационной технологии как одной из составляющих эволюции научных исследований магнитного поля Земли.

II. ОСОБЕННОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ КАРТОГРАФИИ

Геофизическая картография – создание достоверных карт физических полей Земли (гравитационного, магнитного и др.) [4]. Такие карты применяются для решения широкого круга научно-практических задач, среди которых разведка и добыча полезных ископаемых, освоение энергии земных недр, изучение магнитной и солнечной активности, охрана окружающей среды и прочее.

Геофизическая картография интерпретирует поле как область «пространственного распределения конкретных количественных признаков явлений вне зависимости от того, отражают ли они какие-либо энергетические или силовые свойства этих явлений» [5]. В таком аспекте нередко под физическим (геофизическим) полем Земли понимается «множество значений физических величин (геофизических параметров), количественно характеризующих естественное или созданное в Земле искусственное физическое поле (или отдельные его элементы) в пределах определенной территории или области Земли» [6].

При изучении пространственного распределения полей происходит извлечение информации об изменении значений геофизических параметров и их колебаниях относительно нормальных значений. Выявление аномалий, представляющих собой разницу между значениями наблюдаемого геофизического поля и нормального поля Земли (или другого расчетного уровня), обусловлено различными факторами, которые определяются при геологической интерпретации.

Исследование геофизических полей представляет собой количественную и качественную интерпретацию для получения информации об изучаемом явлении. Для

этого используются различные средства моделирования, одно из которых – картографическая модель.

При помощи картографической модели происходит отображение геофизической информации в режиме реального времени с учетом её непрерывности в пространстве.

Одним из основных способов изображений геофизических полей являются изолинии (изолинейное моделирование), которые наглядно показывают пространственное распределение таких полей и позволяют обеспечить достаточно высокую точность визуализации на карте.

Особенности создания геофизических карт направлены на разработку критериев, позволяющих проводить систематизацию существующих и вновь появляющихся карт. Так, для учета характера поля при выборе сечения изолиний на геофизических картах [4] предложено и обосновано использование результатов районирования геофизических полей. Разработан новый тип комплексной карты геофизического поля с отображением плотности его наблюдений для анализа надежности выявленных аномалий.

Одной из наиболее развитых областей геофизического картографирования является картография магнитного поля Земли [7, 8].

Особенностью магнитной картографии является то, что магнитное поле Земли меняется во времени, поэтому поле, изображенное на картах, должно быть отнесено к определенному моменту времени.

К магнитным картам можно отнести:

1. карты склонения D (разница между географическим (истинным) Северным полюсом и Магнитным северным полюсом. Измеряется в градусах, от 0° до 40° и более);
2. карты наклонения I (угол между вектором напряжённости магнитного поля Земли и его горизонтальной составляющей);
3. карты полного модуля вектора геомагнитной индукции T ;
4. карты горизонтальной и вертикальной составляющих T ;
5. карты нормального магнитного поля Земли и др.

На рис. 2, 3, 4 приведены примеры отображения геофизических полей в работах [9, 10].

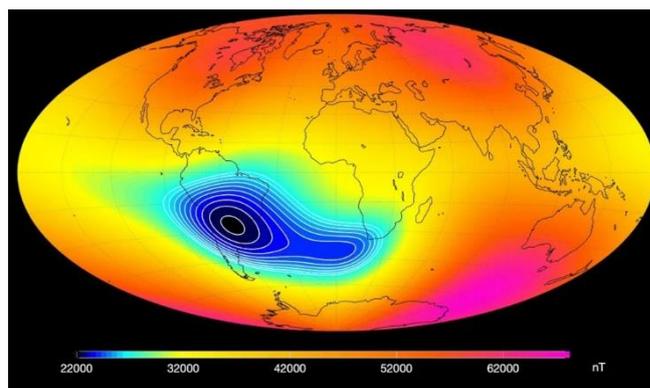


Рис. 2. Бразильская магнитная аномалия

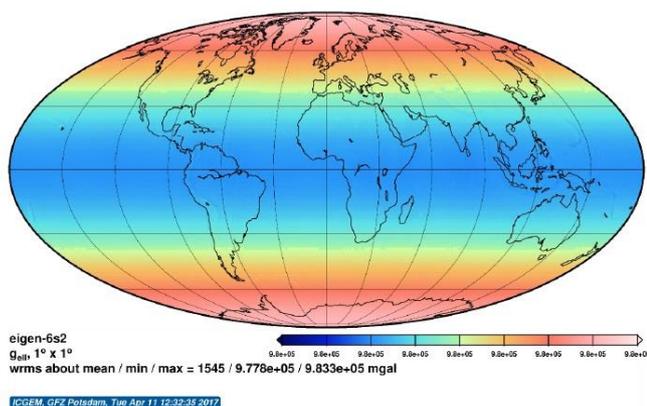


Рис. 3. Гравитационное поле Земли с портала ICGEM

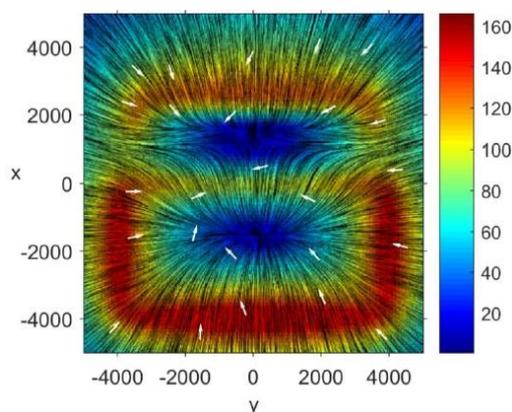


Рис. 4. Аномальное гравитационное поле

На сегодняшний день работы по исследованию применения геоинформационной технологии в области моделирования магнитного поля малочисленны, в этой связи встаёт необходимость детального изучения особенностей построения геофизических полей в геоинформационных системах, с чем может помочь кафедра информационно-измерительных систем и технологий (ИИСТ) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

III. ОСНОВНЫЕ ПРОЕКТЫ ПО СОЗДАНИЮ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ КАФЕДРОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра ИИСТ занимается разработкой и созданием информационно-измерительной техники различной сложности для многих областей деятельности человека, начиная от интеллектуальных датчиков и преобразователей, программируемых приборов на базе микроконтроллеров до компактных, локальных и распределенных измерительно-вычислительных и управляющих систем и систем мониторинга с развитым алгоритмическим и программным обеспечением. Также на базе кафедры ИИСТ работает учебно-научный центр «ГИС технологии» [11].

Основные тематики научно-исследовательских работ по теме ГИС:

1. «Разработка методологии формирования комплексной оценки, прогнозирования и

предупреждения техногенных и природных чрезвычайных ситуаций»;

2. «Программная система расчет нормативов допустимого воздействия на водные объекты с использованием ГИС»;
3. «Разработка информационно-телекоммуникационной системы мониторинга участка обращения локомотивов»;
4. «Создание интеллектуальной системы мониторинга и управления энергопотреблением с прогнозируемым метрологическим ресурсом в зданиях и сооружениях»;
5. «Разработка научно-технических основ и создание системы диагностики технического состояния автомобильных газонаполнительных компрессорных станций».

В настоящее время сотрудниками кафедры ведутся работы по созданию систем оценки прилегающих территорий и железнодорожного пути; системы мониторинга экологической устойчивости сельскохозяйственных территорий с использованием данных дистанционного зондирования Земли; разработке отечественных методик оценки секвестрационного потенциала территорий.

Выпускники кафедры также выполняют дипломные работы по темам связанным с ГИС, а именно: климатический мониторинг прибрежных территорий; определение параметров объектов путем обработки и анализа цифровых данных фотоснимков; анализ результатов измерений параметров рельсового пути; исследование шумового загрязнения территорий; оценка карбонового следа и др.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено понятие мониторинга параметров окружающей среды, сущность которого заключается в определении корреляции взаимного влияния параметров окружающей среды на биосферу.

Представлена схема системы мониторинга, по которой можно определить основные этапы мониторинга:

1. наблюдение;
2. оценка объекта;
3. прогнозирование;
4. оценка состояния объекта.

Показана актуальность применения геоинформационной технологии при изучении параметров окружающей среды, в том числе геофизических полей. В ГИС осуществляется пространственная привязка и формируется база знаний, в которой вся информация структурирована.

Изучены особенности геофизического, в частности, магнитного картографирования, одной из отличительных характеристик которого является то, что геофизические поля изменяются во времени, что может вносить неопределенность при отображении на тематической карте.

Представлены основные разработки и направления работы кафедры ИИСТ с использованием геоинформационных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Побаченко С.В., Пономарев А.В. Сопряженный мониторинг биофизических и геофизических показателей в задачах электромагнитной экологии: Учеб.-метод. пособие. Томск: ТГУ, 2009. 45 с.
- [2] Апкин Р.Н., Минакова Е.А. Экологический мониторинг: Учеб. пособие. 2-е изд. Казань.: Казан.гос.энерг.ун-т, 2015. 127 с.
- [3] Современное применение ГИС в геоэкологии [Электронный ресурс] URL: https://geo.bsui.by/images/pres/geoeco/dkgis/dkgis_9.pdf
- [4] Логинов Д.С. Совершенствование картографического изображения геофизических полей: Дис. ... канд. техн. наук / МИИГАиК. М., 2017. 190 с.
- [5] Червяков, В.А. Концепция поля в современной картографии. Новосибирск: Наука, 1978. - 150 с.
- [6] Геологический словарь / Под ред. акад. К.Н. Паффенгольц. М.: Недра, 1973. Т.1. 486.
- [7] Литвинова, Т.П. Теоретические и методологические аспекты прикладной магнитной картографии // Региональная геология и металлогения. 2015. № 61. С. 50-58.
- [8] Колесова В.И. Аналитические методы магнитной картографии. М.: Наука, 1985. 223 с.
- [9] Бразильская магнитная аномалия [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Бразильская_магнитная_аномалия.
- [10] Боярчук М.А. Разработка и исследование метода отображения векторного гравитационного поля Земли для геоинформационного анализа: Дис. ... канд. техн. наук / МИИГАиК. М., 2020. 128 с.
- [11] Кафедра информационно-измерительных систем и технологий [Электронный ресурс] URL: <https://etu.ru/ru/fakultety/fakultet-informacionno-izmeritelnyh-i-biotekhnicheskikh-sistem/obshaya-informaciya/sostav-fakulteta/kafedra-informacionno-izmeritelnyh-sistem-i-tehnologiy/>

Основные направления исследований СПбФ ИЗМИРАН за последние 30 лет

А. Д. Перечесова¹, Ю. А. Копытенко²

Санкт-Петербургский филиал Федерального Государственного Бюджетного Учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

¹ perechesova@gmail.com, ² office@izmiran.spb.ru

Аннотация. Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн ведет историю с создания магнитной обсерватории в Санкт-Петербурге в 1830 г. Филиал создан в 1946 г., после переезда Института в г. Троицк (г. Москва).

В 2022 году СПбФ ИЗМИРАН включает подразделения: Отдел геомагнитных исследований, в составе Лаборатории наземных геомагнитных исследований (Группа магнитных свойств, магнитная станция «Красное Озеро», геофизическая станция «Лехта»), Сектор магнитных картографий, Сектор информационных геомагнитных технологий; Лаборатория магнитосферных возмущений; Лаборатория морских геомагнитных исследований, Магнито-ионосферная обсерватория «Воейково».

Основная научная деятельность: Фундаментальные и прикладные исследования в области магнитного поля Земли и солнечно-земной физики: разработка аналитических и картографических моделей пространственно-временного распределения геомагнитного поля; исследование широкого класса геомагнитных аномалий, их физической природы и связи со строением и процессами, которые происходят в земной коре и мантии на континентах и в океанах, а также магнитных аномалий техногенного происхождения; изучение вариаций магнитного поля Земли и их связи с процессами, протекающими в околоземном пространстве (ионосфере, магнитосфере); изучение особенностей протекания геомагнитных вариаций в сейсмоактивных районах с целью разработки методов прогноза землетрясений по магнитным возмущениям; разработка методов и средств измерения векторного геомагнитного поля в стационарных условиях и на движущихся носителях, включая ферромагнитные; исследования магнитосферных эффектов космических лучей, а также изучение воздействия вариаций космических лучей, солнечной активности и изменений геомагнитного поля на климат Земли.

Ключевые слова: магнитное поле Земли; солнечная-земная физика; сейсмоактивность; прогноз землетрясений; магнитометр; земная кора; флюидные каналы; космические лучи

I. РЕГУЛЯРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПОНЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Магнито-ионосферной обсерваторией (МИО) СПбФ ИЗМИРАН выполняются регулярные измерения компонент магнитного поля Земли (МПЗ), их временных вариаций и параметров ионосферы (с 1957 г.). В настоящее время ряд наблюдений магнитного склонения (с 1724 г.), компонент Н, Z и полного поля Т (с 1878 г.) в Санкт-Петербурге и его окрестностях (включая Воейково) является практически непрерывным и наиболее длинным рядом наблюдений МПЗ в России (рис 1). Регулярные длительные наблюдения

постоянного и переменного поля Земли и параметров ионосферы проводятся на МИО и магнитной станции «Красное озеро», в том числе по проекту «Интермагнет».

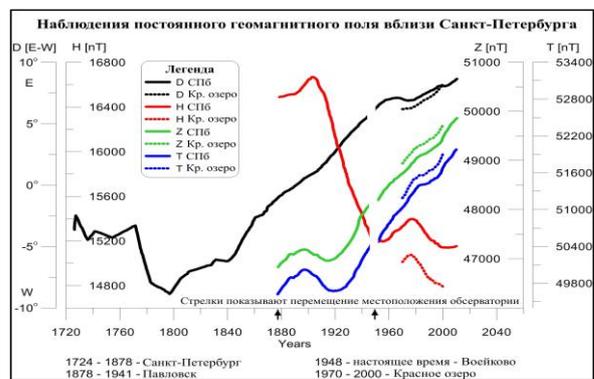


Рис. 1. Вековые вариации МПЗ в окрестностях Санкт-Петербурга

Институтом разработана модель решения обратной задачи вертикального зондирования ионосферы применительно к данным, полученным на ионосферных станциях типа «АИС-М» и структура интеллектуальной информационной системы (ИИС) магнитных измерений (МИ). Использование модели ИИС МИ позволяет эффективно решать различные задачи.

II. ГЕОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

A. Лаборатория наземных геомагнитных исследований

В СПбФ ИЗМИРАН разработаны новые типы торсионных высокочувствительных цифровых магнитометров (GI-MTS-1). Предложен оригинальный метод пассивной геофизической магнитной локации в ультранизкочастотном диапазоне 0,001-10Гц для определения динамики ионосферных токовых систем и сторонних токовых систем в земной коре [1], [2], [3]. Метод в сочетании с высокоточными измерениями находит широкое применение при изучении физических процессов генерации короткопериодных геомагнитных колебаний, в практике прогноза распространения радиоволн и при выявлении локальных аномалий интенсивности, градиентов и фазовой скорости распространения ультранизкочастотных магнитных возмущений перед сильными землетрясениями, и для выполнения высокоточных геомагнитных съемок в труднодоступных районах Земли. Разработаны оригинальные алгоритмы для местоположения и динамики ионосферных источников геомагнитных вариаций, а также местоположения локальных источников электромагнитных возмущений в континентальной и океанической земной коре,

приуроченных к очагам готовящихся сильных землетрясений ($M > 5$) (рис. 2) [4].

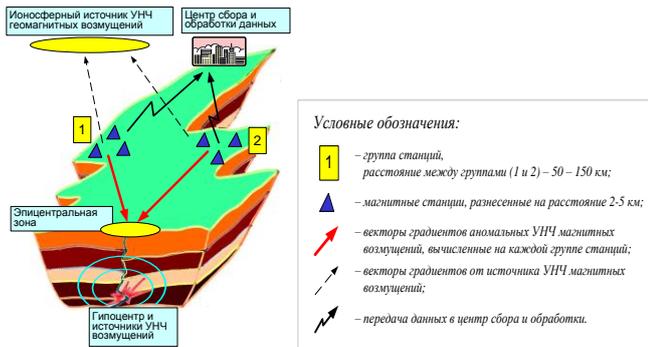


Рис. 2. Схема магнитной локализации эпицентра землетрясения

В районе г. Медвежьегорск (Карелия) проводилось исследование геоэлектрических свойств земной коры с помощью магнито-теллурического зондирования и оригинального градиентно-фазового зондирования с учетом фазовых скоростей распространения УНЧ геомагнитных возмущений. Предварительно получено хорошее соответствие этих двух методов (эксперимент Шунгит-2012). По данным густой меридиональной цепочки трехкомпонентных магнитовариационных станций в Карелии (5 МВС на геомагнитных широтах 58.9° – 61.6°) во время геомагнитной суббури определялось перемещение проекции плазмпаузы вдоль земной поверхности в узком диапазоне L-оболочек (3.7–4.4) в магнитосфере Земли.

Разработана методика составления карт распределения пространственных вариаций градиентов магнитного поля с целью определения местоположения намагнитенных объектов на дне моря (п-ов Сахалин). Съёмка выполнялась с подвижного носителя. Для проведения магнитометрических работ использовалась мобильная автоматизированная градиентная установка, составленная из двух разнесенных высокочувствительных трехкомпонентных магнитовариационных станций [5], [6]. В ходе эксперимента BEAR выявлена магнитная локация суббури и геоэлектрических неоднородностей.

В ходе уникального для мировой практики эксперимента «FENICS» 2014–2018 гг. (рис. 3) по глубинному частотному зондированию литосферы Фенноскандинавского щита с использованием двух взаимно ортогональных промышленных ЛЭП в частотном диапазоне 0.1–200 Гц. Впервые экспериментально обнаружен на территории Карело-Кольского региона промежуточный проводящий слой дилатантно-диффузионной природы («слой ДД») в поле естественных вариаций АМТ-диапазон и в докембрийской кристаллической земной коре на глубинах 2–3 ÷ 7–10 км [7].

Сигналы зарегистрированы на удалениях до 5600 км между передающими и приемными станциями – на Шпицбергене, в Харькове, на Камчатке и в других районах. Установлена высокая степень горизонтальной однородности электрического разреза литосферы Фенноскандинавского щита в интервале глубин 10–50 км (коэффициент анизотропии не выше 1.2). Исследованы параметры «нормального» глубинного электрического разреза литосферы Фенно-

скандинавского щита и выполнена его реологическая и геотермическая интерпретация. По результатам «FENICS» на западе Карелии и в Центральной Финляндии установлена аномалия пониженного поперечного сопротивления литосферы, конформная с областью погружения границы Мохоровичича до глубины 55–60 км [8], [9].

Результаты электромагнитных зондирований с естественными и контролируемыми источниками позволили детально исследовать геоэлектрический разрез в районе Ен-Яхинской сверхглубокой скважины СГ-7. В разрезе верхней части коры устойчиво выделяются два слоя пониженного сопротивления: в интервале глубин 150–200 м и 500–1500 м.

Путем проведения высокоточных частотных зондирований и с контролируемыми источниками на территории Кольского полуострова и в Центральной Финляндии доказано существование неоднородного промежуточного проводящего ДД-«слоя» (рис. 3б). Его продольная проводимость находится в пределах от десятых долей до единиц сименсов. Считается, что существование свободных флюидов (метеорной воды) на глубине обусловлено дилатантно-диффузионными явлениями [10].

В результате расширяются возможности интерпретации дистанционного зондирования как ионосферы, так и Земли с использованием контролируемых наземных источников КНЧ диапазона, а также повышается их информативность.

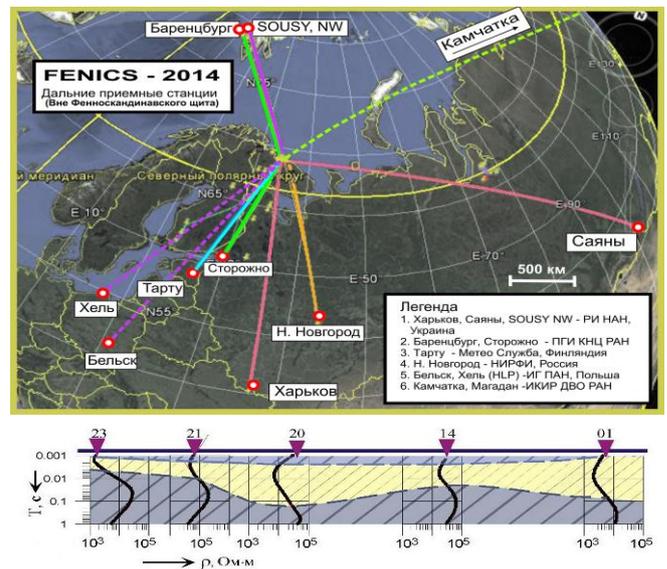


Рис. 3. Схема расположения дальних точек наблюдения в эксперименте «FENICS» и кривые кажущегося сопротивления АМТЗ на профиле Ловозеро-Пулуозеро. Желтой штриховкой показано положение «слоя ДД»

Помимо изучения строения литосферы при помощи КНЧ-волн экспериментальные исследования показали наличие вариаций амплитуды [11] и поляризационных характеристик поля [12] в нижней части КНЧ диапазона и на более низких частотах в различных геофизических условиях при отсутствии вариаций в диапазоне СНЧ. Эти особенности поведения поля, подтверждены теоретическими расчетами, показывающими, что при низкой проводимости Земли влияние ионосферы в ближней зоне может быть заметным. Полученные

результаты следует принимать во внимание в задачах глубинного зондирования земли и мониторинга состояния ионосферы с применением контролируемых источников, в особенности при работах на экстремально низких частотах в областях с низкой проводимостью Земли.

Установлено, что просачивание КНЧ-волн во внешнюю ионосферу днем возможно в высоких широтах благодаря наличию главного ионосферного провала, который не описывается имеющимися эмпирическими моделями среднеширотной ионосферы. Поэтому при высокоширотном расположении источника или трассы распространения осцилляции импеданса ионосферы и амплитуды поля с частотой могут возникать и в дневное время. Значит более высокая чувствительность КНЧ-волн (в сравнении с СНЧ) к изменениям во внешней ионосфере открывает возможности использования данного диапазона в исследованиях околоземного пространства [13].

Выявлен и объяснен механизм воздействия вариабельности солнечной активности и изменений геомагнитного поля на климат Земли; предложенный механизм корректен с энергетической точки зрения; построена модель воздействия солнечных космических лучей на аэрозольный и озоновый слои атмосферы; расчеты подтверждены экспериментом. Впервые проведен анализ воздействия вариаций солнечной активности на процессы в нижней атмосфере с учетом временной шкалы вариабельности солнечной активности. Показано, что имеют место существенные физические различия в отклике нижней атмосферы на воздействие кратковременных (часы, дни) и долговременных (годы и более) вариаций солнечной активности. Полученный результат имеет принципиальное значение для понимания физического механизма воздействия солнечной активности на процессы в системе атмосфера-океан, а также для выявления вклада естественных факторов в современные климатические изменения [14].

Впервые проведен анализ воздействия вариаций солнечной активности на процессы в нижней атмосфере с учетом временной шкалы вариабельности солнечной активности. Показано, что имеют место существенные физические различия в отклике нижней атмосферы на воздействие кратковременных и долговременных вариаций солнечной активности. Экспериментально показано, что климатический отклик на солнечное воздействие имеет региональную структуру, что связано с особенностями глобальной атмосферной циркуляции. Полученный результат имеет принципиальное значение для понимания физического механизма воздействия солнечной активности на процессы в системе атмосфера-океан и вклада естественных факторов в современные климатические процессы [15].

С целью выяснения природы комбинированных воздействий солнечного и внутриагмосферных факторов на климатическую вариабельность были собраны данные о вариациях радиального прироста хвойных деревьев в северо-западном регионе России (Республика Коми). Климат региона благодаря близости к зоне полярных сияний подвергается как воздействию солнечной активности, так и воздействию Арктических и Северо-Атлантических климатических осцилляций [16].

В. Сектор магнитной картографии

Созданы банк геомагнитных данных, включающий результаты измерений МПЗ по всему земному шару. Данные: модули обработки, анализа, интерпретации геомагнитной информации; вычисления различных аналитических моделей МПЗ как для поверхности Земли, так и околоземного пространства; мониторинг карт различного масштаба всех элементов геомагнитного поля, новейшие мировые карты компонент магнитного поля Земли эпохи 2020 [17].

Интерпретация магнитных и гравитационных аномалий Европы впервые позволила выделить глубинный маркирующий горизонт магнетитовой зоны древней коры в приполярной части Европы, найти глубинные особенности геотермальных зон, позволяющие оценить перспективы вертикальной миграции флюидного потока и глубинной подпитки термальных вод стран Центральной Европы.

На основе компонентных измерений магнитного поля НИС «Заря», магнитных аномалий WDMAM 2007 и спутника (CHAMP) проведено исследование латеральных и вертикальных неоднородностей глубинного строения земной коры. По магнитометрическим данным подтверждено наличие реологически ослабленных зон в средней и верхней части земной коры и уточнен характер их распределения для интервала глубин 5–20 км. На примере известных нефтегазовых бассейнов Северного и Средиземного морей показана роль элементов флюидных систем в подпитке месторождений углеводородов [18], [19].

Разработана методика комплексной интерпретации данных магнитометрической, гравиметрической съемки, сейсмических зондирований, измерений теплового потока и геологического районирования для поиска крупных подземных резервуаров геотермальных вод. Для известных месторождений изучена роль элементов флюидных систем в подпитке углеводородных (УВ) и геотермальных месторождений. На рис. 4 представлены результаты совмещенного геомагнитного и геоэлектрического разреза вкост простирания глубинной флюидной системы Прибайкалья и отмечены известные месторождения. Оригинальный региональный прогноз позволяет выделять перспективные участки для постановки детальных электроразведочных работ.

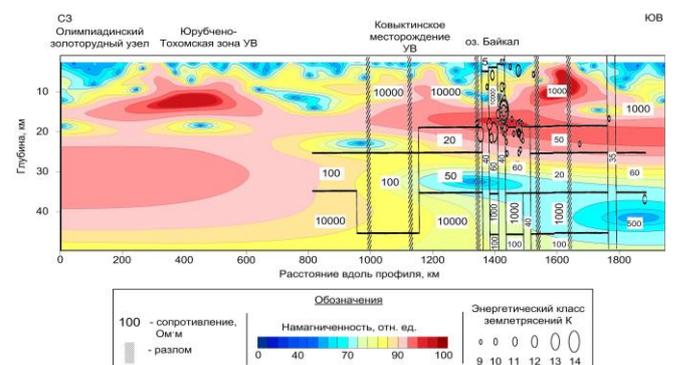


Рис. 4. Совмещенный геомагнитный и геоэлектрический [Бердичевский, 1999] разрез по профилю в Прибайкалье. Энергетический класс землетрясений и положение разломных зон по (Киссин, 2009)

Разработана методика и технология вычисления цифровых магнитных карт векторных составляющих геомагнитного поля с использованием данных модульной магнитной съемки и вычислены карты на полигонах территории России и по акваториям омывающих морей, с целью их дальнейшего использования для решения прикладных задач.

С. Группа магнитных свойств

Совместное рассмотрение палеомагнитных и археологических данных для образцов отложений палеолитической стоянки Костёнки 16 (Углянка) позволило обоснованно выявить экскурс Гётебург и, в соответствии с магнитостратиграфической шкалой, определить возраст в пределах 13000–12350 лет ВР [20], [21].

На территории Русской равнины проведены палеомагнитные исследования образцов отложений археологических стоянок Костенки 14, Подол Ш/1, Баранова Гора. Выделены экскурсии Каргаполово (40000 лет назад), Моно (24000 лет назад) и Геттенбург (12500 лет назад). По материалам отложений построены траектории виртуального магнитного полюса (ВМП) (рис 5).

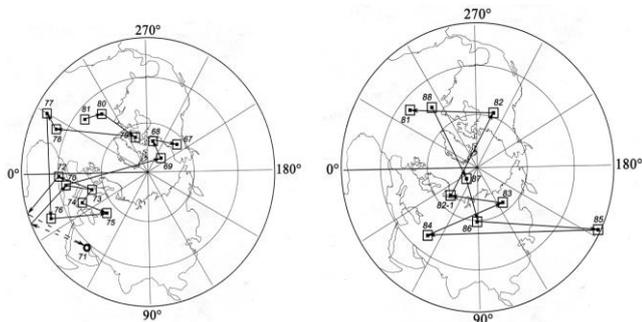


Рис. 5. Траектория движения (ВМП) в зоне экскурса Каргаполово (цифры – номера образцов), 1 этап – вверху, 2 этап – внизу)

III. ЛАБОРАТОРИЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Определены магнитосферные вариации космических лучей на основе расчетов геомагнитных порогов для современных моделей.

Обнаружены два противоположных типа долготных распределений фотосферного магнитного поля (National Solar Observatory, Kitt Peak 1976–2003 гг.) для двух периодов 11-летнего солнечного цикла: подъема-максимума и спада-минимума. Концентрация магнитных полей наблюдается на активных долготах, разнесенных на 180°, а именно, на кэррингтоновских долготах 180° для подъема-максимума и 0°/360° для спада-минимума. Объединение данных за весь период 1976–2003 гг. (со сдвигом распределения спад-минимум на 180°) дает исключительно гладкое распределение с максимумом около 180°. Аналогичная картина получена для солнечных пятен за 1917–2003 гг. Подтверждено предположение, что смена активных долгот на Солнце тесно связана с перестройкой локальных и глобальных магнитных полей в ходе 22-летнего магнитного цикла Солнца.

Гелиоширотное распределение фотосферных магнитных полей по поверхности Солнца было рассмотрено на основе синоптических карт

обсерватории Китт Пик (1976–2003 гг.) отдельно для следующих групп полей: 0 – 5 Гс, 5 – 20 Гс, 20 – 100 Гс и $B > 100$ Гс. Была получена одна синоптическая карта за весь исследуемый период, которая отражает особенности расположения на диске Солнца различных проявлений солнечной активности.

Получены вариации Н-компоненты во время гигантской магнитной бури 29 августа — 5 сентября 1859 года в Риме. Показано, что кривые Н-компоненты в Санкт-Петербурге и в Риме почти повторяют друг друга; амплитуда возмущения в Риме определена как $H=2800$ нТл [22].

Продолжены исследования жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в магнитных полях эмпирических моделей магнитосферы в возмущенные периоды. Показано, что в периоды сильных возмущений геомагнитные пороги, полученные для модели Ts01 более чувствительны к изменениям параметров ММП, чем для модели Ts04 [23], [24].

IV. ЛАБОРАТОРИЯ МОРСКИХ ГЕОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате фундаментальных исследований на НИС «Заря» (1950-1992 гг.) впервые выявлены магнитные аномалии и особенности их распределения на акватории Мирового океана; получены первые сведения о вековой вариации элементов геомагнитного поля на океанах. Вышел из печати «Атлас магнитных карт Балтийского моря», который содержит аналоговые и цифровые карты пяти элементов МПЗ – D, I, F, Y, Z – в масштабе 1:5000000, а также сведения о нормальных полях МПЗ, вековых вариациях, геологическом строении дна Балтийского моря. Работа выполнена в рамках Международного проекта с участием Института геодезии и картографии Республики Польша. Основой для создания «Атласа» послужили уникальные компонентные магнитные съемки, выполненные НИС «Заря» в период 1970–1990 гг. [25]

Разработана оригинальная методика и выделены аномалии, приуроченные к минимуму в спектре геомагнитного поля (крупные региональные магнитные аномалии), обоснована физическая природа этих аномалий и показано, что их источники связаны с глубинными частями литосферы и верхней мантии Земли [26]. [27]

Проведен детальный геосторический анализ аномального магнитного поля (АМП) и идентифицирована вся последовательность срединговых магнитных аномалий на хребте Рейкьянес от аномалии 24 (54 млн лет) до осевой аномалии. Найдены доказательства существования трех стадий эволюции хребта Рейкьянес, которые характеризуются различным режимом коровой аккреции, связанным с различной степенью влияния Исландского горячего пятна. Определены временной интервал каждой стадии и причины изменения режима аккреции коры [28].

В результате детального анализа оригинальных магнитометрических данных в Северной Атлантике впервые построена детальная кинематическая модель вращения Сев. Американской и Евразийской плит за последние 20 млн лет с дискретностью 1 млн лет.

Построена динамическая модель источников главного магнитного поля Земли (ГМПЗ). Модель представляет собой набор диполей, выделяемых методом последовательного разделения вкладов отдельных источников независимо для каждой эпохи. Наиболее мощные источники получены в толще жидкого ядра. Диполи, определяющие локальные аномалии ГМПЗ, приурочены к границе ядро-мантии. Параметры всех источников изменяются во времени непрерывно, что позволяет исследовать степень влияния диполей разного уровня на пространственную структуру векового хода ГМПЗ и проводить сравнение с другими геофизическими процессами. Сравнительный квазигармонический анализ изменения дипольной составляющей ГМПЗ и флуктуаций скорости вращения Земли показал, что наблюдаемый сдвиг по фазе отдельных гармоник может быть связан с влиянием проводящей мантии. Амплитудно-фазовые характеристики мантии, как фильтра, получены в рамках однослойной модели (рис. 6) [29].

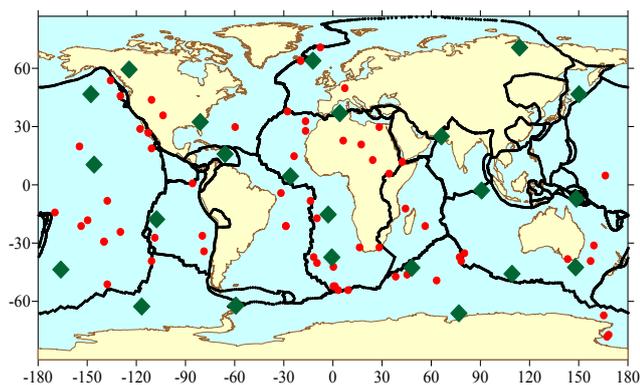


Рис. 6. Полюс вращения. Локализация источников, приуроченных к границе ядро-мантии, относительно горячих точек и глобальных тектонических разломов. Местоположение источников на эпоху 1995 года показано зелеными ромбами, горячие точки – красными кругами

Получен ряд статистических характеристик изменения векового хода ГМПЗ на территории России и Европы. Проведено сравнение с аналогичными характеристиками векового хода, определяемого отдельными источниками разного масштаба. Показана роль источников 2–3-го порядка малости в формировании короткоживущих (30–40 лет) фокусов векового хода.

Проведена детальная идентификация линейных магнитных аномалий на акватории Норвежско-Гренландского бассейна в Кайнозойское время на основе анализа обобщенной базы магнитометрических данных и составлена карта изохрон. Выполнен анализ изменения скоростей спрединга вдоль линий дрейфа для различных сечений центров спрединга. Определено время изменения скоростей спрединга.

В 2019–2020 гг. по результатам всероссийского конкурса СПбФ ИЗМИРАН принял участие в масштабной кругосветной океанографической экспедиции, организованной главным командованием Военно-морского флота России при поддержке Русского географического общества к берегам Антарктиды на океанографическом исследовательском судне «Адмирал Владимирский». Одной из основных задач экспедиции было изучение МПЗ и уточнение местоположения

Южного полюса Земли с помощью буксируемого протонного магнитометра (полного поля) и компонентных измерений магнитного поля аппаратурой на ферромагнитном судне.

V. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО, УЧАСТИЕ В ГРАНТАХ, НАГРАДЫ И НАУЧНЫЕ ЖУРНАЛЫ

На протяжении многих лет ведется сотрудничество с рядом стран: США (Геологическая служба США, Американский геофизический союз, Национальная администрация по исследованию океана и атмосферы (NOAA), Колумбийский университет), Японией (Университет электрокоммуникаций, Токио), Финляндией (Университет Оулу, Университет Йюенсу, Геофизическая обсерватория Соданкюла), Францией (Институт физики Земли, Париж), Италией (Третий Римский университет). Филиал принимает участие в международных программах, проектах, в работе международных научных форумов.

В 2012 г. на магнитной станции «Красное Озеро» (Ленинградская область) запущена в эксплуатацию магнитометрическая аппаратура по проекту «Интермагнет».

СПбФ ИЗМИРАН участник Грантов РФФИ, Грант NSF, МНФ Дж.Сороса, Инко-Коперникус, ИНТАС, программ фундаментальных исследований Президиума РАН и международных экспериментальных исследований (эксперимент BEAR). Имеет дипломы VII Международного Промышленного Форума «Российский промышленник» (2003 г), IX Международной Выставке-конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (2004 г.), диплом II степени за разработку комплекса «ОЧАГ-1» для определения местоположения очага предстоящего сильного землетрясения (2004 г.)

В 2004 г. д.ф.-м.н., профессор Ю.А. Копытенко награжден премией им. А.П. Карпинского в области наук о Земле. В 2012 г. д.ф.-м.н., профессор О.М. Распопов награжден Дипломом Европейской научно-промышленной палаты «За большой вклад в геофизику».

По инициативе СПбФ ИЗМИРАН создан новый международный журнал – International Journal of Geomagnetism and Aeronomy (главный редактор О.М. Распопов до 2013).

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе отражены основные направления деятельности СПбФ ИЗМИРАН за последние тридцать лет, за эти годы было опубликовано более 1000 научных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Molchanov O.A., Kopytenko Yu.A., Voronov P.M., et al. Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the spitak (ms = 6.9) and loma prieta (ms = 7.1) earthquakes: comparative analysis // Geophysical Research Letters. 1992. T. 19. № 14. P. 1495-1498.
- [2] Ismaguilov V.S., Kopytenko Yu.A., Voronov P.M., Hattori K., Hayakawa M., Molchanov O.A. ULF magnetic emissions connected with under sea bottom earthquakes // Natural Hazards and Earth System Science. 2001. T. 1. № 1-2. P. 23-31.
- [3] Kopytenko Y., Ismagilov V., Hayakawa M., Smirnova N., Troyan V., Peterson T. Investigation of the ULF electromagnetic phenomena related to earthquakes: contemporary achievements and the perspectives // Annali di Geofisica. 2001. T. 44. № 2. P. 325-334.

- [4] Kopytenko Yu.A., V.S. Ismagulov, K. Hattori, and M. Hayakawa. Anomaly disturbances of magnetic fields before the strongest earthquake in Japan on March 11, 2011. "Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes", editor M. Hayakawa. 2012, 55(1), P. 101-107
- [5] Kopytenko Y.A., Sergushin P.A., Petrishchev M.S., Levanenko V.A., Zaytsev D.B. Torsion magnetic variometer with kevlar-hanger-based sensor // *Key Engineering Materials* Vol. 437 (2010). Trans Tech Publications, Switzerland, 2010. P. 621-624.
- [6] Kopytenko, Y.A., Sergushin, P.A., Petrishchev, M.S., Levanenko, V.A., Perechesova, A.D. Device for Manufacturing Torsion Bars with Helical Anisotropy UISAT-1 // *Key Engineering Materials* Vol. 437 (2010). – Trans Tech Publications, Switzerland, 2010. P. 625–628.
- [7] Zhamaletdinov A.A., Shevtsov A.N., Velikhov Ye.P. et al. The study of Interaction Electromagnetic Waves ELF-ULF Range (0.1-200 Hz) with the Earth Crust and the Ionosphere in the Field of Industrial Power Transmission («FENICS» Experiment) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. 14(2), 5-49.
- [8] Жамалетдинов А.А. О природе границы Конрада в свете результатов бурения Кольской сверхглубокой скважины и данных глубинной геоэлектрики // *Доклады Академии наук*, 2014, том 455, № 3, с. 332–336.
- [9] Жамалетдинов А.А. О флюидной природе промежуточных проводящих слоев в земной коре по результатам электромагнитных зондирований и каротажа сверхглубоких скважин // *Физика Земли*. 2011. № 2. С. 53-63.
- [10] Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Токарев А.Д., Корья Т. Частотное электромагнитное зондирование земной коры на территории Центрально-Финляндского гранитоидного комплекса // *Известия РАН. Физика Земли*. 2002. № 11. С. 54-68.
- [11] Терещенко Е.Д., Терещенко П.Е., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф., Жамалетдинов А.А. Влияние ионосферы на возбуждение электромагнитного поля диапазона КНЧ и более низких частот в ближней зоне // *Журнал технической физики*, 2018, выпуск 6, стр. 907-913.
- [12] Терещенко Е.Д., Сидоренко А.Е., Терещенко П.Е. Влияние ионосферы и неоднородной структуры Земли на поляризационные характеристики магнитного поля в диапазоне частот 0.2-200 Hz в ближней зоне горизонтальной наземной антенны // *Журнал технической физики*. 2019. Т. 89. № 7. С. 1092-1098.
- [13] Терещенко Е.Д., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф., Терещенко П.Е. Немонотонная амплитудно-частотная зависимость магнитного поля, контролируемого наземного КНЧ-источника в дневное время // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2017. Т. 9. № 3. С. 104-110.
- [14] Van Geel B., Raspopov O.M., Renssen H., Van der Plicht J., Meijer H.A.J., Dergachev V.A. The role of solar forcing upon climate change // *Quaternary Science Reviews*. 1999. Т. 18. № 3. P. 331-338.
- [15] Пудовкин М.И., Распопов О.М. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры // *Геомагнетизм и аэрономия*. 1992. Т. 32. № 5. С. 1-22.
- [16] Raspopov O.M., Dergachev V.A., Ogurtsov M., et al. The influence of the de vries (~ 200-year) solar cycle on climate variations: results from the central asian mountains and their global link // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2008. Т. 259. № 1. P. 6-16.
- [17] Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Мировые карты компонент магнитного поля земли эпохи 2020 // *Труды XV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. 2020. С. 288-291.
- [18] Петрова А.А., Петрищев М.С., Копытенко Ю.А., Латышева О.В. Выявление флюидоподводящих каналов в Арктических морях по аномалиям магнитного и гравитационного полей // *Материалы Всероссийской конференции «Глобальные проблемы Арктики и Антарктики»*. ФИЦКИА РАН. Архангельск, 2020, С. 810-815.
- [19] Копытенко Ю.А., Латышева О.В., Петрова А.А. Влияние разломных зон земной коры на эволюцию толщины и кромки ледяного покрова Арктики // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского*. 2020. № S674. С. 207-211.
- [20] E.G. Gus'kova, O.M. Raspopov, V.A. Dergachev, A.G. Iosifidi, and G.V. Sinityna. Manifestation of the Gothenburg Geomagnetic Field Excursion in Sediments on the Northwestern Central Russian Upland. ISSN 0016-7932 // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2012. Vol. 52. N 3, pp. 675-683.
- [21] Гуськова Е.Г., Распопов О.М., Дергачёв В.А., Иосифиди А.Г., Синицын А.А. Палеомагнитные исследования археологических памятников Костёнки 14 (Маркина Гора) и Костёнки 16 (Углянка). *Geocosmos*. 2012, с. 44-50.
- [22] Тясто М.И., Птицына Н.Г., Веселовский И.С., Яковчук О.С. Экстремально сильная геомагнитная буря 2-3 сентября 1859 года по архивным магнитным данным Российской сети наблюдений // *Геомагн и Аэрономия*, Т.49, №2, 163-173, 2009.
- [23] М.И. Тясто, О.А. Данилова, В.М. Дворников, В.Е. Сдобнов. Отражение параметров солнечного ветра в жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в период сильной магнитной бури в ноябре 2003 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*, Т.48, № 6, 723-2008 г.
- [24] M.I. Tyasto, O.A. Danilova, N.G. Ptitsyna, V.E. Sdobnov. Variations in cosmic ray cutoff rigidities during the great geomagnetic storm of November 2004 // *Journal of Advances in Space Research* 2013, 1230–1237.
- [25] Баткова Л.А., Боярских В.Г., Демина И.М. Комплексная база данных компонент геомагнитного поля на акватории океанов по результатам съемок, выполненных на немагнитной шхуне «Заря» // *Геомагнетизм и Аэрономия*, 2007, т.47, № 4, стр. 571-576.
- [26] Ivanov S.A., S.A. Merkur'ev. Resolvability of the interval between inversions using marine magnetic anomalies based on the Rao-Cramer inequality // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2013, Vol. 53, No. 6, pp. 785–793.
- [27] Ivanov S.A., S.A. Merkur'ev Interpretation of Marine Magnetic Anomalies. Part I. A Survey of Existing Methods and Analysis of the Analytic Signal Method, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2014, Vol. 54, No. 3, pp. 388-396.
- [28] Меркурьев С.А., Деметц Ч., Гуревич Н.И. Эволюция геодинамического режима аккреции коры у оси хребта Рейкьянес, Атлантический океан. // В: *Геотектоника*. 2009; № 3. стр. 14–29.
- [29] Демина И.М., Никитина Л.В., Фарафонова Ю.Г. Вековые вариации главного магнитного поля земли в рамках динамической модели его источников // *Геомагнетизм и Аэрономия* 2008, т.48, №4, с. 567-575.

Изучение магнетизма в курсе общей физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

А. С. Чирцов¹, И. Л. Шейнман²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹alex_chirtsov@mail.ru, ²ilshainman@etu.ru

Аннотация. Приведен краткий обзор изучаемых в курсе общей физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» магнитных явлений. Обозначены точки возможного развития курса на основе сотрудничества с Институтом земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН.

Ключевые слова: магнетизм, курс общей физики

I. ВВЕДЕНИЕ

Изучение магнетизма является одним из ключевых разделов курса общей физики, преподаваемого в СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Связанные с магнетизмом темы проходятся на втором и третьем семестрах обучения и включают в себя магнитостатику, электромагнитную индукцию и квантовые магнитные явления.

Теория и экспериментальное исследование изучаемых в курсе общей физики явлений были разработаны до конца 19 века. В настоящее время акцент исследований сместился в область их практического использования.

II. МАГНЕТИЗМ В ЛЕКЦИОННО-ПРАКТИЧЕСКОМ КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

В лекционный курс общей физики входят следующие темы [1–4]:

1. Магнетизм как релятивистский эффект.
2. Закон Био–Савара–Лапласа. Поле прямого и кругового тока. Индукция магнитного поля на оси соленоида. Магнитное поле, создаваемое поверхностным током.
3. Сила Ампера и сила Лоренца. Движение частиц в магнитном поле. Эффект Холла.
4. Закон полного тока. Теорема Гаусса. Поле тороида и соленоида. Магнитный поток. Закон Ома для магнитных цепей (формула Гопкинсона).
5. Магнитный момент. Магнитный диполь. Поле магнитного диполя. Взаимодействие диполя с магнитным полем.
6. Магнитное поле в веществе. Намагниченность. Напряженность магнитного поля. Граничные условия на поверхности двух магнетиков.
7. Физическая природа диа-, пара- и ферромагнетизма.
8. Дифференциальные формы записи теоремы Гаусса и закона полного тока для магнитного поля. Векторный потенциал. Векторный потенциал магнитного диполя.
9. Электромагнитная индукция.

10. Энергия магнитного поля.

11. Магнитооптический эффект (эффект Фарадея).

12. Расщепление уровней энергии атомов в магнитном поле (эффект Зеемана).

III. ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЛАБОРАТОРНОМ КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Методы измерения магнитного поля являются основой лабораторного практикума по магнетизму, проводимого на кафедре физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» на втором и третьем семестрах обучения студентов. Магнетизм представлен в следующих лабораторных работах курса общей физики [5, 6]:

1. Исследование основных свойств магнитного поля (закон полного тока)
2. Исследование магнитного поля кругового тока (закон Био–Савара–Лапласа)
3. Исследование динамических характеристик магнитного поля (магнитный поток, самоиндукция, индуктивность)
4. Моделирование магнитного поля токов
5. Измерение магнитного поля Земли
6. Исследование гистерезиса ферромагнетиков
7. Исследование намагничивания ферромагнетиков баллистическим методом
8. Исследование эффекта Холла в полупроводниках
9. Исследование эффекта Зеемана методом индуцированных квантовых переходов электронов в атоме
10. Исследование ядерного магнитного резонанса и определение магнитного момента ядра атома.

В работах «Исследование основных свойств магнитного поля (закон полного тока)», «Исследование магнитного поля кругового тока (закон Био–Савара–Лапласа)», «Исследование динамических характеристик магнитного поля магнитный поток, самоиндукция, индуктивность» индукция магнитного поля создается кольцом, внутри которого медным проводом намотана катушка. Кольцевая катушка подключена к генератору переменного тока частоты f . Процесс измерения значений индукции магнитного поля основан на использовании явления электромагнитной индукции

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Поскольку катушка, создающая исследуемое магнитное поле, питается переменным током,

$$\mathcal{E} = \sqrt{2}\pi fBSN,$$

где S – эффективная площадь сечения катушки датчика, N – число витков катушки датчика.

В работе «Измерение магнитного поля Земли» электродвижущая сила (ЭДС) электромагнитной индукции создается при повороте на 180° контура, состоящего из N витков, в однородном магнитном поле с индукцией B . Измерительная катушка L подключена к входу операционного усилителя, цепь обратной связи которого образована конденсатором емкостью C . Напряжение на выходе операционного усилителя, равное напряжению на конденсаторе C , измеряется вольтметром. Накопление заряда на конденсаторе приводит к интегрированию тока, который пропорционален ЭДС индукции, откуда

$$U = 2NBS/(RC).$$

По измеренному напряжению легко определяется величина магнитного поля. Однако точность этого метода не высока, поскольку дрейф нуля операционного усилителя приводит к интегрированию постоянной ненулевой составляющей тока, что приводит к искажению определения изменения магнитного потока. Вычитание напряжений, измеренных при прямом и обратном повороте рамки, позволяет частично скомпенсировать ошибку, связанную с непрерывным однонаправленным нарастанием показаний вольтметра.

В работе «Исследование гистерезиса ферромагнетиков» петля гистерезиса наблюдается на экране осциллографа. На x -вход осциллографа подается напряжение $u_x = i_1 R_1$, пропорциональное току i_1 , т. е. напряженности $H = N_1 i_1 / l$ внутри возбуждающей катушки.

Переменное магнитное поле является источником переменного потока магнитной индукции Φ , пронизывающего витки индикаторной катушки.

В результате в индикаторной катушке возникает ЭДС индукции $\mathcal{E}_i = -N_2 d\Phi/dt = -N_2 S dB/dt$, вызывающая ток $i_2 = \mathcal{E}_i / R_2$. Этот ток создает на конденсаторе емкостью C напряжение

$$U_c = \frac{1}{C} \int i dt = -N_2 SB / (CR_2),$$

которое подается на y -вход осциллографа.

Таким образом, на x -входе осциллографа действует напряжение, пропорциональное напряженности H , а на y -входе – индукции B магнитного поля, и на экране осциллографа наблюдается кривая, воспроизводящая в некотором масштабе петлю гистерезиса.

В работе «Исследование эффекта Холла» вдоль пластины полупроводника, помещенной в магнитное поле, перпендикулярное вектору плотности тока, а, следовательно, и средней скорости направленного движения заряженных частиц, на заряженную частицу,

движущуюся со средней скоростью v , будет действовать сила Лоренца

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = \int \mathbf{j} \times \mathbf{B} dV$$

в направлении, перпендикулярном вектору плотности тока, рис. 1. В результате между гранями с электродами появится поперечное электрическое поле, создающее напряжение:

$$U = \frac{IB}{ned}$$

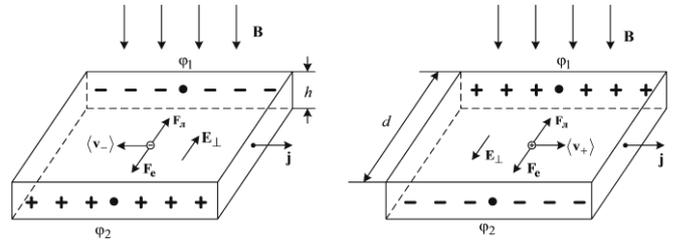


Рис. 1.

В лабораторных работах «Исследование эффекта Зеемана методом индуцированных квантовых переходов электронов в атоме» и «Исследование ядерного магнитного резонанса и определение магнитного момента ядра атома» используются методы квантовой магнитометрии, основанные на эффекте электронного парамагнитного резонанса:

$$h\nu = \Delta E = g\mu_B B$$

Ряд лабораторных работ реализован наряду с реальными экспериментальными установками также и в виртуальном формате в виде сайтов, на которых студенты могут провести опыты и получить экспериментальные измерения, практически идентичные результатам измерений, полученных на реальных установках [7–9]. В частности, созданная на базе реальной установки виртуальная лабораторная работа «Моделирование магнитного поля токов» потребовала для своей разработки проведения научного исследования с обобщением метода зеркальных изображений на случай поля проводимости [10].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы наблюдается негативная тенденция сокращения объемов и существенной примитивизации курсов фундаментальной физики, читаемых для студентов технических университетов. Кафедра Физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» на доступных для нее уровнях деятельности противостоит этому, продолжая развивать учебный контент в рамках фундаментального подхода, соответствующего традициям признанных на мировом уровне российских научно-педагогических школ, считая одной из своих важнейших задач сохранение имеющегося потенциала для успешного решения задач будущего и обеспечения быстрого и адекватного формирования ответов на новые вызовы.

Полная готовность кафедры поддержать новый предлагаемый проект совместных исследований путем создания специализированных курсов для подготовки талантливой молодежи в области задач геофизики и магнетизма Земли, а также развернуть на базе ЛЭТИ исследования по направлениям, представляющим интерес для потенциальных коллабораторов, является свидетельством высокой перспективности политики развития кафедры, проводимой в последние десятилетия.

Изучаемые в курсе общей физики магнитные явления относятся к науке даже не прошлого, а позапрошлого века. Сотрудничество с ИЗМИРАН может способствовать привнесению в изучаемый раздел курса учебных материалов и информации, касающихся исследований XX и XXI веков. Взаимный интерес также может представлять разработка новых лабораторных работ на основе современной магнитометрии. Такое сотрудничество могло бы стать примером для многих подразделений технических университетов, формирующих заказы общеобразовательным кафедрам на чтение курсов физики, в рамках создаваемых ими образовательных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 тт. Т. 2. Электричество и магнетизм: Учебное пособие. 5е изд., испр. СПб.: Издательство «Лань», 2021. 352 с.
- [2] Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 т. Т. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц: Учебное пособие. 5е изд., испр. СПб.: Издательство «Лань», 2021. 384 с.
- [3] Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. III. Электричество. 4-е изд., стереот. М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2004. 656 с.
- [4] Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике: учеб. пособие для вузов. 7-е изд. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2001. 640 с.
- [5] Вяткин В.М., Козлов Д.М., Кузьмина Н.Н., Мамыкин А.И., Шишкина М.Н., Шейнман И.Л. Электромагнетизм: лаб. практикум / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) "ЛЭТИ". СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2015. 55 с.
- [6] Вяткин В.М., Комашня А.В., Комашня В.Л., Малышев М.Н., Шейнман И.Л. Оптика и атомная физика: лабораторный практикум: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 96 с.
- [7] Шейнман И.Л. Виртуальный лабораторный практикум по физике. Материалы XXVI международной научно-методической конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. С. 274-276.
- [8] Шейнман И.Л. Развитие и апробация виртуального лабораторного практикума по физике // Материалы XXVII Международной научно-методической конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество». СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 21 апреля, 2021.
- [9] I. Sheinman, N. Kuzmina. Virtual laboratory workshop in physics. EDUCON2022 – IEEE Global Engineering Education Conference. Conference proceeding 1403. IEEE Xplore. 2022
- [10] Кутьин З.А., Шейнман И.Л. Модификация метода зеркальных изображений для уточнения теоретической модели в лабораторной работе по исследованию электростатического поля двухпроводной линии методом моделирования // 74-я научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 22-26 апреля, 2019. Россия, Санкт-Петербург.

Решение обратной СДВ задачи для определения южной границы высыпания потоков ультра-энергичных релятивистских электронов

А. М. Астафьев¹, А. С. Чирцов²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹ astafev-aleksandr@yandex.ru, ² alex_chirtsov@mail.ru

Аннотация. Путем решения обратной СДВ задачи определены границы высыпания в полярную область потоков ультра-энергичных релятивистских электронов с энергией около 100 МэВ. Проведенный в трехмодовом приближении анализ показал несущественность эффектов, связанных с отражением и перевозбуждением нормальных волн на границе между возмущенной и невозмущенной частями радиотрассы.

Ключевые слова: распространение СДВ радиоволн; неоднородный волноводный канал; перевозбуждение нормальных волн; геомагнитная широта; ультра-энергичные релятивистские электроны

I. ВВЕДЕНИЕ

Явление высыпания ультра-энергичных релятивистских электронов (УРЭ) в полярную атмосферу было обнаружено и исследовано косвенным методом путем анализа амплитуд и фаз сверхдлинноволновых (СДВ) сигналов [1–6]. Суть этого явления заключается во вторжении в среднюю полярную атмосферу Земли высокоэнергичных релятивистских электронов с энергией ~100 МэВ. Вторгающиеся электроны тормозятся в окрестности 40 км над поверхностью Земли и генерируют тормозное рентгеновское и гамма излучение, которое приводит к появлению спорадического Ds слоя в области 10–40 км [6]. Пространственный масштаб таких возмущений соизмерим с авроральной зоной Земли, а их длительность составляет от десятка минут до нескольких часов. Факт существования описанного явления был получен только косвенным методом благодаря многолетним и непрерывным наземным измерениям амплитуд и фаз СДВ сигналов четырех относительно близких по значению частот (10,2; 12,1; 13,6 и 16 кГц) [1–3]. Поскольку электронная концентрация возникающего спорадического Ds слоя очень низкая, то именно волны СДВ диапазона наиболее сильно реагируют на его появление.

В настоящее время данный тип аномальных возмущений не регистрируется другими известными средствами мониторинга нижней ионосферы, а также отсутствуют спутниковые измерения электронных потоков такой большой плотности в ближнем космосе.

II. МЕТОД АНАЛИЗА СИГНАЛОВ СДВ ДИАПАЗОНА В УСЛОВИЯХ СИЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

A. Данные вариации СДВ сигналов

Имеющиеся для анализа данные мониторинга СДВ сигналов содержат вариации амплитуд и фаз для трех сигналов (10,2; 12,1 и 13,6 кГц) авроральной радиотрассы Алдра (Норвегия) – Апатиты длиной 885 км и одного сигнала (16 кГц) радиотрассы Регби (Великобритания) – Апатиты длиной 2497 км, которая находилась в авроральной области только частично (рис. 1).



Рис. 1. География расположения источников и приемника в Апатитах (Кольский п-ов) с отображением узкой области границ вторжения ультра-энергичных релятивистских электронов (пунктирные линии)

Оцифровка данных вариаций этих сигналов произведена с шагом в 100 секунд. Амплитудные данные регистрировались пиковым детектором в относительных величинах с полосой пропускания каналов 20 Гц [1, 2]. Относительная амплитудная ошибка зависела от таких факторов как, например, наличие грозовой активности и росла с уменьшением амплитуды сигнала. Фазовые данные регистрировались с помощью синхронного детектора в микросекундах с полосой пропускания менее 1 Гц. Такая полоса пропускания позволяет отфильтровать грозовые шумы, исключить влияние дискретности излучения сигнала станцией (1 с излучения монохромного сигнала и 9 с паузы), но искажает истинную вариацию фазы быстро меняющегося сигнала. Изменения фаз при резких вариациях сигналов существенно «запаздывают» относительно изменений

амплитуд, что особенно проявляется на начальных стадиях многих наблюдавшихся сильных СДВ возмущений, характеризующиеся резким и почти синхронным спадом амплитуд и уменьшением фаз принимаемых сигналов. На рис. 2 в качестве примера представлены зависимости от времени трех амплитуд и трех фаз сигналов авроральной радиотрассы Алдра – Апатиты для события 13 мая 1987 года, которое длилось с 16.30 до 18.30 UT [3].

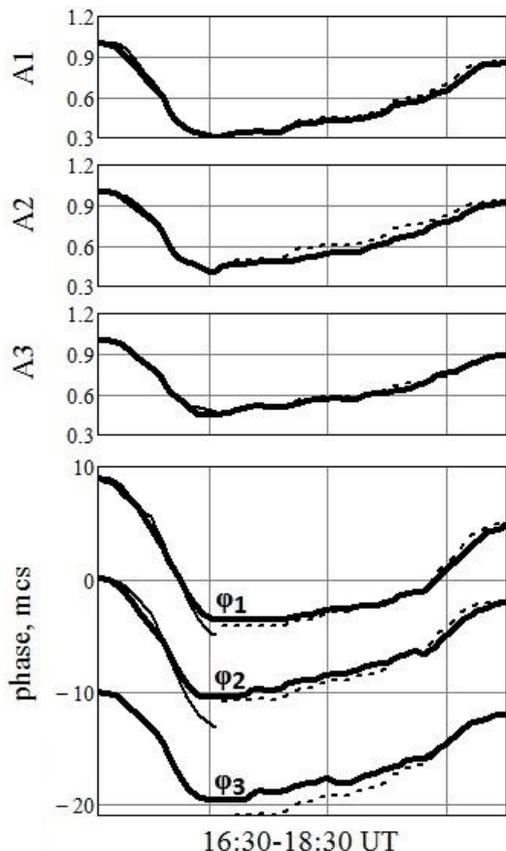


Рис. 2. Экспериментальные (толстые линии) и вычисленные (тонкие линии) вариации фазы и относительной амплитуды для 10,2 кГц, 12,1 кГц и 13,6 кГц для возмущения 13 мая 1987 года (16.30-18.30 UT)

Обработка данных вариаций СДВ сигналов производилась с использованием самосогласованного СДВ метода решения обратной нестационарной СДВ задачи [3, 6]. Его нетривиальность состоит в определении абсолютных значений ионосферных параметров (являющихся функциями времени) по относительным вариациям СДВ величин. Идея этого метода состоит в пошаговом определении малых приращений ионосферных параметров по малым изменениям измеренных амплитуд и фаз СДВ сигналов в средней зоне источника (сотни км) для последовательности временных интервалов. Параметры, характеризующие начальное состояние нижней ионосферы, находятся путем минимизации функционала – невязки между относительными изменениями измеренных величин амплитуд и фаз СДВ сигналов и значениями этих же величин, вычисленных по найденным характеристикам. Детальное описание самосогласованного метода анализа состояния нижней ионосферы, а также его численная реализация приведены в [3] и [6].

Задача определения границы возмущений решалась в два этапа. На первом этапе решалась обратная СДВ задача (задача 1-ого рода) самосогласованным методом [2, 3, 4] по экспериментальным данным для радиотрассы Алдра – Апатиты. Предполагая однородность возмущения в каждый момент времени на всей длине этой трассы, находились временные зависимости эффективной высоты и модуля коэффициента отражения от ионосферы волноводного канала Земля – ионосфера (раздел 4). На втором этапе, используя данные вариации СДВ сигналов трассы Великобритания – Апатиты, определялись границы возмущений (решалась обратная СДВ задача 2-ого рода).

В. Решение обратной СДВ задачи первого рода

Для анализа экспериментальных данных трех частот радиотрассы Алдра – Апатиты длиной 885 км использовался лучевой метод в трехлучевом приближении [3, 6, 7], в котором учитывались дифракционная волна Ватсона – Фока, однократно и двукратно отраженные от спорадического Ds-слоя лучи. При анализе событий с сильными амплитудными и фазовыми вариациями сигналов решалась обратная нестационарная СДВ задача, т.е. по экспериментальным вариациям сигналов определялись параметры радиотрассы как функции времени. Этими параметрами в данном случае являлись эффективная высота и модуль коэффициента отражения первого луча, имеющего одно отражение от верхней среды волновода. Электрические свойства грунта считались известными и соответствующими скалистым породам с относительной диэлектрической проницаемостью 20 и электрической проводимостью 10 Сим/м. Предполагалось, что радиотрасса S1 является однородной в каждый момент времени возмущения. Допустимости этого предположения способствует то обстоятельство, что излучатель и приемник находились почти на одной геомагнитной широте (63.48 и 63.64 градуса).

По найденным временным зависимостям модуля коэффициента отражения и эффективной высоты можно «восстановить» зависимости амплитуд и фаз трех сигналов. В качестве примера на рис. 2 представлены такие зависимости для события 13 мая 1987 года (тонкие линии). По различию хода двух типов зависимостей можно судить о точности полученного решения [3].

С. Решение обратной СДВ задачи второго рода

Для решения обратной СДВ задачи второго рода использовались результаты обратной СДВ задачи первого рода, а также данными вариаций амплитуды и фазы четвертой частоты 16 кГц радиотрассы Великобритания – Апатиты длиной 2457 км. Задача определения южной границы возмущений решалась с использованием представления частично авроральной радиотрассы (вдоль которой распространяется сигнал с частотой 16 кГц) в виде последовательности трех регулярных волноводных каналов «Земля – ионосфера»: невозмущенного южного, аврорального северного и возмущенного, еще более северного, волноводного канала. Среднеширотная часть этого волновода длиной были смоделированы стандартными параметрами невозмущенной ионосферы, которые в данной постановке задачи не зависят от времени. Если предположить, что искомая длина возмущенной части также не зависит от времени, то обратная СДВ задача

2-ого рода решается с использованием известных выражений [7, 8] для амплитуды и фазы распространяющегося в волноводном канале сигнала, из которых можно составить функцию-невязку от искомой длины возмущенной части радиотрассы. Детально решение этой задачи представлено в [3] и [4].

Проведенный анализ для нескольких возмущений с 1982 по 1987 годы показал, что границы возмущений, вызванные вторжением ультра-энергичных релятивистских электронов в полярную атмосферу, укладываются в довольно узкий интервал геомагнитных широт $61,3 \pm 0,7$ градусов (пунктирные линии на рис. 1).

D. Оценка влияния перевозбуждения нормальных волн в задаче определения южной границы

Как было описано выше, задача определения южной границы возмущений решалась с использованием представления частично авроральной радиотрассы в виде последовательности трех регулярных волноводных каналов «Земля – ионосфера», моделирующих различные участки радиотрассы. Однако границы раздела регулярных участков волновода являются причиной дополнительного ослабления сигнала, порождаемого эффектами отражения и перевозбуждения нормальных волн, которые из рассмотрения были исключены. Первый переход между среднеширотным и авроральным невозмущенным участком трассы является стационарным и не дает вклад в относительное ослабление сигнала в течение возмущения (рис. 3). Второй переход, соединяющий невозмущенный и возмущенный участок авроральной трассы, является нестационарным и представляет больший интерес для рассмотрения, так как может существенно влиять на характеристики принимаемого сигнала во время исследуемых возмущений.

Для оценки ослабления сигнала, вызванного неоднородностью радиотрассы, можно рассмотреть СДВ задачу в сферическом волноводе, который состоит из двух частей с резкой границей и разными комплексными диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_I(r)$ и $\varepsilon_{II}(r)$, характеризующие невозмущенный (I) и возмущенный (II) участок трассы Великобритания – Апатиты (рис. 3) [9].

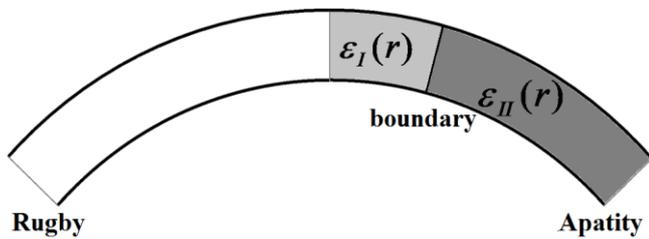


Рис. 3. Модель неоднородной радиотрассы Великобритания – Апатиты

Комплексные диэлектрические проницаемости $\varepsilon_I(r)$ и $\varepsilon_{II}(r)$ являются функциями поперечной координаты (высоты) r и определяются через соответствующие профили эффективной электронной концентрации, которые были взяты из работы [1]. На границе двух волноводов должны выполняться условия непрерывности поперечных по отношению к этой

границе компонент электрического E_r и магнитного поля H_ϕ , которые выражаются через вектор Герца, имеющему в рассматриваемом случае только одну компоненту Π_r [7]. Компоненты полей E_r и H_ϕ слева и справа от границы можно представить в виде суммы компонент полей E_r и H_ϕ отдельных нормальных волн [7, 8]. Для анализа вполне достаточно ограничиться рассмотрением только первых трех нормальных волн. Пусть слева от рассматриваемой границы падает волна номера $i=1$ (TM0) с единичной амплитудой. Полное поле в первом (невозмущенном) волноводе (I) состоит из поля падающей волны и суммы полей обратных волн:

$$E_I = E_1 + \sum_{i=1}^3 R_i E_{-i}, \quad H_I = H_1 + \sum_{i=1}^3 R_i H_{-i}$$

Полное поле во втором (возмущенном) волноводе (II) состоит только из прямых волн, уходящих от границы:

$$E_{II} = \sum_{i=1}^3 T_i E_i, \quad H_{II} = \sum_{i=1}^3 T_i H_i,$$

где T_i и R_i – искомые комплексные амплитуды прямых и обратных волн (коэффициенты отражения и перевозбуждения).

Поля отдельных нормальных волн выражаются через собственные функции $U_i^{I,II}(r)$ поперечного оператора $L_r^{I,II}$ и являются решением уравнения $L_r^{I,II} U_i^{I,II}(r) = \lambda_i^{I,II} U_i^{I,II}(r)$ [7, 8]. Собственные значения поперечного оператора $\lambda_i^{I,II}$ известным образом связаны с параметром $v_i^{I,II} = \sqrt{\lambda_i^{I,II} + 1/4}$, который определяет зависимость полей вдоль продольной координаты (угла θ) асимптотически $\sim e^{(jv_i^{I,II}\theta)}$ [7]. Собственные функции и собственные значения поперечного оператора вычислялись путем численного интегрирования нелинейного уравнения Рикатти [4] от нижней $r=R$ до верхней границы волноводного канала $r=R+z$ (R – радиус Земли), учитывая условия нормировки $U_i^{I,II}(R) = 1$. Используя условие непрерывности компонент полей E_r и H_ϕ на границе двух волноводных каналов и свойство ортогональности собственных функций $U_i^{I,II}(r)$, можно получить систему уравнений для искоемых комплексных амплитуд T_i и R_i .

Проведенный таким методом анализ [9] показывает, что поле невозмущенного волновода почти полностью определяется полем падающей волны. Уровень отраженных от границы возмущенной области волн не превышает 1 % от уровня падающего поля TM0 волны даже для мощных возмущений, характеризующиеся наибольшими вариациями эффективной электронной концентрации. Напротив, поле возмущенного аврорального участка радиотрассы в значительной степени определяется полем второй нормальной волны. Амплитуда второй нормальной волны для самых мощных возмущений составляет 15 % первой

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

нормальной волны, а фазовый сдвиг первой нормальной волны составляет около 3 мкс. Амплитуда третьей нормальной волны примерно в десять раз меньше амплитуды второй нормальной волны. Следует подчеркнуть, что полученные численные результаты относятся только к моментам времени максимума сильных и мощных возмущений, тогда как при вычислении границы анализируется возмущение в течение всей его длительности [3–6]. В моменты времени, отличных от максимума возмущений следует ожидать меньшие значения фазового сдвига и изменения амплитуды первой нормальной волны. Поле возникающей второй нормальной волны в заявленных пределах точности решения задачи определения южной границы [3, 4] можно не учитывать, так как ее ослабление на участке трассы граница возмущения – точка приема (Апатиты) в 3–4 раза больше ослабления первой нормальной волны.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты численного анализа данных вариаций СДВ сигналов позволили существенно продвинуться в понимании природы наблюдавшихся возмущений. Говоря о найденных границах возмущений, нужно понимать их как эффективные, так как в рамках приведенного анализа они предполагались неподвижными. Полученные вариации поля первой нормальной волны, связанные главным образом с возбуждением второй нормальной волны в возмущенной части радиотрассы, оказываются несущественными при решении задачи определения границы возмущенной области. Эти изменения оказываются сопоставимы с ошибками измерения использованных экспериментальных данных.

- [1] Beloglazov M.I., Remenets G.F. Investigation of powerful VLF disturbances // Intern. J. Geom. Aeronom., 2005. Vol. 5. No. 3. April issue. GI3004, doi:10.1029/2005GI000101.
- [2] Remenets G.F., Shishaev V.A. "VLF wave propagation and middle polar atmosphere as a detector of ultra-energetic relativistic electron precipitations in 1988–1992 years", Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 196, 2019, 105145, ISSN 1364-6826, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105145>.
- [3] Remenets G.F., Astafiev A.M. Southern boundaries of ultraenergetic relativistic electron precipitations in several cases from 1982 -1986 years. J. Geophys. Res., Space Physics, 2015, 120(5), 3318 – 3327. doi:10.1002/2014JA020591.
- [4] Remenets G.F., Astafiev A.M. Generalized Schumann and variation moment methods used for the determination of the equatorward boundary of the ultra-energetic relativistic electron precipitations into the auroral middle atmosphere. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 182 (2019) 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.11.019>
- [5] Remenets G.F., Astafiev A.M. Solution unicity of an inverse VLF problem: A case-study of the polar, ground-based, VLF radio signal disturbances caused by the ultra-energetic relativistic electron precipitations and of their southern boundaries // Advances in Space Research, 2016, Vol. 58, pp. 878-889. DOI: 10.1016/j.asr.2016.05.45.
- [6] Ременец Г.Ф. Динамика нижней кромки ионосферы во время геофизических возмущений 29 сентября 1989 г. // Проблемы дифракции и распространения волн. Вып. 26. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 1994. С.80-102.
- [7] Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение радиоволн в волноводном канале Земля - ионосфера. М.: Наука, 1994. 152 с.
- [8] Фок В.А. (1970) Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. Москва, "Советское радио". 520 с.
- [9] Remenets G.F., Astafiev A.M. Estimation of the mode conversion effect on the determination of southern boundary for the 100 MeV electron precipitations. Radio Science, 56, 2021, doi: 10.1029/2020RS007069.

Особенности измерения магнитного поля на ферромагнитном носителе

А. В. Петленко

Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (СПбФ ИЗМИРАН)
petlenko.58@mail.ru

Аннотация. Обсуждается возможность восстановления компонент главного магнитного поля, поля носителя и поля аномалий по данным магнитных компонент и параметров движения, измеренных на борту. Рассматривается ряд особенностей представления результатов измерений, обеспечивающих точность реконструкции компонент, достаточную для геолого-геофизической интерпретации поля.

Ключевые слова: измерения магнитного поля; магнитные аномалии; ферромагнитный носитель

I. ВВЕДЕНИЕ

Изменения компонент магнитного поля на борту подвижного ферромагнитного носителя вызваны как изменениями естественных магнитных полей, фиксируемых в процессе его движения, так и влиянием его собственного магнитного поля. Возможность разделения этих полей была показана, в частности, в работе [1], в которой по результатам магнитной съемки 1994–1995 гг. на НИС «Академик Голицын» были восстановлены компоненты главного магнитного поля и поля магнитных аномалий в районах структур залегания углеводородов в бассейнах Баренцева и Печорского морей.

По данным кругосветной экспедиции НИС «Адмирал Владимирский» рассмотрены некоторые из особенностей представления результатов измерений компонент магнитного поля на борту магнитного судна. Цель работы – показать возможность проведения магнитной съемки на неспециализированном магнитном носителе, что особенно актуально в эпоху активного смещения магнитных полюсов Земли.

II. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ

Основной особенностью проведения магнитных измерений на ферромагнитном носителе является необходимость совмещения неподвижной системы координат, в которой представляются изменения естественных магнитных полей, с системой координат движущегося судна, компоненты магнитного поля которого могут превосходить по величине компоненты главного магнитного поля Земли. В течение непродолжительного промежутка времени (порядка первых минут) значения компонент каждого из этих полей можно полагать постоянными в одной из собственных координатных систем.

Считая, что в каждый момент времени t обе эти системы связаны ортогональным преобразованием $\mathbf{R}(t)$, вектор главного магнитного поля \mathbf{T}_0 в подвижной

системе координат можно записать как $\mathbf{R}\mathbf{T}_0$. Точно так же в неподвижной системе вектор магнитного поля носителя \mathbf{T}_s записывается как $\mathbf{R}^{-1}\mathbf{T}_s$. Здесь \mathbf{R} – преобразование на группе 3D вращений вида $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{\alpha_x}\mathbf{R}_{\alpha_y}\mathbf{R}_{\alpha_z}$, определенное с точностью до порядка сомножителей \mathbf{R}_{α_i} , а $\alpha = (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$ – углы бортовой, килевой качки и курсового рысканья.

Компоненты магнитного поля, измеренного в неподвижной системе, определяются соотношениями $\mathbf{T} + \mathbf{R}^{-1}\mathbf{T}_s$, в подвижной: $\mathbf{T}_s + \mathbf{R}\mathbf{T}$, где $\mathbf{T} = \mathbf{T}_0 + \mathbf{T}_A(t)$, и \mathbf{T}_A – вклад аномального поля. Из приведенных соотношений следует, что независимо от выбора системы координат, в которой производятся измерения поля, только одна из постоянных составляющих \mathbf{T}_0 или \mathbf{T}_s дает непосредственный вклад, вклад другой опосредован эволюциями носителя. Таким образом, имеется возможность отказаться от более затратных измерений в неподвижной системе координат в пользу проведения измерений в системе координат судна.

Пусть теперь $\hat{\mathbf{T}}(t) = \mathbf{T}_s + \mathbf{R}(t)\mathbf{T}_0$ представление вектора измерений магнитного поля $\mathbf{T}(t)$ в системе координат носителя, $\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}(\alpha(t))$ и $\alpha(t)$ – измеренные значения углов качки и рысканья. Построим функционал $\sigma = \sigma(\mathbf{T}_0, \mathbf{T}_s, \alpha, \mathbf{T})$ уклонения измеренных и вычисленных значений поля и минимизируем его так, чтобы значениям неопределенных компонент \mathbf{T}_0 и \mathbf{T}_s соответствовало $\delta\sigma = 0$. После определения постоянных \mathbf{T}_0 и \mathbf{T}_s определяются и компоненты изменяющегося во времени поля $\mathbf{T}_A(t)$. Практической трудностью реализации представленной реконструкции поля является неопределенность восстановления матриц $\mathbf{R}(t)$ по измеренным значениям $\alpha(t)$. В первую очередь не определен порядок подстановки матриц $\mathbf{R}_{\alpha_x}(t)$, $\mathbf{R}_{\alpha_y}(t)$ и $\mathbf{R}_{\alpha_z}(t)$, факторизующих матрицы $\mathbf{R}(t)$.

III. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОРТОГОНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Хорошо известно, что произведение матриц факторизующих ортогональное преобразование, не коммутативно. Нарушение порядка их подстановки в какой-то момент времени приводит к ступенчатым изменениям слагаемого $\mathbf{R}(t)\mathbf{T}_0$ в представлении $\hat{\mathbf{T}}(t)$, что нарушает сходимость по условию $\delta\sigma = 0$ и возможность определения \mathbf{T}_0 и \mathbf{T}_s . Однако по измеренным значениям углов $\alpha(t)$ можно определить порядок следования матриц \mathbf{R}_{α_x} , \mathbf{R}_{α_y} , \mathbf{R}_{α_z} в каждый момент времени t , определяя существенные частоты качки и фазы колебаний носителя на этих частотах для каждой из компонент $\alpha(t)$.

Заметим, что если собственные частоты колебаний носителя могут быть определены спектральными методами, то фазы изменений угловых компонент для этих гармоник должны определяться мгновенно как результат фазового детектирования фильтрованных в узкой полосе осцилляций α , а не как спектрально-фазовый коэффициент, определяемый на выборке, значительно превышающей по продолжительности период этих осцилляций. Подчеркнем, что основной задачей детектирования является определение моментов времени, в которые отстающие по фазе колебания одной компоненты α относительно другой начинают их опережать. Этим моментам соответствует изменения порядка подстановки соответствующих R_α матриц факторизации R .

Фазовое поведение измеренных компонент горизонтальной составляющей поля для периода качки $T = 12$ с представлено на рис. 1. Показаны осцилляции горизонтальных X, Y компонент поля и углов бортовой α_x и килевой α_y качки судна (в градусах) на маршруте следования (продолжительность 400с). Приведены соответствующие амплитудные огибающие измеренных компонент (серые кривые, маркированные ромбиками). После нормировки фильтрованных значений значениями огибающих, умножения результата нормировки на $\cos(2\pi t/T)$ и $\sin(2\pi t/T)$ и отсеки вторых гармоник находим медленно меняющиеся фазовые функции компонент. Рис. 1 показывает моменты опережения (отставания) по фазе x и y-компонент. Хорошее корреляционное соответствие огибающих X и α_y компонент, а также Y-компоненты с α_x говорит о концептуальной справедливости представленной модели. Наблюдаемые несоответствия в корреляциях вызваны, в том числе, вкладами аномального поля.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Дальнейшие этапы процедуры восстановления компонент поля не приводятся, т. к. это потребовало бы обсуждения технических особенностей определения углов курсового рысканья (является предметом отдельного сообщения). Тем не менее, сверху на рис. 2 демонстрируются результаты измерений, а на нижней панели результаты реконструкции поля, измеренного в 1995 г. на борту НИС «Академик Голицын». Показанные на нижней панели компоненты представляют собой результат сложения вычисленных значений T_0 и вычисленных $T_A(t)$, полученных воздействием $R^{-1}(t)$ на вычет $\hat{T}(t) - T(t)$. Найденное значение модуля $|T_0 + T_A(t)|$ хорошо согласуется с результатами измерений модуля магнитного поля, измеренного буксирным на расстоянии 150м протонным

магнитометром, с точностью до задержки ~ 70 с при скорости судна ~ 2.5 м/с.

Из рис. 2 видно, что уровень шумов восстановленных значений поля составляет ~ 15 нТл для горизонтальных и ~ 5 нТл для вертикальной компоненты поля. Наблюдаемые погрешности вызваны погрешностью измерения угловых компонент $\sim 2-3'$. Преобладание шумов в горизонтальных компонентах обусловлено доминированием Z-компоненты в области высоких широт, где и проводились измерения.

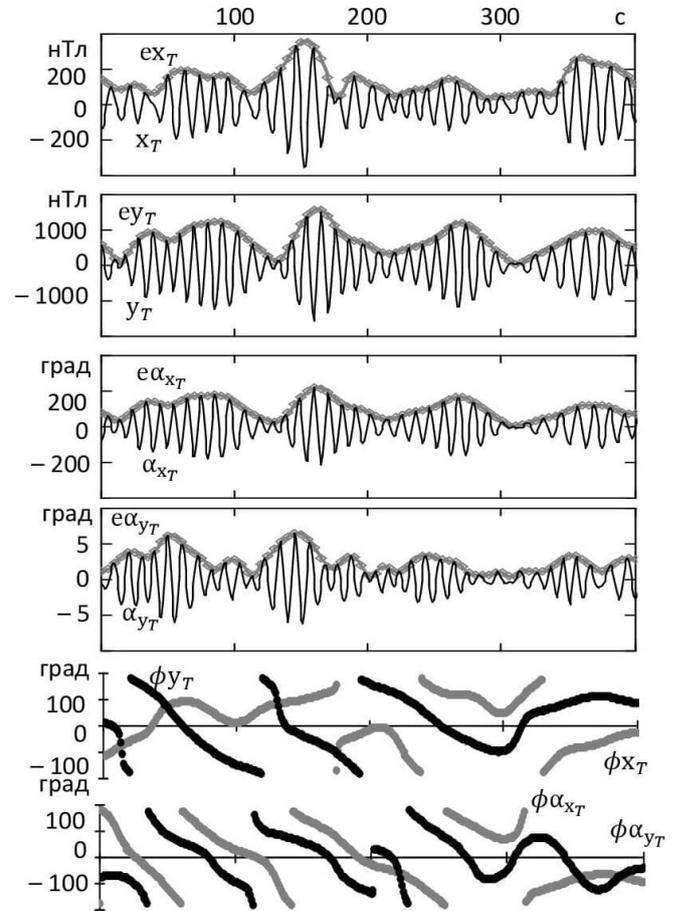


Рис. 1. Сверху вниз фильтрованная X-компонента магнитного поля (черная) и ее огибающая (серая маркированная ромбиками кривая); фильтрованная Y-компонента и ее огибающая; фильтрованная компонента бортовой качки α_x и ее огибающая; фильтрованная компонента килевой качки α_y и ее огибающая; фазовые функции X (серая) и Y компонент (черная кривая); фазовые функции α_x и α_y . Период фильтрации $T = 12$ с. Огибающие X-компоненты и α_y хорошо коррелируют, то же справедливо для Y и α_x огибающих

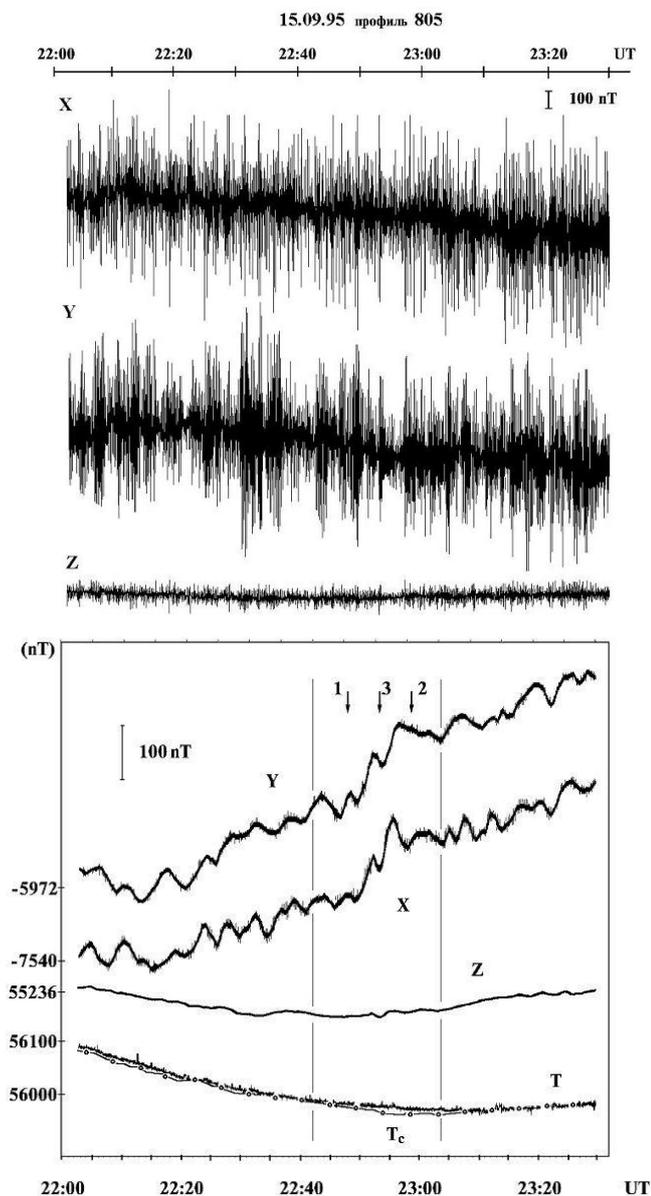


Рис. 2. Сверху – измеренные компоненты магнитного поля. На нижней панели результаты его восстановления. Нижние кривые представляют модуль вычисленных значений (маркированная кружками кривая) $|T_c|$ и измерения модуля $|T|$ буксируемым протонным магнитометром. Задержка составляет около 70 с. Стрелками отмечены моменты времени регистрации особенностей поля, связанных с границами областей залегания углеводородов

Точность измерения компонент магнитного поля $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ нТл в эксперименте 1994–1995 гг. при указанной точности угловых измерений представляется избыточной. Вполне удовлетворительными выглядят измерения магнитных компонент и углов на MEMS-датчиках со значениями пороговой чувствительности ~ 1 нТл и, соответственно, $\sim 2'$. Такая конфигурация оборудования была использована в экспедиции 2020 г. на НИС «Адмирал Владимирский».

Представленный выше способ фазового детектирования позволяет отслеживать лишь достаточно медленные изменения фазы и не дает возможности контролировать быстрые изменения угловых компонент так, как это делают более современные алгоритмы. Однако именно этот способ использовался в

реконструкции магнитных компонент в эксперименте 1994–1995 гг. Возможно, что некоторые случайные выбросы величиной до ~ 20 нТл в восстановленных горизонтальных компонентах поля (рис. 2) вызваны отсутствием тонких фазовых измерений.

Не смотря на значительный (до 15–20 нТл) уровень шумов в восстановленных компонентах магнитного поля подавление влияния качки почти на 40 дБ позволяет существенно повысить качество данных, выявляя скрытые периодичности в широкой полосе частот. Сопоставляя моменты (координаты) и характер их проявления на параллельных (секущих) галсах можно определить глубины залегания и направление простирания местных аномалий, в том числе, связанных с наличием полезных ископаемых. Стрелками на рис. 2 показаны моменты времени регистрации особенностей поля, связанных с границами областей залегания углеводородов в пределах Северо-Гуляевской структуры. Из рис. 2 можно заметить, что высокую информативность о структуре несут не столько модульные, сколько компонентные данные (в большей степени горизонтальные компоненты магнитного поля).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматривая особенности представления измерений компонент магнитного поля и угловых перемещений движущегося ферромагнитного носителя, можно сделать вывод о том, что качественная реконструкция компонент поля, достаточная для их геолого-геофизической интерпретации, не требует значительных материальных затрат для проведения измерений. Магнитная съемка может выполняться на борту неспециализированного судна в подвижной системе координат, жестко связанных с его главными осями, и использованием магнитных датчиков сравнительно невысокой чувствительности ~ 1 нТл.

Основной акцент повышения точности смещается в сторону угловых измерений, но и здесь следует учитывать, что точность измерения углов курсового рыскания ограничена снизу значениями первых угловых минут, а потому и остальные угловые компоненты могут измеряться с реализуемой пороговой чувствительностью $\sim 2'$.

Для указанных порогов чувствительности измерений точность реконструкции компонент магнитного поля составляет не более 10–15 нТл, при этом шумы по компонентам могут распределяться не изотропно. Подразумевается поэтапная реконструкция компонент главного магнитного поля (и поля носителя) с последующим вычислением компонент поля аномалий. Условием корректного решения задачи восстановления магнитных компонент является определение порядка матриц, факторизующих ортогональное преобразование, что достигается фазовым сопоставлением компонент угловых перемещений носителя на собственных частотах его колебаний.

О суточных вариациях магнитного поля Земли

В. В. Иванов

Санкт-Петербургский филиал Федерального Государственного Бюджетного Учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
sl_iva@mail.ru

Аннотация. Установлена связь между магнитным склонением и магнитным индексом $\sum K_p$ – применительно к годовому интервалу. Показано, что динамика усреднённых за каждый год из интервала 1973–2005 гг. среднечасовых значений магнитного склонения, соответствующих 6–7 часам утра и полдню — 12–13 часам, проявляет достоверную корреляцию с вариациями солнечной активности. Высказано предположение: колебательный характер изменения магнитного склонения в течение суток имеет отношение к суточным вибрациям Земли в целом.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, магнитное склонение, солнечная активность, биосфера

I. ВВЕДЕНИЕ

В ряде работ [1, 2] А.И. Олем показана генетическая связь между процессами, происходящими на Солнце и геомагнитными возмущениями в 11-летней цикличности.

Аналогичная связь чисел Вольфа и индексов магнитной возмущённости $M = (\sum K_p - 10)$ и K_p установлена в работах [3, 4]. При этом авторы работы [4] связывают максимумы K_p на нисходящих ветвях циклов СА с высокоскоростными потоками солнечного ветра (СВ).

Динамика K_p на годовом интервале [4] носит в основном (82 % случаев) выраженный колебательный характер (полугодичная вариация ~ 183 сут) с максимумами, приходящими на весну и осень и минимумом – на июнь-июль месяцы.

Ещё в 1909 г. А.Я. Орлов, исследуя горизонтальные вариации силы тяжести, показал, что в них доминируют суточные компоненты [5]. Однако, не смотря на очевидную необходимость учёта этих данных и доведения до сведений всем заинтересованным организациям, международная служба вращения Земли суточную компоненту «покачиваний» Земли не учитывает.

В данной работе исследована динамика магнитного склонения в течение суток, колебательный характер которой имеет отношение к аналогичным колебаниям всей системы магнитных меридианов магнитного поля Земли и суточным вибрациям Земли в целом.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Наличие данных о значениях магнитного склонения D за длительный период 1973–2005 гг. – внутрисуточных – часовых и среднесуточных, регистрация которых проведена в обсерватории Воейково (Лен. область) и в обсерватории Нурмиярви (Финляндия), позволило

исследовать особенности его динамики в течение года и возможность его связи с изменением индекса магнитной активности K_p на том же интервале. С этой целью определены:

- среднечасовые значения D за каждый год – D_{ij} ($i = 1-12, j = 1-33$);
- линейные тренды для каждого года – T_{ij} ;
- отклонение D_{ij} от T_{ij} – ΔD_{ij} ;
- среднее за весь период (1973-2005 гг.) отклонение – ΔD_i .

Отклонение ΔD_i определяет, по сути, процесс изменения направления вектора магнитного поля Земли (МПЗ) H в течение года относительно среднего линейного тренда вправо от долготного меридиана ($\Delta D_i > 0$) или влево ($\Delta D_i < 0$).

Рис. 1 представляет динамику данного показателя (ΔD_i) в течение года (кривая 1) и скорости его изменения (кривая 2).

Сопоставление хода процессов 1, 2 (рис. 1) и распределения K_p , приведённого в работе [4], на общем годовом интервале показывает следующее.

Максимумы K_p в весенне-осенний период (4-й и 9-й месяцы) соответствуют максимальным (по модулю) значениям скорости изменения ΔD_i (рис. 1, кривая 2), а минимум (6-й месяц года) – нулевому значению скорости (рис. 1, кривая 2), при котором значение ΔD_i минимально (кривая 1).

Полученные данные свидетельствуют о наличии возможной связи между изменением одной из составляющих МПЗ – магнитным склонением (его показателем ΔD_i) и магнитным индексом $\sum K_p$ применительно к исследуемому интервалу.

Исследованы особенности динамики усреднённых за каждый год среднечасовых значений магнитного склонения. С этой целью определены:

- средние часовые значения D в сутках за каждый год – D_{ij} ($i = 1-24, j = 1-33$);
- средние значения D в сутках за каждый год – $D_{срj}$ ($j = 1-33$);
- отклонение D_{ij} от $D_{срj}$ – ΔD_{ij} ($i = 1-24, j = 1-33$);
- среднее за весь период (1973-2005 гг.) отклонение – ΔD_i .



Рис. 1. Динамика отклонения ΔD_i (кривая 1) и скорости его изменения (кривая 2) в течение года

Рис. 2 представляет динамику ΔD_i в течение суток.

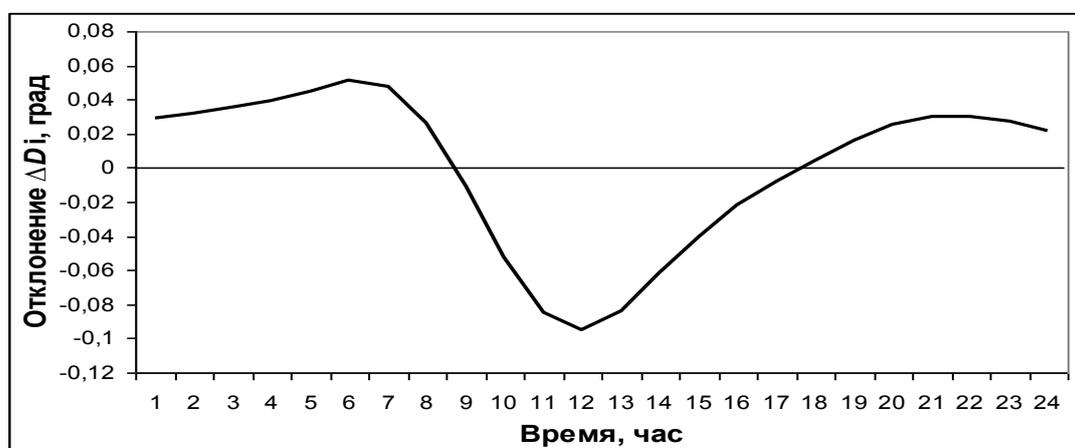


Рис. 2. Динамика отклонения ΔD_i в течение суток

Максимумы показателя приходятся примерно на 6–7 часов утра и 21–22 часа вечера, минимум наступает в полдень. Проведено сопоставление средних для каждого часа вариаций ΔD_{ij} и CA на интервале 1973–2005 гг.

Определены уровни корреляции (с использованием программы Statistica 6), динамика которых на суточном интервале приведена на рис. 3.

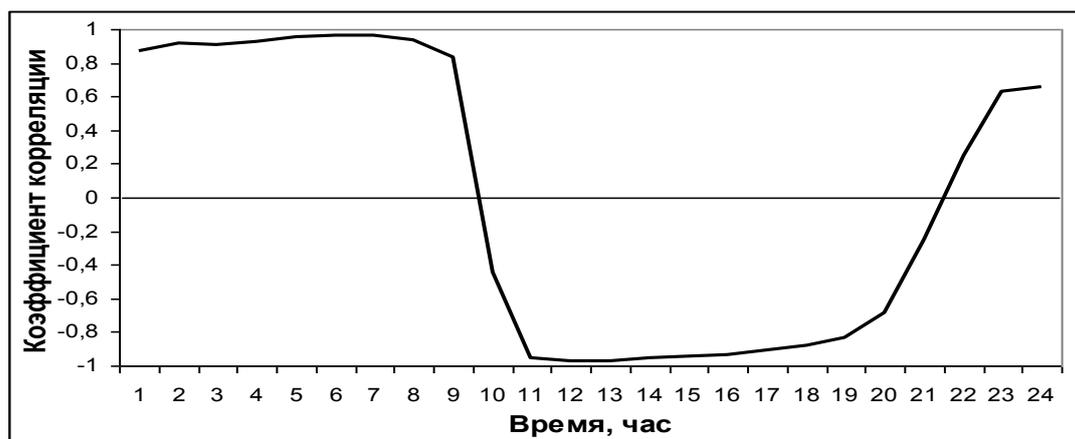


Рис. 3. Динамика коэффициента корреляции вариаций ΔD_{ij} и CA в течение суток

Максимум (0,96) проявлен в 6–7 часов утра, минимум (-0,97) – в полдень (12–13 часов). В период 9–11 часов утра происходит резкое изменение корреляции – положительной на отрицательную. От 19-ти часов вечера

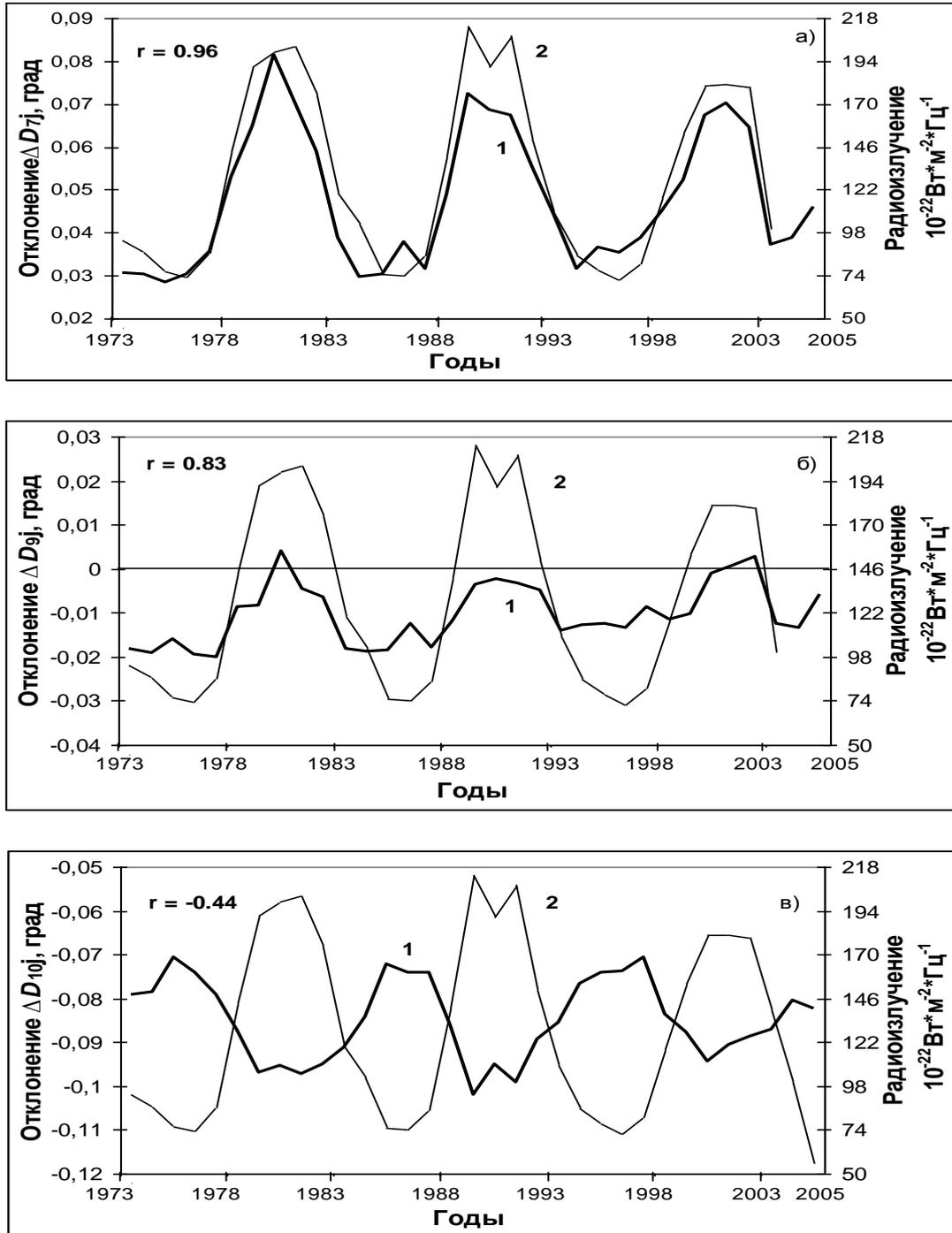
до 1 часа ночи положительное значение корреляции восстанавливается.

Рис. 4 (а-г) представляет динамику отклонения ΔD_{ij} для 7-го, 9-го, 10-го и 12-го часа суток (кривая 1) и СА (кривая 2) в период 1973–2005 гг.

Динамика ΔD_{9j} и ΔD_{10j} для 9-го и 10-го часа суток на рис. 4 (б, в) является промежуточной, иллюстрирующей переход, при котором корреляция между ΔD_{ij} и СА меняется от максимальной положительной (0.96, рис. 4-а) через 0.83 (рис. 4-б) и -0.44 (рис. 4-в) на

максимальную (по модулю) отрицательную (-0.97, рис. 4-г).

Снижение уровня корреляции сопровождается переходом диапазона изменения показателя ΔD_{ij} в область отрицательных значений. Одновременно изменяется вариабельность показателя: снижается – с уменьшением корреляции от максимума к нулевому значению, затем повышается с увеличением (по модулю) отрицательной корреляции.



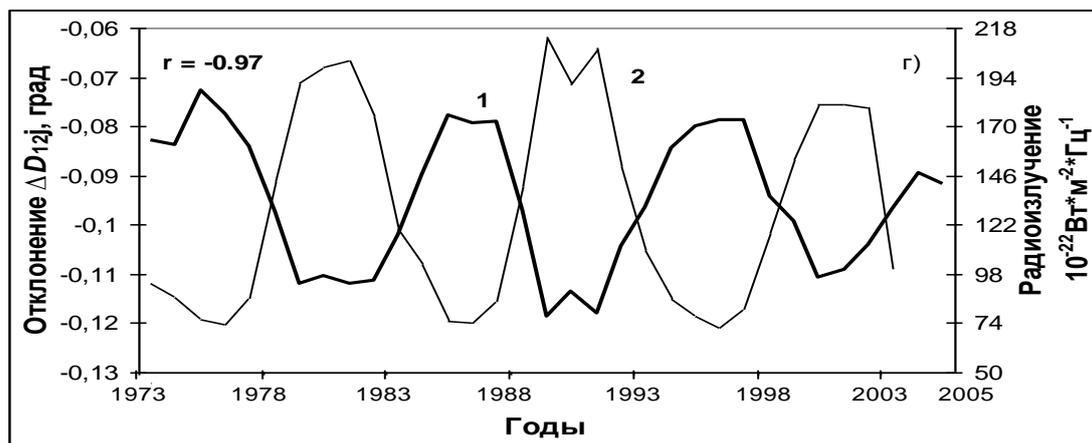


Рис. 4. Динамика отклонения ΔD_{ij} (кривая 1) для 7-го (а), 9-го (б), 10-го (в) и 12-го (г) часа суток и СА (кривая 2) в период 1973–2005 гг.

Высокие (по модулю) значения корреляции ΔD_{ij} и СА на интервалах 1–9 и 11–19 часов ($>0,8$) свидетельствуют о наличии возможной связи между изменением одной из составляющих МПЗ – магнитным склонением (его показателем ΔD_{ij}) и СА применительно к суточному интервалу.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные данные позволяют говорить о наличии связи между изменением одной из составляющих магнитного поля Земли – магнитным склонением и магнитным индексом ΣK_p (или числом магнитных бурь) применительно к годовому интервалу. Динамика усреднённых за каждый год из интервала 1973–2005 гг. среднечасовых значений магнитного склонения, соответствующих 6–7 часам утра и полдню — 12–13 часам, проявляет достоверную корреляцию с вариациями СА.

Рассмотрение карты магнитных меридианов для северного полушария и сопоставление относительного расположения (в системе координат φ – широта и λ – долгота) южного магнитного полюса (ЮМП – в северном полушарии) и обсерваторий Воейково и Нурмиярви позволило ранее заметить следующее. Сближение ЮМП с северным географическим полюсом, осуществляемое с начала XX века, сопровождалось последовательным увеличением магнитного склонения,

регистрируемого в обеих обсерваториях. Причём оба процесса – изменение координат ЮМП и склонения оказались синхронизированными. Было высказано предположение, что изменения склонения всего лишь в двух пунктах отражают изменения глобального поля Земли (карты магнитных меридианов).

Результаты работы позволяют предположить наличие ещё одного механизма влияния СА на биосферу – колебательный характер изменения магнитного склонения в течение суток, определяющий аналогичные колебания всей системы магнитных меридианов МПЗ и вибрации Земли в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Оль А.И. Индексы возмущённости магнитного поля Земли и их гелиогеофизическое значение // Труды Аркт. и Антаркт. науч. исследов. института. Т. 289. 1969. С. 5-21.
- [2] Оль А.И. О физической природе 11-летней вариации магнитных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия. 1971. С. 647-650.
- [3] Белашов В.Ю. О влиянии магнитосферной возмущённости на ротационный режим Земли. Препринт. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР. 1984. 17 с.
- [4] Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Кожухов М.В., Павлов Ю.С. Динамика КР-индекса геомагнитной активности для семи солнечных циклов (в период 1932-2014 годов). Сезонные вариации // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Т. 167. № 6. 2018. С. 48-56.
- [5] Орлов А.Я. Избранные труды. Т. 2. Киев: Изд. АН УССР. 1961. 320 с.

Система сопровождения индивидуализированного адаптивного общедоступного предметного обучения как база для организации углубленной целевой подготовки студентов по специализации «Исследование магнитного поля Земли»

А. С. Чирцов¹, О. С. Алексеева²

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹alex_chirtsov@mail.ru, ²o.alek@rambler.ru

Т. А. Чирцов

Российский государственный педагогический
университет им. А.И. Герцена
teamheightline@mail.ru

Аннотация. Рассматривается идеология, функционал и реализация электронной системы сопровождения индивидуализированного адаптивного массового обучения. Анализируются результаты апробации системы в реальном учебном процессе в СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ЗПУ им. Герцена и Губернаторском физико-математическом лицее ФМЛ 30. Обсуждаются варианты использования системы электронного сопровождения обучения для усиленной подготовки студентов ЛЭТИ в рамках проекта «Исследование магнитного поля Земли».

Ключевые слова: адаптивное обучение, образовательные траектории, индивидуализированное обучение, искусственный интеллект, магнитные взаимодействия, магнитное поле Земли

I. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение качественного фундаментального физико-математического образования в рамках современной подготовки будущих инженеров представляет собой во многом сложную и противоречивую задачу, в рамках решения которой требуется находить эффективные ответы на следующие вызовы:

1. обеспечение различного содержания и глубины изложения материала в зависимости от будущей профессиональной ориентации обучаемых;
2. обеспечение параллельной эффективной подготовки обучаемых с сильно различающимся уровнями начальных знаний и навыков, мотивации и амбициозности;
3. обеспечение быстрой адаптации предметного обучения к перманентно меняющимся приоритетам прикладных исследований и прорывных разработок и, как следствие, требованиям к подготовке со стороны работодателей.

Системное решение перечисленных проблем на фоне устойчивых тенденций к сокращению количества

аудиторной часов, отводимых на фундаментальную подготовку, может быть успешным лишь в случае перехода к массовому индивидуализированному обучению, адаптируемому к интересам и возможностям всех участников образовательного процесса. Разработка и внедрение системы электронной поддержки описанного подхода к обучению на протяжении нескольких лет ведется на базе кафедры Физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Перспективы развития на базе Электротехнического университета нового и подразумевающего широкое привлечение учащейся молодежи проекта на стыке геофизики и прикладных аспектов электромагнитной теории весьма интересны с точки зрения использования имеющихся разработок и опыта по адаптивному индивидуализированному обучению физике для быстрой организации углубленного обучения в области земного магнетизма, традиционное изложение которой в рамках стандартных курсов физики для технических Университетов выглядит явно недостаточным.

На примере преподавания раздела «Электромагнетизм» в рамках общего курса физики в технических Университетах и физико-математических лицеях рассматривается система цифрового сопровождения адаптивного многоуровневого индивидуализированного широкодоступного обучения. Подход допускает простой переход между очной, удаленной и смешанной формами обучения. В ходе решения актуальной, но весьма сложной и амбициозной задачи, используется опыт российских научно-педагогических школ, результаты цифровизации и максимально деликатное сочетание дополняющих друг друга возможностей естественного и искусственного интеллектов.

II. ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА СОПРОВОЖДЕНИЯ

Ресурсоемкость индивидуализированного обучения делала его реалистичным только в элитарном обучении сегменте образования и репетиторстве, однако, в настоящий момент сложились предпосылки для

успешной его демократизации. Они обусловлены масштабной цифровизацией образования, ускоренной в условиях пандемии 2020х годов массовым переходом на удаленное и смешанное обучение. Естественным ответом на возникший дефицит в качественном контенте, ориентированных на специфику образовательных процессов в различных вузах, стали попытки обменов имеющимися ЭОР и их объединения в коллекции. Процесс был затруднен закрытостью электронных учебных ресурсов, как правило, сосредоточенных в обучающих средах Moodle [1], не ориентированных на открытый доступ извне. В результате возникла идея создания открытого электронного ресурса для свободного поиска и обмена образовательным контентом. Ее естественным развитием стала амбициозная задача создания и внедрения в учебный процесс среды, обеспечивающей индивидуализированное сопровождение не только различающихся между собой курсов и программ физики, но и каждого обучаемого в отдельности в соответствии с его индивидуальными персонифицированными запросами и возможностями.

Результатом явилось создание цифровой среды сопровождения Системы Многоуровневого Интенсивного Массового Индивидуализированного Адаптивного Предметного Обучения, основанного на объединении опыта и кадрового потенциала российских научно-образовательных школ с новыми возможностями цифровых и телекоммуникационных технологий при деликатной поддержке и сопровождении со стороны искусственного интеллекта, а также практическая апробация ее работоспособности в ведущих технических университетах Санкт-Петербурга (ЛЭТИ и ИТМО), физико-математических лицеях и на площадках зарубежных партнеров.

Базой для выполнения проекта явилось создание многоуровневой электронной среды предметного обучения TuteLine [2], легко адаптируемой к индивидуальным запросам, интересам и возможностям участников образовательного процесса (обучаемых, преподавателей и разработчиков образовательного контента), потенциальных работодателей и учредителей, обеспечивающей:

- открытый доступ к ресурсам всем участникам образовательного процесса и возможность для авторов размещать собственный оригинальный контент в системе при условии его соответствия требованиям качественного обучения;
- возможность самостоятельной или автоматизированной трассировки, сопровождения и оперативной корректировки индивидуальных учебных траекторий в многоуровневом образовательном пространстве (от уровня 1 (учащимся школ) до уровня 6 (специалистам));
- формирование учебных подпространств, объединяющих преподавателей и разработчиков контента и обучаемых в группы (по интересам, симпатиям, традициям научно-образовательных школ, стилям изложения, методам преподавания и т.д.) и возможность создания контента коллективами удаленных авторов;

- эффективное электронное сопровождение учебного процесса в очной, удаленной или смешанной формах, в условиях быстро меняющихся запросов со стороны рынка образовательных услуг и особенностей образовательной политики на государственном и международном уровнях.

Электронная система сопровождения была дополнена интегрированными в среду двумя оригинальными программными средствами для удаленной автоматизированной разработки интерактивных виртуальных моделей сложных физических систем [3] и генерации интерактивных обучающих тестов, поддерживающих диалог виртуального экзаменатора с тестируемым, идея которой вместе с рабочим макетом платформы были предложены в 2019 году [4].

Разработка среды автоматизированной поддержки online конструирования виртуальных физических систем и моделей осуществлялась на базе оригинального метода физического объектно-ориентированного моделирования, представляющего собой сочетание известных методов объектно-ориентированного программирования с принятой в физике идеологией построения единообразного описания весьма разнообразных физических систем. Отличительной чертой созданного конструктора физических («виртуальных») моделей является автоматическая генерация адаптивного программного кода по текстовому описанию создаваемой системы, задаваемому/составляемому пользователем-участником учебного процесса (разработчиком учебного контента, преподавателем или обучаемым).

Основной чертой, объединяющей две подсистемы электронной оболочки, является наличие в ней непрерывно пополняемой (по сходному с реализуемым в социальных сетях механизму) библиотеки учебных ресурсов различных уровней сложности, позволяющей обучаемым самостоятельно отбирать учебный контент, наиболее соответствующий его интересам и способностям, строить свои индивидуальные траектории в образовательном пространстве. Создаваемая платформа следующего поколения StudyWays [5] ориентирована на использование искусственного интеллекта для автоматического сопровождения обучения в электронной среде и генерации на основе получаемых результатов тактических предложений по внесению дополнительных корректировок в запланированные траектории в образовательных пространствах системы. Глобальной целью развиваемого подхода является решение задач обеспечения легкодоступного качественного индивидуализированного многоуровневого обучения в сочетании с частичной передачей наиболее трудоемкой и нетворческой части работы преподавателей технологиям ИИ для высвобождения заметной части их рабочего времени под творческую индивидуальную очную работу с наиболее успешными и мотивированными учащимися.

Все рассмотренные ресурсы размещены в открытом Интернет-доступе и используются в реальном учебном процессе. Система непрерывно дополняется новыми учебными материалами. На основании результатов апробации оперативно вносятся корректировки

функционала электронных платформ, и расширяется набор доступных пользователям сервисов.

В бакалавриатах ЛЭТИ и ИТМО и в ФМЛЗ0 на базе результатов внутреннего удаленного тестирования обучаемых были созданы учебные группы углубленного и традиционного обучения, а также – дополнительного дообучения для отстающих. Мероприятия текущей аттестации и ликвидации академических задолженностей были переведены в электронный автоматизированный режим. Сэкономленное таким образом время успешных и мотивированных преподавателей было перераспределено в пользу углубленного обучения. Вне зависимости от варианта обучения всем обучаемым был открыт доступ к средствам индивидуального подбора контента, выбора образовательных подпространств и трассировки собственных учебных траекторий в рамках курса физики.

III. ИНТЕРАКТИВНЫЙ МОДУЛЬ ТЕСТИРОВАНИЯ

Особенностями электронных обучающих тестов являются автоматическая генерация практически не дублирующих друг друга индивидуальных вариантов, эмуляция диалога системы с тестируемым, предоставление последнему возможности внесения поправок в представленный ответ, автоматический анализ уровня подготовки обучаемого для автоматической подстройки уровня сложности заданий и генерации рекомендаций по дальнейшему изучению материала (вплоть до частичных перетрассировок образовательных траекторий) в зависимости от успешности прохождения заданий тестов.

Каждый тест представляет собой развернутый вопрос по определенной теме курса и возможные варианты ответа. И ответы, и вопросы могут включать как детальные словесные формулировки и определения, так и формулы, рисунки или даже видео и аудиоматериалы. Обучаемому выводится на экран перечень из некоторого числа ответов (как правило, 8–10 вариантов). Число отображаемых ответов устанавливается автором вопроса. Все ответы в системе разбиты на иерархические группы (очевидный, нормальный, каверзный) и имеют разные веса при подсчете результата. Часть ответов при разработке автор может отметить как обязательные, они будут отображаться при любом прохождении теста, остальные ответы выбираются случайным образом, в результате реализуется возможность генерировать порядка 10^{13} вариантов одного теста, что исключает проблему простого зазубривания правильных ответов.

Диалог с пользователем осуществляется посредством «виртуального преподавателя», определяющего сложность теста. В данный момент реализована возможность выбора одного из трех уровней сложности. Самый низкий (легкий) уровень предполагает активную помощь «преподавателя»: в случае наличия ошибок пользователь получает реакцию в виде простой подсказки или наводящего вопроса. На среднем уровне подсказки становятся менее «прозрачными» и требуют от пользователя хороших базовых знаний и способности свободно ориентироваться как в текущей теме, так и в предыдущем материале. На самом сложном уровне «преподаватель» просто констатирует факт наличия ошибки или неполного ответа. Тестирование продолжается до тех пор, пока обучаемый не даст

полного правильного ответа или не нажмет на кнопку «сдаться».

Результат тестирования зависит от количества попыток и количества ошибок в каждой из них. При расчете результата учитывается разница между числом верных (D^+) и ошибочных (D^-) ответов в каждой попытке:

$$\text{Result} = \frac{\sum_{j=1}^N k^{j-1} (D_j^+ - D_j^-)}{D_{\max}^+ \cdot \sum_{j=1}^N k^{j-1}} \cdot 100.$$

Здесь N – общее число попыток, D_{\max}^+ – максимальное количество верных ответов в сгенерированном варианте теста, k – коэффициент, учитывающий степень взаимодействия пользователя с системой, т.е. коэффициент, величина которого определяется количеством исправленных ошибок после подсказки «виртуального преподавателя» и пробегает значения в диапазоне от 0.5 до 0.9. Окончательный результат нормируется на 100. Если учащийся «сдаётся», то он может посмотреть правильные ответы и объяснения, но не получает никаких баллов за прохождение теста.

Посредством взаимодействия с пользователем реализуется также функция обучения самой системы. После начисления баллов, система анализирует полученный результат, используя в качестве базы как статистику данного пользователя, так и общую статистику по данному тесту. Итогом анализа является рекомендация обучающемуся по построению дальнейшего маршрута прохождения курса: в случае неудачного прохождения тестирования система может порекомендовать пройти ту или иную часть курса заново, перейти на предыдущий уровень сложности или предложить смежные курсы, например, по математике, знания которых необходимы для качественного усвоения темы, или, наоборот, предложить пользователю повысить уровень курса, если тест дался ему легко.

В данный момент пройти тест можно в двух режимах – в режиме экзамена или в режиме обучения. Для проведения промежуточной аттестации реализована возможность объединять вопросы в серии.

IV. КУРСЫ ПО ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ

Изучение электромагнетизма играет важную роль в рамках общего курса физики. В настоящее время в системах TuteLine и Study Ways размещены лекционные курсы по электродинамике для трех категорий обучающихся (ученики физико-математических лицеев, студенты технических вузов (стандартная программа), студенты технических вузов (углубленное изучение)). Лекционный курс для усиленного потока содержит подробное изложение следующих тем магнитостатики и электродинамики:

- электрическое поле движущегося заряда;
- механизм возникновения и классическое описание магнитных взаимодействий;
- интегральная и дифференциальная формы записи уравнений магнитостатики вакуума;

- магнитное поле в веществе;
- движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях;
- явление электромагнитной индукции, индуктивность, энергия магнитного поля;
- колебательный контур;
- цепи переменного тока;
- система уравнений Максвелла;
- электромагнитные волны.

Все лекционные материалы сопровождаются обучающими тестами, интерактивными моделями и наборами обязательных для разбора задач, что позволяет закрепить полученные знания на практике.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт внедрения системы в учебный процесс показал ее высокую эффективность как в качестве сопровождения очного обучения, так и в качестве инструмента повышения показателей успеваемости учащихся. Из наиболее значимых результатов стоит отметить следующие:

1. Создана оригинальная работоспособная оболочка для электронного сопровождения системы адаптивного многоуровневого широкодоступного индивидуализированного обучения.
2. На примере кластера «Физика» обеспечено первоначальное наполнение системы, объединяющее более 2000 оригинальных ЭОР, более чем на 80 % перекрывающих программы обучения по физике в ведущих специализированных физико-математических лицеях и гимназиях основных мегаполисов России, а также программ усиленной подготовки по физике студентов технических вузов России.
3. С 2020 года в экстремальных условиях пандемии и смешанных форм обучения осуществлен переход на сопровождение обучения СММИАПО, используемой в качестве базы для изучающих курсы физики в ЛЭТИ, ИТМО и ФМЛ №30; для поддержки самообразования и привлечения в проект квалифицированных преподавателей в открытом Интернет-доступе размещена версия системы 2020 года (http://www.physicsletu.ru/tuteline/login_and_registration).
4. Команда из учащихся усиленного потока по физике ЛЭТИ с 2021 года впервые в истории Университета на протяжении двух лет внедрения системы занимает призовые места на региональной олимпиаде по физике для студентов.

5. Создана и внедрена окончательная версия не имеющего аналогов простого электронного конструктора сложных физических систем, обеспечивающего автоматическую генерацию программного кода виртуальных моделей изучаемых систем (учебного и учебно-научного уровней) по их текстовым описаниям (<https://3dspace.alaska.edu>).
6. Создана и внедрена оригинальная программа автоматизированного интерактивного обучающего тестирования, обеспечивающая авто-генерацию тестов и имитирующая диалог экзаменатора с тестируемым на различных уровнях сложности (<https://www.sw-university.com>).
7. Промежуточные результаты работ неоднократно докладывались на Международных конференциях и публиковались в печати.
8. На базе имеющихся разработок системы адаптивного обучения и уже размещенного в ней содержательного наполнения для вовлечения студентов в проект исследований в области геомагнетизма Земли возможно оперативное создание курса или системы адаптивных модульных курсов, элементы которых так же могут быть включены в последующие и /или альтернативные курсы по смежным дисциплинам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] The word Moodle and associated Moodle logos are trademarks or registered trademarks of Moodle Pty Ltd or its related affiliates . [Электронный ресурс] // Moodle Pty Ltd, 2021, <https://moodle.com>.
- [2] Чирцов А.С., Альтмарк А.М., Лесив Н.А. Система цифрового сопровождения очного и удаленного массового индивидуализированного образования с элементами машинного обучения. // В сб. трудов Межд. Конф. Современное образование: содержание, технологии, качество. 2020. Т. 1. С. 15-20.
- [3] Чирцов А.С., Никольский Д.Ю., Микушев В.М. JAVASCRIPT-генератор интерактивных компьютерных моделей для удаленных курсов (МООС) по физике. // В сб. трудов XV Межд. Конф.: ФССО-2019. 2019. С. 399-403.
- [4] Арзамазов Н.А., Власов А.П., Чирцов А.С. Разработка интеллектуальной системы тестирования для поддержки самостоятельной работы обучаемых при самоподготовке к аттестациям. // В сб. трудов XV Межд. Конф.: ФССО-2019. 2019. С. 305-307.
- [5] Chirtsov T.A. Study Ways [Электронный ресурс] // 2021, <https://sw-university.com/>

Использование последнего поколения индукционных магнитометров при изучении низкочастотных электромагнитных полей

Е. А. Копытенко^{1,2}
¹СПбФ ИЗМИРАН;
²ООО «ВЕГА»
 eugene@vega-geo.net

С. В. Поляков^{2,3}
²ООО «ВЕГА»;
³НИРФИ ННГУ
 poliakovsv@nirfi.unn.ru

Аннотация. В работе приведены основные характеристики и особенности конструкции последнего поколения индукционных магнитометров совместной разработки ООО «ВЕГА», НИРФИ и СПбФ ИЗМИРАН. Особое внимание уделено применению высокочувствительных магнитометров для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач, в том числе задач мониторинга окружающей среды и обнаружение магнитных аномалий различной природы.

Ключевые слова: магнитометр индукционного типа, низкочастотные электромагнитные поля, электромагнитный мониторинг окружающей среды

I. ВВЕДЕНИЕ

Индукционные датчики занимают особое место в группе высокочувствительных прецизионных магнитометров, предназначенных для измерения слабых магнитных полей. Основным свойством, привлекающим потребителей этого магнитометрического оборудования, является простота и надёжность конструкции, что позволяет использовать данный тип магнитометра в очень жестких условиях эксплуатации. Именно это свойство, а также довольно широкий диапазон регистрируемых частот в сочетании с высочайшим для магнитометров соотношением сигнал/шум, нашло своё применение в разведочной поисковой геофизике, где индукционные датчики являются ключевым элементом в методе магнитотеллурического зондирования Земной коры (МТЗ), в задачах электромагнитного мониторинга окружающей среды, а также целого ряда специальных прикладных задач. Низкочастотные индукционные датчики с успехом используются как в глубоководных, так и шельфовых электроразведочных донных станциях.

II. КРАТКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ИНДУКЦИОННЫХ МАГНИТОМЕТРОВ И ИХ МЕСТО В ЛИНЕЙКЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Среди прочих типов датчиков магнитного поля индукционные датчики выделяются простотой конструкции, технологичностью изготовления, доступностью материалов и эксплуатационной надёжностью. На рис.1 представлены диапазоны измерений датчиков магнитного поля различного типа [1]. Справедливости ради необходимо отметить, что приведённую на рисунке диаграмму следует рассматривать как оценочную, так как большинство приборов имеют существенно различающиеся друг от друга частотные характеристики и в ряде случаев сравнение не совсем корректно.

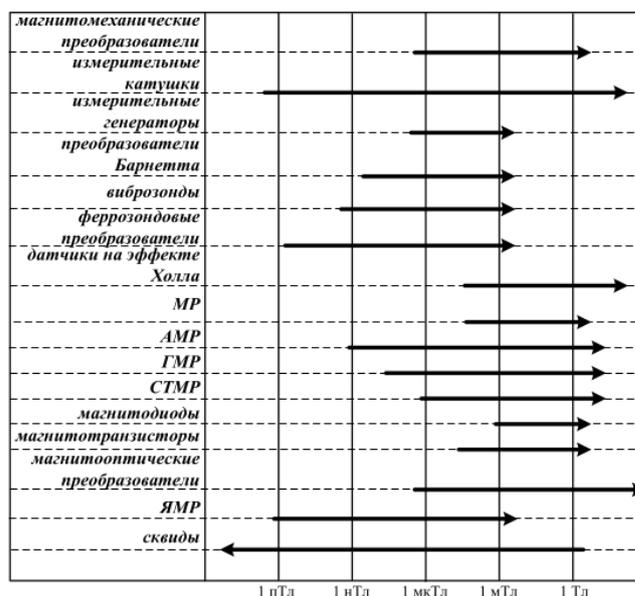


Рис. 1. Диапазоны измерений датчиков магнитного поля различного типа

Датчики магнитного поля подразделяются:

- по принципу используемого эффекта влияния магнитного поля на физические параметры первичного преобразователя;
- по типу измерения магнитного поля – векторные и скалярные;
- по частотным характеристикам для измерения постоянных или переменных магнитных полей

Линейку прецизионных магнитных преобразователей открывают магнитомеханические или магнитоэлектрические магнитометры, использующие свойства постоянного магнита, подвешенного на упругой нити ориентироваться по направлению внешнего магнитного поля. Следующая большая группа магнитометров измерительные катушки или в международной классификации search coils, измерительные генераторы, преобразователи Барнетта, вибронды, феррозонды используют в своей конструкции катушки проводов для преобразования изменяющегося магнитного поля в электрический сигнал. Группа гальваномагнитных датчиков представлена датчиками на основе эффекта Холла, целым набором магниторезистивных датчиков МР,

АМР – анизотропные магниторезистивные преобразователи, ГМР – гигантские магниторезистивные преобразователи, СТМР – спин-туннельные преобразователи, магнитодиоды и магнитотранзисторы. Магнитооптические преобразователи на основе магнитострикционного эффекта. ЯМР датчики на основе ядерного магнитного резонанса с вынужденной прецессией, со свободной ядерной прецессией и с оптической накачкой. Замыкают список СКВИДы – магнитные преобразователи на основе эффекта Джозефсона, использующие сверхнизкие температуры для преобразования магнитного потока в электрический сигнал.

Среди такого многообразия первичных преобразователей магнитного поля непритязательные индукционные датчики (search coils) нашли своё применение в широком круге прикладных и академических задач высокочувствительной магнитометрии. Этим обусловлен огромный интерес к производству такого типа магнитометров ведущих мировых производителей высокотехнологичных изделий из США (Zonge LLC), Канады (Phoenix Ltd), Германии (Metronix), продукция которых заполнила все ниши их применения, в том числе, и на нашем рынке. Наша страна, несмотря на некоторое отставание в технологической гонке, тем не менее, в этой области приборостроения находится на самом передовом рубеже. За последнее десятилетие были разработаны и поставлены в мелкосерийное производство индукционные датчики практически для всего спектра применений этого типа первичных магнитных преобразователей.

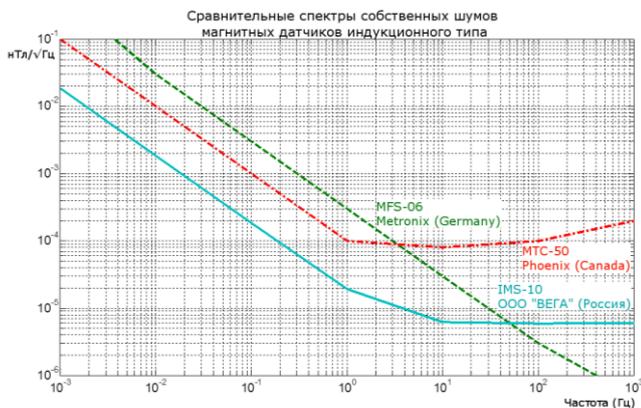


Рис. 2. Сравнительные характеристики шумовых параметров индукционных датчиков различных производителей

Основные параметры отечественных магнитометров серии IMS производства компании «ВЕГА» не только не уступают импортным образцам, но по ряду параметров значительно превосходят иностранные аналоги. На рис. 2 приведены сравнительные характеристики шумовых параметров индукционных датчиков трёх производителей: Канадской компании Phoenix, Немецкой Metronix и Российской ООО «ВЕГА». При прочих схожих параметрах и характеристиках всех приведённых в сравнении приборов российские обладают наилучшими показателями соотношения сигнал/шум.

III. НЕОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКОВ СЕРИИ IMS

На рис. 3 представлен внешний вид датчиков серии IMS.



Рис. 3. Индукционные магнитные датчики IMS-010 и IMS-011

Конструктивно индукционный датчик представляет собой катушку индуктивности с сердечником из ферромагнитного материала в одном корпусе вместе с предварительным усилителем. Для уменьшения собственных шумов за счёт тепловых потерь от эффекта токов Фуко конструкция сердечника выполнена из многослойного ферромагнитного материала. Амплитудно-частотная характеристика такого датчика представляет собой резонансную кривую с линейным ростом амплитуды с частотой на низких частотах и спадом на частотах выше резонансной, вызванным паразитной емкостью обмотки и входной емкостью усилителя.

Для того чтобы получить плоскую амплитудно-частотную характеристику в широком частотном диапазоне, а также минимизировать влияние особенностей каждого конкретного датчика и повысить устойчивость их работы, применяют отрицательную обратную связь по полю. Этот прием использован практически во всех современных конструкциях индукционных датчиков.

При конструировании датчиков серии IMS особое внимание было уделено вопросу оптимизации первичного преобразователя по параметру предельной чувствительности, то есть, это тот минимальный сигнал, который способен зарегистрировать магнитометр.

Низкие собственные шумы магнитометров позволяют при использовании градиентного метода измерений [2] регистрировать сигналы, амплитуды которых много ниже составляющих естественного шумового фона. При совместном использовании магнитометры позволяют перекрыть диапазон частот от 0.0001 Гц до 20 кГц. Такая широкая полоса со стороны высоких частот достигнута благодаря использованию слоистых сердечников из аморфного сплава, секционированных катушек и других конструкционных особенностей, а со стороны низких частот - использованием малошумящих МДМ-усилителей. Встроенная функция калибровки облегчает пользователям выполнение проверки передаточной функции магнитометра непосредственно в условиях эксперимента.

Датчики размещены в прочных водонепроницаемых стеклотекстолитовых трубах. Для защиты от механических воздействий корпус покрыт термоусаживаемой трубкой. С обеих сторон корпус герметично закрыт заглушками, на одной из которых установлен разъем для подключения соединительного кабеля. Малошумящий предварительный усилитель и

буферный усилитель с дифференциальным выходом размещены в общем корпусе с преобразователем и подключаются кабелем через разъем к системе регистрации и источнику питания.

Детальный расчёт индукционного магнитометра с учетом тех или иных требований в конструкции, или определённых параметров преобразования приведён в работе [3].

IV. ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ

Самый широкий частотный диапазон всей линейки индукционных датчиков в сочетании с непревзойдёнными собственными шумами и простотой использования нашли широкое применение в различных областях науки и техники. В сравнении с другими прецизионными высокочувствительными магнитометрами, такими как СКВИДы и квантовые приборы, которые требуют создания непростых дополнительных условий для их функционирования, индукционные магнитометры очень нетребовательны к внешним обстоятельствам. Благодаря этим качествам, они практически не заменимы при проведении современных полевых геофизических и электроразведочных работ с целью дистанционного изучения электрической проводимости Земной коры. На рис. 4 приведён пример построения трёхмерной картинки структуры кажущегося сопротивления в районе выхода на поверхность геотермального источника.

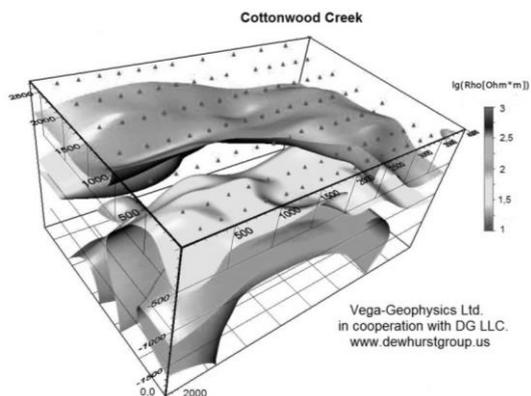


Рис. 4. Трёхмерная картинка распределения кажущегося сопротивления в районе выхода на поверхность геотермальных вод, полученная с использованием датчиков IMS-007

В составе комплексных исследований глубинного строения Земной коры низкочастотные индукционные датчики успешно применяются при проведении электромагнитных зондирований с контролируемым источником, в качестве которого может выступать как специальный геофизический генератор, так и генерирующие низкочастотные сигналы мощные системы навигации и спецсвязи [4].

Интересные новые результаты были получены благодаря исключительным шумовым характеристикам магнитных индукционных датчиков IMS-008 при исследовании тонкой структуры естественного низкочастотного поля Земли в 2010 году на полигоне «Новая жизнь». На рис. 5 отчетливо проявляется частотно-временная структура геомагнитного поля с тремя «Шумановскими» резонансами, а также хорошо прослеживаются такие тонкие особенности электромагнитного поля, как резонансная структура

спектра (РСС), определяемая ионосферным Альвеновским резонатором.

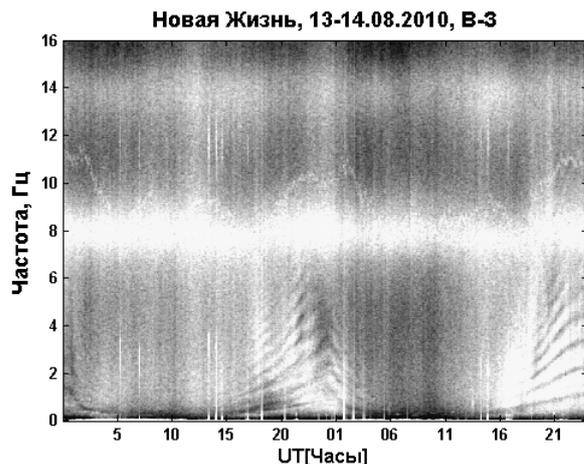


Рис. 5. Суточная спектрограмма, полученная датчиками IMS-008

В настоящее время большой интерес стал проявляться к организации стационарных сетевых многоточечных, так называемых, мониторинговых наблюдений за поведением низкочастотного магнитного поля Земли. Среди них выделяются задачи поиска электромагнитных предвестников сильных землетрясений, задачи мониторинга гидроразрыва пласта ГПР при стимуляции нефтедобычи [5], задачи определения направления на местоположения источника низкочастотного электромагнитного излучения различной природы как естественного происхождения [6], так и стимулированного или вызванного деятельностью человека [7], [8], [9].

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном кратком обзоре невозможно привести все примеры использования индукционных магнитных датчиков. Широкий спектр прикладных задач таких как задачи охраны периметра или магнитометрические средства несанкционированных вторжений МСО [10] остались за рамками данной статьи. Изучение естественных электромагнитных полей на дне акваторий в настоящее время приобрело большой интерес в связи с освоением арктического шельфа. В это нише датчики серии IMS также нашли применение в прототипах донных электроразведочных станций, разработанных в ООО «ВЕГА» [11].

В заключении необходимо отметить, что по состоянию развития современной техники можно с уверенностью сказать, что в лучших образцах индукционных магнитометров достигнут фундаментальный технологический предел физических параметров. Это означает, что с использованием существующих в настоящее время материалов и элементной базы, изготовить магнитометр существенно лучшего качества практически невозможно. Это утверждение касается широкополосных индукционных магнитометров для геофизических и других приложений. В тоже время для решения каких-либо других задач, например, для измерений в относительно узкой полосе частот, могут быть разработаны и изготовлены магнитометры со специально подчёркнутыми, так сказать, заострёнными на определённом качестве требуемыми параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Баранова В.Е. Измерение слабого магнитного поля на основе феррозондового датчика: дис. канд. техн. Наук / НИТПУ Томск, 2015. 134 с.
- [2] Поляков С.В., Резников Б.И., Шлюгаев Ю.В., Копытенко Е.А., Первый опыт пространственной дискриминации крупномасштабных естественных КНЧ помех на примере двухпунктовых измерений магнитного поля от искусственного ионосферного источника // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 12. С.1030-1042.
- [3] Поляков С.В., Резников Б.И., Щенников А.В., Копытенко Е.А., Самсонов Б.В. Линейка индукционных датчиков магнитного поля для геофизических исследований // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52, №1, С.5-27.
- [4] Жамалетдинов А.А., Петрищев М.С., Шевцов А.Н., Колобов В.В., Селиванов В.Н., Баранник М.Б., Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Сергушин П.А., Копытенко Е.А., Бируля М.А., Скороходов А.А., Есипко О.А., Дамаскин Р.В. Электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин ЯНАО в полях естественных и контролируемых источников // Физика Земли. 2013, № 6. С.99-115.
- [5] Григорьев Г.С., Салищев М.В., Пушкарев П.Ю. Возможности электромагнитного мониторинга ГПР для оценки стимулированного объема пород // Геофизика. 2018., №4, С.90-93.
- [6] Kopytenko E.A., Ismaguilov V.S., Kopytenko Yu.A., Kotikov A.L., Hattory K., Hayakawa M. EM monitoring of the Earth's interior and the nearest space environment // CD Proceedings of the 2005 WSEAS, International Conference on Engineering Education, Vouliagmeni, Athens, Greece, July 8-10, 2005. №507-217.
- [7] Поляков С.В., Щенников А.В., Тан Ч. О возможности обнаружения электромагнитных предвестников землетрясений с уровнем ниже регулярного шумового фона // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. LVII, № 7. С.555-567.
- [8] Lenz J. E., Edelstein A. S., Magnetic Sensors and Their Applications // IEEE Sensors Journal. 2006. Vol. 6, № 3. P.631-649.
- [9] Ress N., Heinson G., Conway D. Monitoring hydraulic using telluric sounding // Earth, Planets and Space 2018. 70:7, p.12. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0767-3>.
- [10] Иванов В. Тонкое чутьё магнитного поля Земли // БДИ, №5 (68). октябрь – ноябрь 2006, С.58-60.
- [11] Kopytenko E.A., Palshin N.V., Poljakov S.V., Schennikov A.V., Reznikov B.I., Samsonov B.V. New portable multifunctional broadband MT system // IAGA WG 1.2 on Electromagnetic in the Earth, 20th Workshop Abstract. Giza, Egypt. September 18-24, 2010.

Предобработка информации из мировой сети магнитных обсерваторий INTERMAGNET с применением методов BIG DATA

А. Г. Коробейников

Санкт-Петербургский филиал Федерального
Государственного Бюджетного Учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
Korobeynikov_A_G@mail.ru

О. И. Пирожникова

Университет ИТМО
O.Pirozhnikova10@gmail.com

Аннотация. В настоящее время, в связи с интенсивным накоплением данных на входящих в мировую сеть магнитных обсерваториях INTERMAGNET, активным развитием технологий Big Data и их реализаций в MATLAB, встают задачи, связанные с применением и освоением современного инструментария. В данной работе рассмотрены некоторые подходы для предобработки и краткого анализа больших данных, полученных с магнитной станции «Красное озеро», являющейся структурным подразделением СПбФ ИЗМИРАН и входящей в INTERMAGNET.

Ключевые слова: INTERMAGNET, большие данные, MATLAB, предобработка данных

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире, и, в частности, в России, при работе с большими данными широко применяют методы интенсивно развивающейся технологии Big Data, которая включает разнообразный инструментарий, а также различные методы и подходы, применяемые при обработке больших данных при решении различных задач [1]. Инструментарием в данной работе служит система MATLAB, при помощи которой можно решать задачи в различных предметных областях [2–6].

Понятие больших данных не зависит от объема данных. Это связано с экспоненциальным ростом ресурсов компьютеров. Например, на сегодняшний день принято большие данные измерять в терабайтах, а через некоторое время будут измерять в петабайтах. Исходя из этого, в работе под большими данными, понимаются данные, которые не помещаются в память компьютера. Сами данные находятся на сайте https://www.intermagnet.org/imos/imos-list/imos-details-eng.php?iaga_code=SPG. Эти данные получены на входящей в состав СПбФ ИЗМИРАН магнитной обсерватории «Санкт-Петербург» (международный IAGA-код SPG), информация из которой поступает в международную сеть INTERMAGNET (International Real-Time Magnetic Observatory Network) [7][7].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В связи с постоянным накоплением данных о геомагнитном поле на геомагнитной обсерватории, развитием технологии Big Data и появлением в MATLAB мощного инструментария для работы с большими данными, встала задача освоения работы с этим инструментарием. Причем необходимо, чтобы обработку и анализ больших данных мог проводить исследователь, не являющийся высококвалифицированным специалистом в области программирования в системе MATLAB.

III. ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Для работы с большими данными в представленном ниже тексте показано применение, реализованного в MATLAB, механизма Datastore.

На первом шаге выбираются данные, расположенные на вышеуказанном сайте. В данной работе были выбраны данные за период с 1 января 2018 г. по 31 марта 2022 г. Это текстовые файлы с именами spg20180101qmin.min – spg20220331qmin.min. После этого эти переносим в директорию, которую предполагаем сделать Current Folder во время сеанса MATLAB.

Запускаем MATLAB и входим в «Живой редактор» (LIVE EDITOR). После этого набираем команды:

```
clc; clear;
Fs=1/60; % Частота дискретизации 1 минута
fileName_SPG = 'spg20*.*';
files_Datastores_SPG=fileDatastore(fileName_SPG, 'ReadFcn',...
    @read_SPG_file, 'FileExtensions','.min');
SPG_Datastore = readall(files_Datastores_SPG); SPG=[];
for k=1 : size(SPG_Datastore,1)
    TT=SPG_Datastore{k};
    TT.DATETIME=datetime(TT.DATETIME, 'InputFormat',...
        'yyyy-MM-dd HH:mm:ss.SSS');
    TT=table2timetable(TT); TT = removevars(TT, "DOY");
    SPG=[SPG;TT];
end
SPG = sortrows(SPG, "DATETIME"); clearvars TT; stackedplot(SPG);
```

Запускаем на выполнение. На рис. 1 представлено графическое представление исходных данных.

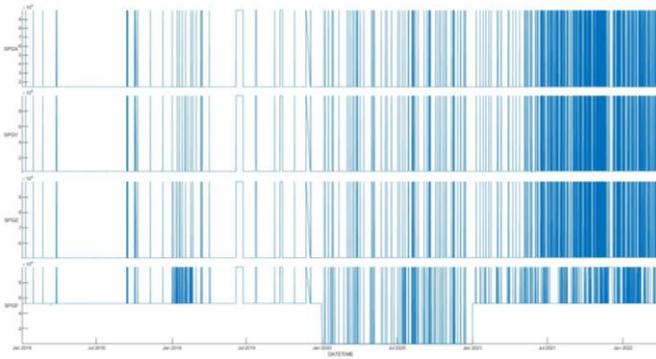


Рис. 1. Графическое представление исходных данных

На рис.1 видно, что исходные данные имеют выбросы, появившиеся в силу различных причин. Например, при сбое в электропитании. Удаление этих выбросов произведем при помощи команд:

```
SPG{find(SPG.SPGX>0.2*summary(SPG).SPGF.Max), ...
["SPGX","SPGY","SPGZ","SPGF"]}=NaN; % Заменяем выбросы
[SPG,missingIndices1] = fillmissing(SPG,"linear");% Замена пропусков
[SPG,outlierIndices] = rmoutliers(SPG,"grubbs","DataVariables","SPGY");
[SPG,missingIndices2] = fillmissing(SPG,"linear",...
"MaxGap",cayears(17),"DataVariables","SPGY");
[SPG,outlierIndices1] =
rmoutliers(SPG,"grubbs","DataVariables","SPGZ");
[SPG,missingIndices3] = fillmissing(SPG,"linear",...
"MaxGap",cayears(17),"DataVariables","SPGZ");
clearvars missingIndices1 missingIndices2 outlierIndices ...
missingIndices3 outlierIndices1; SPG = removevars(SPG,"SPGF");
stackedplot(SPG); % Выводим график с очищенными данными
```

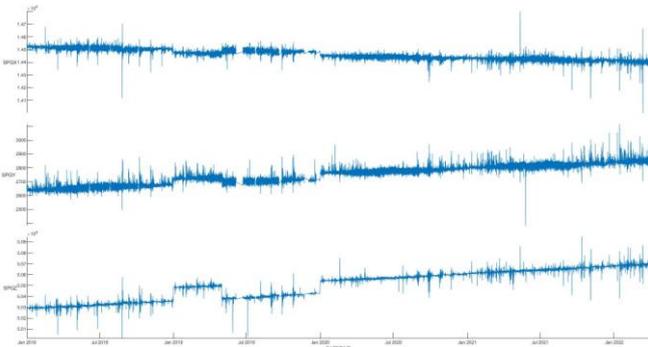


Рис. 2. Очищенные (предобработанные) исходные данные

На рис. 2 видно, что теперь в данных явным образом не наблюдаются выбросы. Дальнейшая работа с этими данными зависит от поставленных исследователю задач. Например, можно выделить тренды. Для примера, выделим по оси SPGF линейный тренд:

```
deg_trend=1; % Тренд - прямая
Z_trend=SPG.SPGZ-detrend(SPG.SPGZ,deg_trend);
stackedplot(timetable(SPG.DATETIME,Z_trend));
```

На рис. 3 представлен тренд в z-компоненте очищенных данных.

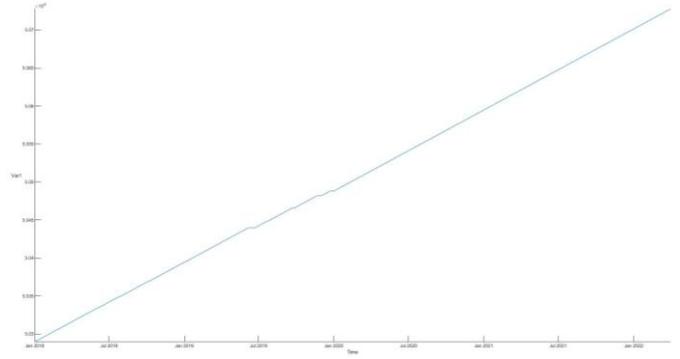


Рис. 3. Тренд в z-компоненте очищенных данных

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из представленного выше исходного текста, MATLAB предоставляет для работы с большими данными достаточно понятный и удобный инструментарий, что позволяет решать различные задачи. Например, представленный на рис. 3 график, позволяют сделать вывод о существовании перемещения магнитного полюса. Для более точного изменения его местоположения необходима дальнейшая работа с данными.

Кроме того, необходимо отметить, что в MATLAB существуют еще инструменты для работы с большими данными. Например, «высокие» массивы (tall array).

Для ускорения расчетов можно использовать параллельные вычисления при помощи worker или графических процессоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Макшанов А.В. Большие данные. Big Data : учебник для вузов / А.В. Макшанов, А.Е. Журавлев, Л.Н. Гындыкарь. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 188 с.
- [2] Амос Гилат. MATLAB. Теория и практика. 5-е изд. / Пер. с англ. Н.К. Смоленцев. М.: ДМК Пресс, 2016. 416 с.: ил.
- [3] Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Разработка модели решения обратной задачи вертикального зондирования ионосферы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 2 (72). С. 109-113.
- [4] Гришенцев А.Ю., Коробейников А. Г. Средства интероперабельности в распределенных геоинформационных системах // Журнал Радиоэлектроники, № 3, 2015.
- [5] Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Декомпозиция n-мерных цифровых сигналов по базису прямоугольных всплесков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 75-79.
- [6] Коробейников А.Г., Гришенцев А.Ю., Святкина М.Н. Применение интеллектуальных агентов магнитных измерений для мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // Кибернетика и программирование. 2013. № 3. С. 9-20.
- [7] Коробейников А.Г. Обработка и анализ данных с российского сегмента мировой сети магнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. № 8. С. 91-98.

Построение годографа на основе компонентных измерений на борту ферромагнитного судна с целью изучения геомагнитного поля

С.А. Иванов

Санкт-Петербургский филиал Федерального Государственного Бюджетного Учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
sergei.a.ivanov@mail.ru

С.А. Меркурьев^{1,2}

¹Санкт-Петербургский филиал Федерального Государственного Бюджетного Учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН;
²Санкт-Петербургский государственный университет
sam_hg@hotmail.com

Аннотация. Исследуется годограф – кривая (Y, X) горизонтальных компонент магнитного поля, измеренных в корабельной системе координат при изменении курса корабля на 360 градусов. Изучается возможность исключить влияние твердого и мягкого железа и определить склонение и величину горизонтальной составляющей магнитного поля Земли. Приведен пример использования годографа с целью оценки положения Южного магнитного полюса по данным кругосветной экспедиции океанографического исследовательского судна «Адмирал Владимирский».

Ключевые слова: компонентный магнитометр, годограф, магнитное поле судна, Южный магнитный полюс

I. ВВЕДЕНИЕ

Измерения компонент магнитного поля Земли на ферромагнитном судне сопряжены с большими трудностями. Влияние магнитного поля корабля, зависит от мягкого и твердого железа в корпусе судна и трудно поддается определению. Кроме того, необходим учет килевой и бортовой качки судна. Тем не менее, измерение компонент перспективно для решения ряда геофизических задач. Здесь мы ограничимся иллюстрацией метода для примерного определения положения Южного магнитного полюса. Подчеркнем, что метод не требует навигационной спутниковой поддержки.

Из работ, описывающих применения компонентных измерений для нахождения компонент поля, укажем на [1, 2]. В [1] рассматривается метод определения на движущемся судне угловых компонент вектора поля, для чего требуется решать систему нелинейных уравнений. В [2] определение компонент поля проводилось при упрощениях, разумных для высоких широт, в частности, в предположении, что вертикальная компонента значительно превосходит горизонтальную. Основным инструментом исследования является годограф – кривая (X, Y) измеренных горизонтальных компонент, полученная или рассчитанная при изменении курса корабля в 360°. Теоретически для построения годографа достаточно знать горизонтальные компоненты на пяти курсах. На рис. 1 приведены варианты девиационных

работ, выполненных в ходе экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский» (2019–2020).

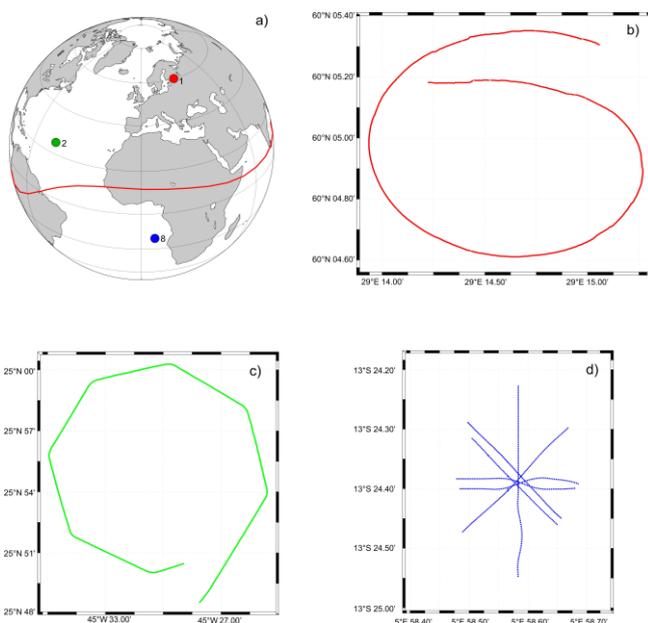


Рис. 1. Разные виды девиационных работ, необходимых для построения годографа

Модельный пример приведен на рис. 2. Без магнитного поля судна годограф представляет собой круг с центром в нуле и радиусом равным величине горизонтальной компоненты H . На магнитном судне годограф есть эллипс общего вида, (рис. 3 слева), где показан годограф, полученный в ходе экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский» (2019–2020).

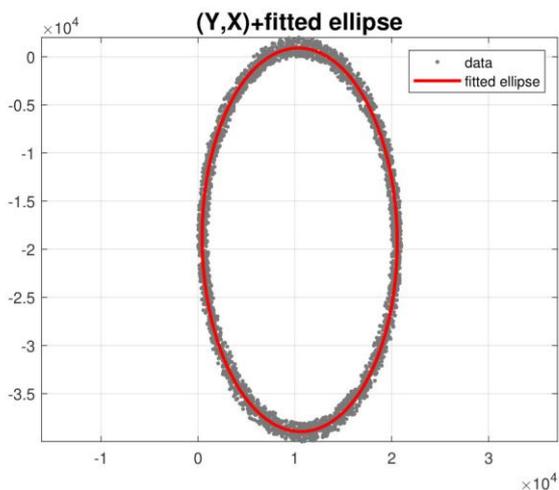


Рис. 2. Модельный годограф

Обычно годограф применялся для устранения девиации [3] и калибровки магнитометров (на воздушных судах есть возможность строить трехмерный годограф, представляющий собой эллипсоид, [3, 4]). Использование годографа для изучения МПЗ авторам неизвестно.

Вместе с тем мы показываем ограниченность метода годографа. В частности, он недостаточен для полного определения поля судна.

II. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ НА СУДНЕ. ГОДОГРАФ

Далее считаем, что вертикальная ось прибора совпадает с вертикалью (поправки на качку здесь не рассматриваются). Магнитное поле T_0 в корабельной системе координат [4] складывается из трех компонент: Внешнее поле $T_{МПЗ}$, часть T_h магнитного поля судна, отвечающая остаточной намагниченности (твердое железо), и зависящая от курса часть поля T_s (мягкое железо), отвечающая наведенной намагниченности:

$$T_0 = T_{МПЗ} + T_s + T_h$$

При этом T_s линейно, через матрицу Пуассона, связано с магнитным полем Земли (МПЗ) $T_s = P T_0$. Далее мы ограничимся, не меняя обозначений, горизонтальной составляющей поля. Для построения годографа необязательно судну проводить полную циркуляцию, достаточно знать горизонтальные компоненты на пяти курсах. На рис. 2 приведены варианты девиационных работ, выполненных в ходе экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский» (2019–2020).

На магнитном судне годограф есть эллипс общего вида. Процедура его обработки следующая. На первом шаге минимизацией подходящего функционала выбирается эллипс, аппроксимирующий данные наблюдений, Второй шаг – это сдвиг эллипса в начало координат, чем исключается влияние твердого железа. Затем поворотом частично исключается влияние «перекрестной» индукции мягкого железа, то есть недиагональных элементов матрицы Пуассона (см. анализ ниже). Последний шаг – масштабирование осей, в результате чего получаем окружность, радиус которой пропорционален H с коэффициентом, зависящим от матрицы Пуассона.

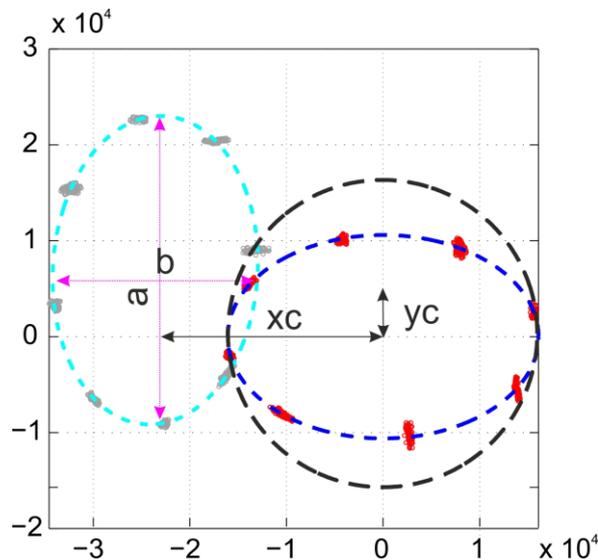


Рис. 3. Обработка данных при построении годографа

В случае симметричной конфигурации мягкого железа на судне и расположения магнитометров в центре судна можно считать, что оси эллипса параллельны координатным осям, рис. 3. В этом случае измерения горизонтальных компонент примут вид

$$X1 = (1 + a)H \cos \alpha + X0$$

$$Y1 = -(1 + e)H \sin \alpha + Y0.$$

Здесь a и e элементы 11 и 22 матрицы Пуассона, α – магнитный курс, $X0$ и $Y0$ – вклад твердого железа вместе с полем, индуцированным компонентой Z . Отсюда компоненты X и Y геомагнитного поля в судовой системе координат получаются простым преобразованием

$$X = H \cos \alpha = (X1 - X0)/(1 + a)$$

$$Y = -H \sin \alpha = (Y1 - Y0)/(1 + e).$$

В частности, легко определяется направление, отвечающее нулевому магнитному курсу.

Разберем случай, когда матрица Пуассона недиагональна и годограф имеет вид наклонного эллипса. Покажем, что приведенный выше алгоритм не позволяет в общем случае восстановить поле.

После удаления постоянной составляющей, отвечающей твердому железу, измерения связаны с компонентами внешнего поля матрицей $Q=I+P$. Эта матрица имеет сингулярное разложение: $Q=U D V$, где U и V матрицы поворота, а D диагональная 2×2 матрица с положительными элементами, $D=[d_1 d_2]$.

Пусть судно совершает циркуляцию. В судовой системе координат вектор H пробегает окружность радиуса H и поворот матрицей V не меняет его. Далее, умножение на диагональную матрицу D превращает окружность в эллипс с осями, параллельными координатным осям и равными d_1 и d_2 . Затем этот эллипс поворачивается матрицей U . Лишь этот поворот годографа заметен на графике, и может быть компенсирован.

Другими словами, поворот эллипса не приводит, вообще говоря, к линейному соотношению между одноименными компонентами.

III. ПРИЛОЖЕНИЕ

Изложенная выше теория была подтверждена в ходе экспедиции. За рейс было выполнено несколько циркуляций (рис. 4, внизу).

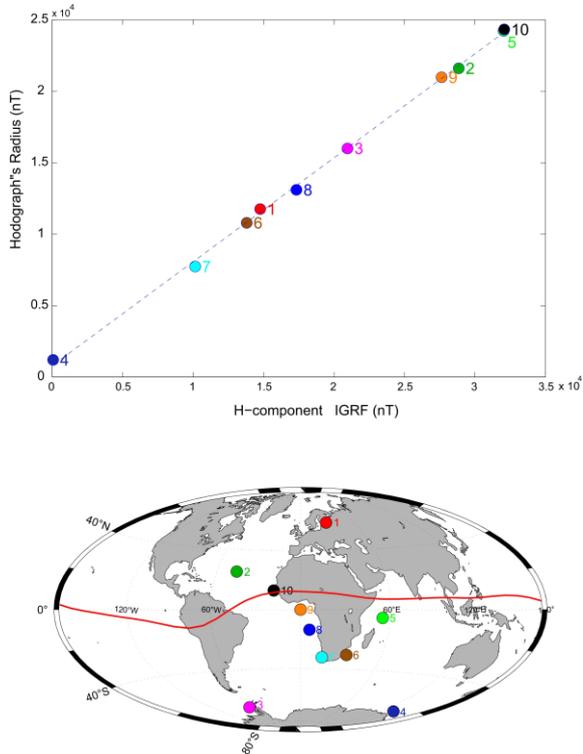


Рис. 4. Точки проведения девиационных работ и зависимость радиуса годографа от значения горизонтальной компоненты

В результате было получено 10 радиусов годографа. Для сравнения в точках циркуляций была вычислена горизонтальная компонента H по модели IGRF, и было получено, что «радиус» годографа (корень из произведения длин полуосей) пропорционален H . При приближении к магнитному полюсу радиус стремится к малой величине, отвечающей шуму и неучтенным колебаниям судна, значит, и осей приборов. В верхней части рисунка 4 приведен график, где по оси X отложены значения горизонтальной составляющей в точках циркуляции, вычисленной по модели IGRF, по оси Y – радиус годографа, полученный по данным ОИС «Адмирал Владимирский». Хорошо видна практически линейная зависимость.

Для экспериментального определения ЮМП было запланировано выполнение полигона в районе его положения, предполагаемого по модели IGRF2015 [5]. С помощью годографов рассчитывалась величина горизонтальной компоненты по полигону, выполненному ОИС «Адмирал Владимирский» в море Дюрвиль. Её локальные минимумы давали виртуальные магнитные полюса (ВМП). Оценку положения ЮМП получали осреднением ВМП. Сам полигон, положения ВМП и результат осреднения показаны на рис. 5. Там же приведено положение ЮМП, вычисленное по IGRF2020.

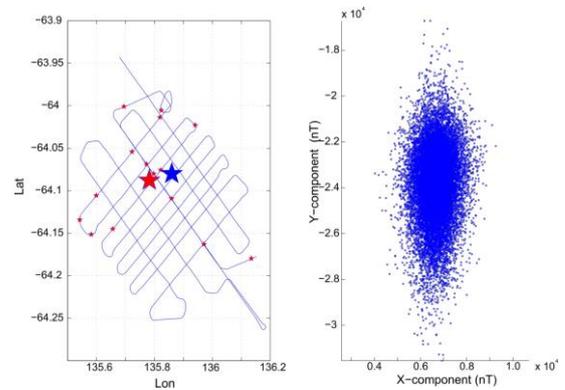


Рис. 5. Получение оценки положения ЮМП в результате обработки горизонтальных компонент магнитного поля. В правой части рисунка показан годограф, построенный по значениям X - и Y -компонент, измеренных на полигоне. В левой части рисунка синими линиями показаны галсы детальной съёмки. Маленькие красные звезды – положение ВМП. Красная звезда – результат осреднения ВМП. Синяя звезда – ЮМП, вычисленный по IGRF2020

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показывает, что использование компонентных магнитометров на борту ферромагнитного носителя имеет будущее. Их применение, хотя и требует решения нескольких методических задач, касающихся как проведения измерений, так и обработки полученных данных, возможно при решении как фундаментальных, так и прикладных задач.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Коллектив авторов выражает благодарность всем, кто принимал участие в доставке оборудования для экспедиции, оперативно организовывал передачу информации, обеспечивал связь и координацию по маршруту следования ОИС «Адмирал Владимирский»:

- научный сотрудник СПбФ ИЗМИРАН лаборатории геомагнитных исследований – Солдатов В.А.
- научные сотрудники отдела геомагнитных исследований СПбФ ИЗМИРАН – к.т.н. Сергушина П.А., Леваненко В.А., Петленко А.В.
- сотрудник 6-ой Атлантической экспедиции к.т.н. Процаенко Сергей Владимирович.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бледнов В.А. Компонентные геомагнитные измерения на борту движущегося ферромагнитного носителя // УФН. Т.164. С. 1001–1005. 1994. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0164.199409i>
- [2] Kopytenko Yu.A., Petlenko A.V., Petrova A.A., Kopytenko E.A., Voronov P.M., Ismagilov V.S., Zaitsev D.B., Timoshenkov Yu.P. Peculiarities of Interpretation of Magnetic Field Components' Data Obtained at high-Latitudes on the Board of Moving Carrier/ Proceedings of the International Conference on Marine Electromagnetic: Marelec97: 23-26 June 1997. London UK, P.1-6.
- [3] Vasconcelos J. F., Elkaim G., Silvestre C., Oliveira P., Cardeira P. Geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame // IFAC Proceedings Volumes. V. 41. Issue 1. P. 172-177. 2008.
- [4] H., Pei X., Li J., Gao H., Bai Y. An improved magnetometer calibration and compensation method based on Levenberg–Marquardt algorithm for multi-rotor unmanned aerial vehicle. Measurement and Control. V.e: 53 issue: 3-4, page(s): 276-286.
- [5] IGRF12. International Geomagnetic Reference Field – The Twelfth generation. Earth, Planets and Space. The special issue, edited by E. Thebaud and C. Finlay. 2015.

Электромагнитные поля на движущемся транспорте

В. С. Исмагилов, Ю. А. Копытенко

*Санкт-Петербургский филиал Федерального Государственного Бюджетного Учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
ivs@izviran.spb.ru*

Аннотация. Описаны исследования проводившиеся сотрудниками СПбФ ИЗМИРАН в 1997–1999 гг. в рамках международного гранта «Коперникус». Целью исследований было определение интенсивности электромагнитных излучений в диапазоне частот $F=0.01–100$ Гц на движущемся транспорте и их влияние на безопасность водителей и пассажиров. Измерения проводились в автобусах, троллейбусах, трамваях, в метро Санкт-Петербурга, а также в электричках и электролокомотивах. В диапазоне частот 2–7 Гц зафиксировано экстремальное увеличение ЭМ поля в кабине электролокомотива и сильное увеличение поля в вагонах электричек оснащенных электродвигателями. В кабинах водителей в метро, в троллейбусах и трамваях при разгонах и торможениях возникают кратковременные магнитные импульсы величиной более 10000 нТл. Для определения влияния ЭМ полей на биологические объекты были проведены эксперименты с мышами, которые подвергались длительному воздействию ЭМ поля в исследуемом диапазоне частот. Выяснено, что такое воздействие в экспериментальной группе приводит к изменению состава крови и к стрессу, не наблюдаемому в контрольной группе мышей.

Ключевые слова: э.м. поля на движущемся транспорте, влияние переменного э.м. поля на биологические объекты

I. ВВЕДЕНИЕ

Влияние электрического тока на организм человека, его опасное и вредное воздействие, проявляющееся в виде электротравм (ожоги, электрические знаки, электрометаллизация кожи, механические повреждения), электроударов и профессиональных заболеваний изучено достаточно хорошо. Однако, механизм воздействия переменных электромагнитных полей на биологические объекты недостаточно изучен. Источниками ЭМП являются атмосферное электричество, геомагнитные поля, промышленные установки, радиолокация, радионавигация, средства теле- и радиовещания, бытовые приборы, внутренние электрические сети в домах.

Данные как отечественных, так и зарубежных исследователей свидетельствуют о высокой биологической активности ЭМП во всех частотных диапазонах, так, например, ЭМП высокой частоты приводят к нагреву тканей организма.

Многочисленные исследования в области биологического действия ЭМП определили наиболее чувствительные системы организма: нервную, иммунную, эндокринную, половую. Биологический эффект ЭМП в условиях многолетнего воздействия накапливается, вследствие чего возможно развитие отдаленных последствий дегенеративных процессов в

центральной нервной системе, новообразований, гормональных заболеваний. К ЭМП особенно чувствительны дети, беременные, люди с нарушениями в сердечно-сосудистой, гормональной, нервной, иммунной системах. Точно доказано, что воздействие ЭМП негативно сказывается на кровообращении головного мозга [1, 2].

Большую опасность представляют электрические и магнитные поля токов промышленной частоты (50 Гц). Для электрического поля промышленной частоты существует гигиенический норматив 5 кВ/м [3], однако специалисты считают, что опасным уже является уровень 0,5 кВ/м. Обычный уровень низкочастотного электромагнитного поля крупного промышленного города соответствует ситуации природной «магнитной бури» (аномально высокой геомагнитной активности).

В данной работе описываются экспериментальные исследования, проводившиеся на электротранспорте в г. С.-Петербурге в 1997–1999 гг. в рамках международного гранта «Коперникус». Целью исследований было определение интенсивности УНЧ электромагнитных излучений в диапазоне частот $F=0.01–100$ Гц на движущемся электротранспорте и их влияние на безопасность водителей и пассажиров. Измерения проводились в автобусах, троллейбусах, трамваях, в метро Санкт-Петербурга, а также в электричках, электролокомотивах, в помещении районной телефонной станции и в телестудии расположенной на небольшом расстоянии от трансляционной телевышки.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерения переменных магнитных полей осуществлялись с помощью трехкомпонентных магнитовариационных станций разработанных в СПбФ ИЗМИРАН.

1. Метро

Магнитные датчики устанавливались в 1 вагоне у ближайшей к водителю переборки. Наблюдается повышение интенсивности ЭМ шума в 2–3 раза во всем исследуемом диапазоне частот. При разгоне и торможении происходит резкое усиление уровня магнитного поля (до 20000 нТл и более) в течение 10–30 сек.

2. Электричка

Магнитные датчики устанавливались в 1 вагоне имеющем электродвигатели. Наблюдается сильное повышение (в 5–10 раз) интенсивности ЭМ шума в диапазоне частот $F=2–7$ Гц. При разгоне и торможении

возникает сильный импульс магнитного поля в течение 10–30 сек.

3. Электролокомотив

Магнитные датчики устанавливались в нерабочей кабине локомотива. На неподвижном электролокомотиве фиксируется повышение уровня постоянного магнитного поля более 100000 нТл (магнитное поле Земли составляет ~60000 нТл). При движении интенсивности ЭМ шума в диапазоне частот $F=1-10$ Гц резко повышается с максимумом на частоте 2–7 Гц. При разгоне и торможении возникает сильный импульс магнитного поля (до 60000 нТл) в течение 20–50 сек.

4. Троллейбус

Магнитные датчики устанавливались в салоне за спиной водителя. При разгоне и торможении возникает сильный ЭМ импульс (более 10000 нТл) длительностью 5–10 сек. При этом токосъемник расположен сразу над головой водителя.

5. Трамвай

Магнитные датчики устанавливались в салоне за спиной водителя. При разгоне и торможении возникает сильный ЭМ импульс (до 10000 нТл) длительностью 5–10 сек.

6. Телефонная станция

Специальные магнитные датчики для регистрации магнитного поля частотой 50 Гц устанавливались в помещении, где расположены трансформаторы и преобразователь переменного тока в постоянный. Обнаружено очень сильное повышение интенсивности колебаний ЭМ поля на частоте 50 Гц – до 300 нТл в магнитном поле. Предельно допустимый уровень превышает в 1.5 раза.

7. Биологические исследования

Биологические исследования проводились в университете города Симферополь на биологическом факультете. Для проведения экспериментов были изготовлены кольца Гельмгольца, создающие магнитное поле. В обмотки колец подавался переменный ток, создающий внутри колец шумовое магнитное поле в диапазоне частот 10–0.01 Гц интенсивностью до 50 нТл. Внутри колец помещалась клетка с подопытными белыми мышами. Контрольная группа мышей воздействию ЭМ поля не подвергалась. По окончании эксперимента длительностью 15 дней определялись изменения в составе крови и в других физиологических

характеристиках. Выяснено, что по сравнению с контрольной группой в физиологическом состоянии экспериментальных мышей произошли изменения характерные для депрессивных состояний.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ритмы, характерные для большинства систем организма человека, лежат в инфразвуковом диапазоне: сокращения сердца 1–2 Гц дельта-ритм мозга (состояние сна) 0,5–3,5 Гц альфа-ритм мозга (состояние покоя) 8–13 Гц бета-ритм мозга (умственная работа) 14–35 Гц. Самым опасным здесь считается промежуток от 6 до 9 Гц.

Как видно из выше изложенного, для человеческого организма наиболее опасно длительное нахождение в моторных вагонах электричек и в кабинах водителей электролокомотивов. Воздействие сильных магнитных импульсов, возникающих в троллейбусах, трамваях и в метро, на организм человека практически не исследовано.

В помещении телефонной станции, где расположены электросиловые агрегаты, зафиксировано сильное превышение ПДУ в интенсивности колебаний ЭМ поля на частоте 50 Гц.

Биологические исследования, проводившиеся над белыми мышами, показали, что при длительном воздействии ЭМ поля в диапазоне частот 10–0.01 Гц в физиологическом состоянии экспериментальных мышей произошли изменения характерные для депрессивных состояний.

В настоящее время электротранспорт сильно изменился, а организм человека – нет, поэтому необходимо повторить описанные эксперименты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гайзетдинова А.М., Гайсина Г.А. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА // Международный студенческий научный вестник. 2018. № 3-1; URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=18230> (дата обращения: 20.04.2022).
- [2] Маньков В.Д. Безопасность жизни и деятельности. Часть II // Безопасность эксплуатации ВВТ: Учеб. пособие для военных ВУЗов. СПб: МО РФ, 2004. 275 с., ил.
- [3] Санитарные правила и нормы. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. СанПиН 2.2.4.1191-03. М.: Госкомсанэпиднадзор России, 2004. 38 с.
- [4] Коптева Н.Н. Влияние электромагнитных волн на организм человека // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 11 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/11/58908>

Определение параметров рыскания судна с помощью компонентных магнитометров

С. А. Иванов

Санкт-Петербургский филиал Федерального
Государственного Бюджетного Учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
sergei.a.ivanov@mail.ru

С. А. Меркурьев

Санкт-Петербургский государственный университет
sam_hg@hotmail.com

Аннотация. Показано, что измерения горизонтальной компоненты магнитного поля на ферромагнитном судне позволяет определить такие параметры как частота рыскания и углы рыскания. При этом частота рыскания определяется из наблюдений в режиме реального времени, в то время как определение максимальных углов рыскания требует предварительных измерений поля на нескольких курсах.

Ключевые слова: компонентный магнитометр; рыскание судна

I. ВВЕДЕНИЕ

Одно из характерных движений судна, идущего постоянным курсом, это рыскание (мы не рассматриваем рыскание в узостях, на якоре, рыскание при близком прохождении встречного корабля). При использовании двух приёмников спутниковой навигации параметры этого движения можно легко определить [1]. При одном приёмнике это уже затруднительно, поскольку отследить отклонение от курса положения оси корабля непросто. Если спутниковая навигация оказывается невозможной, то можно применить для определения параметров рыскания компонентный магнитометр, жёстко связанный с корабельной системой координат.

В работе изучается возможность определения таких параметров рыскания как его частота и максимальный угол при этом для определения частоты (периодичности) не требуется предварительных исследований магнитного поля судна, в то время как для определения максимального угла предполагается использовать так называемый годограф. Годограф кривая образованная парами горизонтальных компонент (X , Y), полученная при изменении курса судна на 360° . Эта кривая, как известно, является эллипсом. Применение годографа известно для калибровки магнитометра, например [2], где предложен алгоритм построения трехмерного годографа – эллипсоида.

Приведенные в разделе 2 теоретические выкладки и рассуждения в разделе 3 иллюстрируются измерениями, полученными в ходе экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский» (2019–2020).

II. МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА СУДНЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ГОДОГРАФА ДЛЯ ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ РЫСКАНИЯ

Далее считаем, что вертикальная ось прибора совпадает с вертикалью (поправки на качку здесь не рассматриваются). Магнитное поле в корабельной системе координат [3] складывается из трех компонент:

Внешнее поле, часть T_h магнитного поля судна, отвечающая остаточной намагниченности (твердое железо), и зависящая от курса часть поля T_s (мягкое железо) отвечающая наведенной намагниченности:

$$T_0 = T_{мпз} + T_s + T_h$$

При этом T_s линейно, через матрицу Пуассона, связано с магнитным полем Земли (теоретически для построения годографа достаточно знать горизонтальные компоненты на пяти курсах). Без магнитного поля судна годограф представляет собой круг с центром в нуле и радиусом равным величине горизонтальной компоненты H геомагнитного поля. На ферромагнитном судне годограф есть эллипс общего вида, но мы будем предполагать, что оси эллипса параллельны координатным осям. Построенные по данным экспедиции годографы позволяют принять такое допущение

В соответствие со сделанными предположениями, измерения горизонтальных компонент имеют вид

$$X1 = (1 + a)H \cos \alpha + X0$$

$$Y1 = -(1 + e)H \sin \alpha + Y0$$

Здесь a и e элементы 11 и 22 матрицы Пуассона, α – магнитный курс, $X0$ и $Y0$ – вклад твердого железа и горизонтальной компоненты поля, индуцированной в мягком железе вертикальной компонентой внешнего поля. Последняя от курса не зависит и может рассматриваться как вклад твердого железа. Отсюда компоненты X и Y геомагнитного поля в корабельной системе координат получаются простым преобразованием

$$X = H \cos \alpha = (X1 - X0)/(1 + a)$$

$$Y = -H \sin \alpha = (Y1 - Y0)/(1 + e).$$

В случае рыскания курсовой угол меняется почти периодически в пределах $\alpha^0 \pm \beta$ со средним α^0 и главные частоты получаются из спектра преобразования Фурье. Максимальный угол рыскания β вычисляется по величине дуги, образованной парами (X , Y) или из полученных графиков зависимости магнитного курса от времени. Ниже выбран второй вариант, как более информативный. Магнитный курс, отвечающий паре (X , Y) точек централизованного годографа, это угол между направленной вверх осью X и прямой, образованной началом координат и этой парой, отсчет идет по ходу часовой стрелки.

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЫСКАНИЯ В БИСКАЙСКОМ ЗАЛИВЕ

A. Определение периода

При прохождении пятикилометрового галса с курсом 30° (при широте примерно 46° и долготе -8°) были измерены компоненты поля X и Y . Для этого использовался годограф, построенный за несколько месяцев до прохождения Бискайского залива. На рис. 1 показаны горизонтальные компоненты (в корабельной системе координат) и курс, построенный по данным GPS. Приведен их спектр, показывающий основную частоту рыскания – с периодом 125 сек. Вклад высокочастотных колебаний корабля, связанный с бортовой и килевой качкой может быть уменьшен фильтрацией и пересчетом компонент с учетом изменения положения осей.

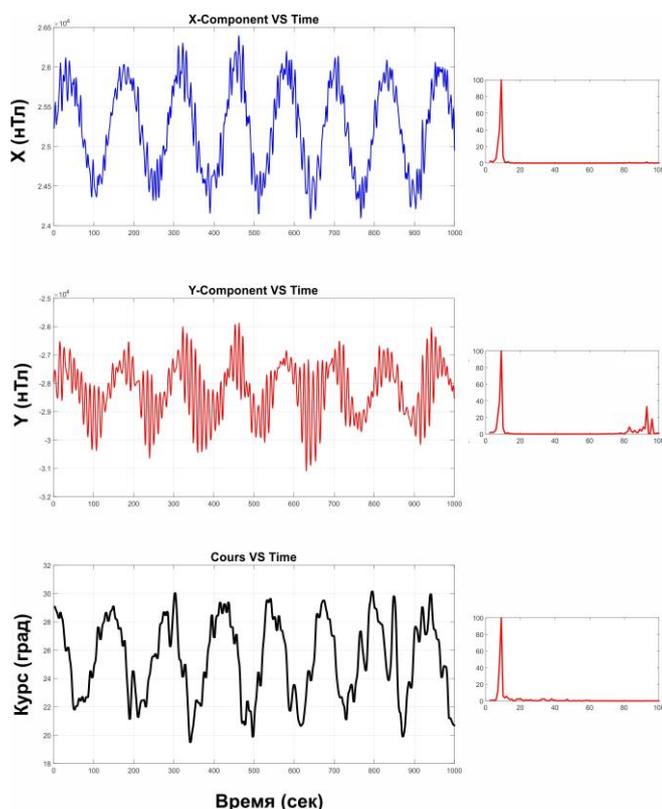


Рис. 1. Графики горизонтальных компонент и курса. Вверху: график X -компоненты от времени и спектральная плотность мощности. В середине: график Y -компоненты и спектральная плотность мощности. Внизу: курс по GPS и его спектральная плотность мощности

B. Определение курса и размаха

На рис. 2 даны зависимости магнитного курса и азимута движения. Первый получен по годографу, второй из данных GPS. Как видно из этого рисунка курс (учитывая склонение) и размах рыскания дают погрешность в 1–3 градуса по отношению к величинам, полученным по данным GPS. Отметим, что часть ошибки может объясняться тем, что судно двигалось лагом, который фиксируется корабельной системой координат, но не фиксируется одним приемником навигационного сигнала.

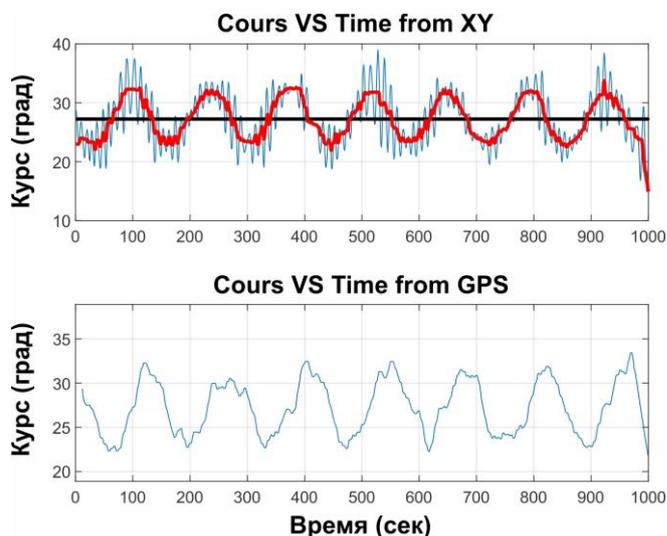


Рис. 2. Определение курса. Вверху: магнитный курс по годографу (голубой), сглаженный магнитный курс по годографу (красный), средний магнитный курс (черный). Внизу: сглаженный курс по данным GPS

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры подтверждают, что компонентные измерения могут помочь навигации, именно, определять такие параметры рыскания как его период и размах. Все это позволяет рассматривать компонентные магнетометры как запасной навигационный комплекс.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Коллектив авторов выражает благодарность всем, кто принимал участие в доставке оборудования для экспедиции, оперативно организовывал передачу информации, обеспечивал связь и координацию по маршруту следования ОИС «Адмирал Владимирский»:

- научный сотрудник СПбФ ИЗМИРАН лаборатории геомагнитных исследований – Солдатов В.А.
- научные сотрудники отдела геомагнитных исследований СПбФ ИЗМИРАН – к.т.н. Сергушина П.А., Леваненко В.А., Петленко А.В.
- сотрудник 6-ой Атлантической экспедиции к.т.н. Процаенко Сергей Владимирович.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Felski A., Mięsikowski M. Some aspects of DGPS based heading determination // Geodezjai Kartografia: kwartalnik naukowy. 1999, z. 3/4, pp. 97-104.
- [2] Wu H., Peil x., Li J., Gao H., and Bai J. An improved magnetometer calibration and compensation method based on Levenberg–Marquardt algorithm for multi-rotor unmanned aerial vehicle // January 2020 Measurement and Control -London- Institute of Measurement and Control. 2019.53(1).DOI:10.1177/0020294019890627
- [3] Кожухов В.П., Воронов В.В., Григорьев В.В. Магнитные компасы: учебник для вузов. М. «Транспорт».1981. 212 с.

Краткосрочные электромагнитные предвестники сильных землетрясений

В. С. Исмагилов, Ю. А. Копытенко

Санкт-Петербургский филиал Федерального Государственного Бюджетного Учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
ivs@izviran.spb.ru

Аннотация. Приводятся результаты исследований краткосрочных электромагнитных предвестников сильных землетрясений в градиентах и фазовых скоростях ультранизкочастотных ($F < 1$ Гц) геомагнитных возмущений. Градиенты и фазовые скорости вдоль земной поверхности определялись по данным группы из трёх высокочувствительных магнитных станций, которые располагались на земной поверхности треугольником на расстоянии ~5 км друг от друга (магнитный градиентометр). Обнаружены аномалии в градиентах и фазовых скоростях за 2–3 месяца и за 2–3 дня перед сильными землетрясениями ($M > 5$). За 1–2 месяца до момента сильного землетрясения направление вектора градиентов поворачивается на эпицентр будущего землетрясения.

Ключевые слова: землетрясение, краткосрочные предвестники, магнитный градиентометр

I. ВВЕДЕНИЕ

В течение сейсмоактивного периода, как правило, происходит много сейсмических толчков различной магнитуды (форшоков). Однако, как указывается в [1] около 50 % сильных землетрясений происходит без форшоковой активности, поэтому исследования предвестников землетрясений несейсмического характера, в том числе УНЧ электромагнитных эмиссий, связанных с очагом будущей сейсмической активности, имеют большое значение для решения проблемы предсказания сильных землетрясений. В сейсмоактивных зонах много лет проводятся многочисленные наблюдения и съемки с целью слежения за движениями коры, сейсмичностью, геомагнетизмом, грунтовыми водами, геохимическими изменениями, выделяющимися газами и др., однако проблема предсказания разрушительных землетрясений еще далека от своего решения. Результаты измерений УНЧ электромагнитных волн ($F=10-0.001$ Гц) в различных сейсмически активных районах показали, что, как на подготовительной стадии развития очаговых зон средних и сильных (магнитуда $M > 5$) землетрясений, так и в период афтершоковой активности, на больших расстояниях от будущего эпицентра могут наблюдаться аномальные УНЧ электромагнитные излучения большой интенсивности. Как правило, эти эмиссии имели шумовой характер и возникали задолго до главного сейсмического толчка и продолжались в течение всей афтершоковой активности. Впервые УНЧ электромагнитные эмиссии наблюдались перед сильными землетрясениями в Армении (Спитак, 1988) [2]. Увеличение интенсивности УНЧ эмиссий наблюдалось и за несколько месяцев перед разрушительным землетрясением в Гуаме (1993, $M = 8$) [3], которое произошло внезапно, без форшоков.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерения параметров геомагнитных вариаций в одной точке на поверхности Земли не позволяют определить направление на источник вариаций. Для этой цели могут быть использованы дифференциальные методы измерений. Одним из таких методов является фазово-градиентный метод, впервые предложенный в [4] для исследования УНЧ геомагнитных вариаций. Этот метод позволяет по трем трехкомпонентным магнитным станциям, расположенным на земной поверхности треугольником на небольшом (~5 км) расстоянии друг от друга (магнитный градиентометр), построить вектора градиентов и фазовых скоростей геомагнитных пульсаций вдоль земной поверхности для любой из трех компонент магнитного поля [5]. Вектора градиентов, как правило, направлены к локальному источнику пульсаций, а вектора фазовых скоростей – от источника. Если имеются два магнитных градиентометра, разнесенных на расстояние ~50 км, то по пересечению направлений этих векторов можно определять местоположение источника (точнее, его проекцию на земную поверхность) – магнитная локация.

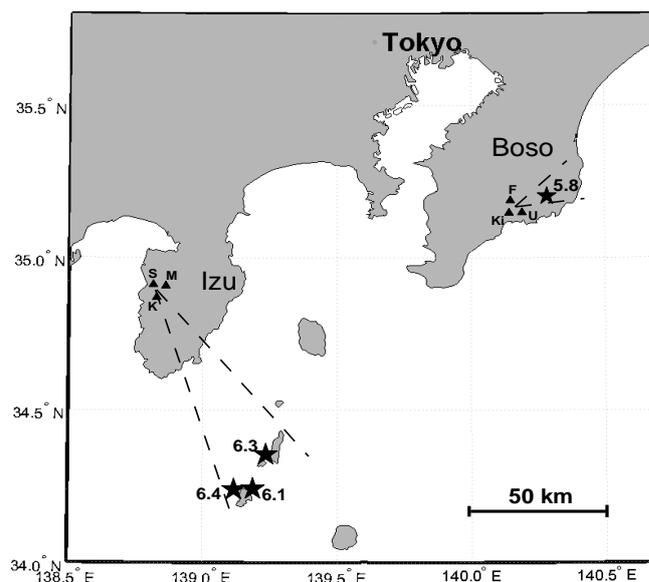


Рис. 1. Расположение магнитных станций и эпицентров сильных землетрясений в Японии

В 1998–2003 гг. в Японии на полуостровах Изу и Босо нами проводилась регистрация вариаций магнитного поля и теллурических токов шестью высокочувствительными цифровыми трёхкомпонентными магнитными станциями MVC-3DS разработанными в СПбФ ИЗМИРАН [6].

На рис. 1 показано расположение магнитных станций (чёрные треугольники) на территории Японии. Три станции расположены на полуострове Изу (Сейкоши, Мочикоши и Камо) и три — на полуострове Босо (Фудаго, Учиура и Киосуми). Дискретность регистрируемых данных составляла 50 Гц, а для синхронизации одновременной работы магнитных датчиков использовалась система GPS на каждой станции. Каждая группа из трёх станций представляет собой магнитный градиентометр и станции в каждой группе расположены на расстоянии 4–7 км друг от друга. Эпицентры землетрясений показаны звёздочками. Цифры рядом с эпицентрами означают магнитуду землетрясения, определённую по 9-балльной шкале в соответствии с классификацией Японского метеорологического агентства. Трёхкомпонентные магнитные станции показаны чёрными треугольниками (S, M, K – Сейкоши, Мочикоши и Камо на полуострове Изу; F, Ki, U – Фудаго, Киосуми и Учиура на полуострове Босо). Эпицентры землетрясений показаны звёздочками. Цифры рядом с эпицентрами означают магнитуду землетрясения. Землетрясения с $M > 6$ произошли в 2000 г., а с $M = 5.8$ – в 2003 г.

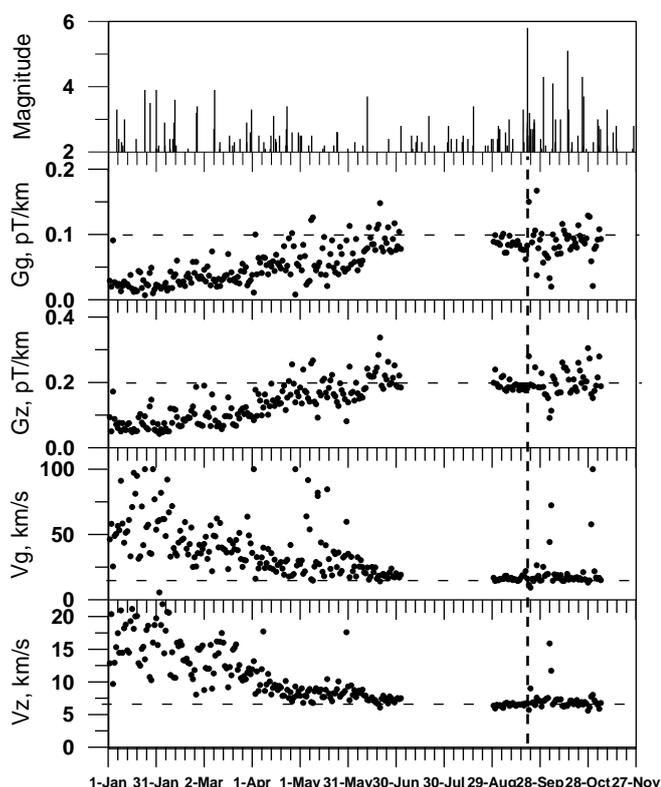


Рис. 2. Градиенты и фазовые скорости геомагнитных эмиссий ($F=0.1$ – 0.4 Гц) до и после землетрясения $M=5.8$ на полуострове Босо (Япония) в 2003 г.

V_g , V_z , G_g , G_z — фазовые скорости и градиенты в полной горизонтальной и вертикальной компонентах магнитного поля. Магнитуды сейсмических толчков ($M > 2$) в окрестности до 50 км от магнитных станций представлены на верхней панели рисунка.

На рис. 2 показано anomalous поведение градиентов и фазовых скоростей геомагнитных эмиссий в частотном диапазоне $F = 0.1$ – 0.4 Гц. Из рисунка видно, что в 2003 г. на полуострове Босо примерно за полгода до момента землетрясения с магнитудой $M = 5.8$, отмеченного на

рис. 2 вертикальной пунктирной линией (эпицентр находился в ~ 15 км к северо-востоку от станции Киосуме), градиенты в полной горизонтальной и в вертикальной компоненте магнитного поля начинают возрастать и достигают своего максимума за 2–3 месяца до землетрясения. В это же время фазовые скорости уменьшаются, и минимальные значения наблюдаются перед землетрясением. Менее выраженное anomalous поведение градиентов и фазовых скоростей наблюдается также и в более низкочастотном диапазоне УНЧ-геомагнитных возмущений. Данные за июль и август 2003 г. отсутствуют.

На рис. 3 показаны гистограммы распределений вероятностей направлений векторов градиентов и фазовых скоростей УНЧ вариаций в диапазоне частот $F=0.03$ – 0.1 Гц (среднемесячные значения) за период январь – октябрь 2003 г. Гистограммы построены по данным магнитных станций, расположенных на полуострове Босо. Распределения строились по полной горизонтальной компоненте магнитного поля. Как указывалось выше, сейсмоактивная область располагалась северо-восточнее полуострова Босо. Левая часть рис. 3 – среднемесячные значения вероятностей направлений векторов градиентов, правая часть рисунка – среднемесячные значения вероятностей направлений векторов фазовых скоростей. Цифры на нижних горизонтальных осях означают: 0° – направление на север (географический), $+90^\circ$ – на восток, -90° – на запад, $\pm 180^\circ$ – на юг. Заштрихованная вертикальная полоса соответствует направлению на будущую сейсмоактивную область и соответствует 30° конусу локации, показанному на рис. 1 пунктирными линиями. Из рис. 3 видно, что за 5–6 месяцев до сильного сейсмического толчка с магнитудой $M=5.8$ в распределении направлений векторов градиентов УНЧ возмущений появилось направление на область предстоящего сильного землетрясения. Это направление отмечено на рис. 4 заштрихованной вертикальной полосой, соответствующей 30° конусу локации, показанному на рис. 1 на полуострове Босо пунктирными линиями. Так же, как и в предыдущем случае, вектора фазовых скоростей направлены в противоположную сторону по сравнению с градиентами и в распределении их направлений также появилось направление от будущей сейсмоактивной зоны.

Похожее anomalous поведение градиентов и фазовых скоростей УНЧ-геомагнитных вариаций наблюдалось также и перед землетрясениями 2000 г. возле полуострова Изу и описано ранее в работах [8, 9]. Сейсмически активный период, в ходе которого произошло три землетрясения с магнитудой больше шести, начался 26.06.2000 г. и продолжался затем более трёх месяцев. Самый сильный сейсмический толчок произошёл 1.07.2000 г. и имел магнитуду $M=6.4$. Эпицентр этого землетрясения был расположен на глубине ~ 15 км под морской поверхностью на расстоянии ~ 85 км к юго-востоку от магнитных станций, размещённых на полуострове Изу и на расстоянии ~ 140 км к юго-западу от магнитных станций (рис. 1).

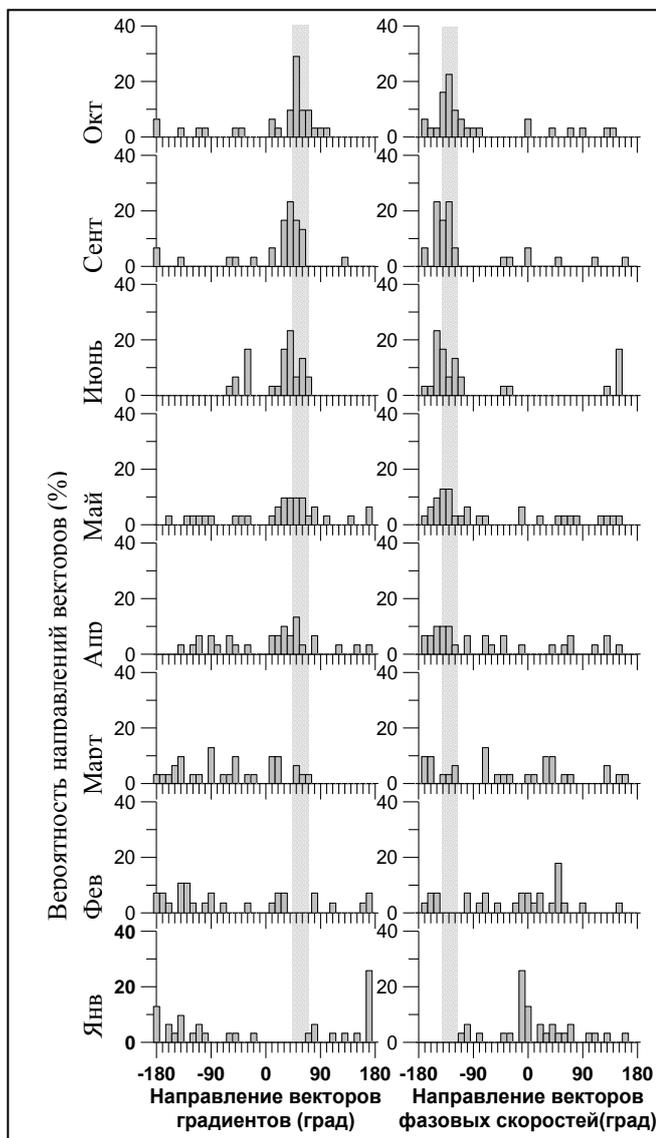


Рис. 3. Вероятности направлений векторов градиентов и фазовых скоростей УНЧ ($F=0.03-0.1$ Гц) геомагнитных возмущений до и после землетрясения ($M=5.8$), п-ов Босо, Япония, 2003 г.

Сейсмическая активность была спровоцирована подъёмом магмы в окрестностях о. Миякедзима (~85 км к юго-востоку от магнитных станций, размещённых на полуострове Изу). В дальнейшем сейсмическая активность была вызвана миграцией магмы на северо-запад вдоль дна моря [7]. Сейсмическая активность в районе полуострова Босо развивалась в течение всего 2003 г. и характеризовалась большим количеством слабых и средних сейсмических толчков ($M < 4$).

На рис. 4 показаны гистограммы распределений вероятностей направлений векторов градиентов (левая часть рисунка) и фазовых скоростей (правая часть рисунка) УНЧ вариаций в диапазоне частот $F=0.03-0.1$ Гц (среднемесячные значения) за период февраль – июль 2000 г., построенные по данным магнитных станций, расположенных на полуострове Изу. Распределения также строились по полной горизонтальной компоненте магнитного поля. Как указывалось выше, сейсмоактивная область располагалась юго-восточнее полуострова Изу и сейсмическая активность началась в конце июня 2000 г.

Из рис. 4 видно, что за 2–3 месяца до начала сейсмической активности в распределении направлений векторов градиентов УНЧ возмущений появилось направление на область будущей сейсмической активности, отмеченное на рис. 4 заштрихованной вертикальной полосой. Эта полоса соответствует 30° конусу локации от магнитных станций на полуострове Изу, показанному на рис. 1 пунктирными линиями. Вектора фазовых скоростей направлены в противоположную сторону (от литосферного источника) и в распределении их направлений появилось направление от будущей сейсмоактивной зоны.

Наблюдаемые на земной поверхности УНЧ геомагнитные вариации являются суперпозицией двух волн – падающей из атмосферы и отраженной в земной коре. В сейсмически активных зонах в точку наблюдения дополнительно еще приходят естественные УНЧ излучения, отраженные от развивающейся в области будущего очага аномалии проводимости, а также и аномальные литосферные УНЧ излучения, о которых речь шла выше. Поэтому развитие тектонических процессов в области будущего очага землетрясения приводит к увеличению амплитуд измеряемых геомагнитных возмущений и, соответственно, их градиентов. Естественные УНЧ геомагнитные пульсации ионосферного происхождения имеют в средних широтах очень маленькие градиенты, как видно на рис.3 (январь – март 2003 г.). Фазово-градиентный метод, применяемый нами для определения градиентов и фазовых скоростей возмущений, позволяет на фоне естественных геомагнитных вариаций выделить градиенты от локальных литосферных источников, расположенных ближе к используемым магнитным станциям, чем ионосферные источники пульсаций. Как мы видим, в распределении направлений векторов градиентов за несколько месяцев до землетрясения появились направления на очаг будущего землетрясения.

Электромагнитные волны, приходящие на земную поверхность из атмосферы имеют скорость распространения электромагнитной волны в воздухе и почти не вносят вклад в наблюдаемую между двумя магнитными станциями фазовую задержку. Поэтому величины фазовых скоростей УНЧ геомагнитных вариаций, наблюдаемые на земной поверхности, определяются, в основном, проводимостью земной коры [10]. Фазовая скорость для плоских гармонических электромагнитных волн в земной среде определяется как $V = \omega/k = \lambda/T = (10^7 \rho/T)^{1/2}$ (здесь ω – частота, k – волновое число, λ – длина волны, T – период волны, ρ – удельное сопротивление земной среды). Для $T=1$ с и $\rho=10^3$ Ом·м $V=10$ км/с.

На рис. 3 и 4 видно, что за несколько месяцев до землетрясения фазовые скорости УНЧ волн начали уменьшаться, а в направлениях векторов фазовых скоростей одновременно появилось направление от очага будущего землетрясения. Вероятно, регистрируемые на полуострове Босо УНЧ электромагнитные волны, возникающие в районе очага будущего землетрясения, распространяются в земной коре по таким трассам от очага до магнитных станций на полуострове Босо, вдоль которых интегральное удельное сопротивление земной среды в несколько раз меньше, чем для трасс, существовавших задолго до момента землетрясения.

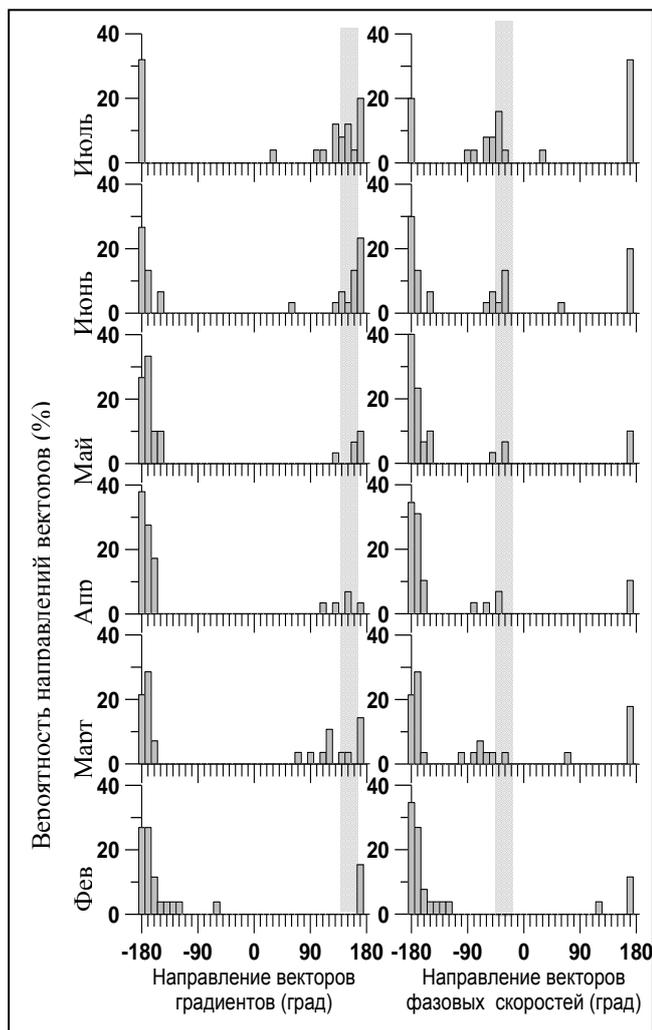


Рис. 4. Вероятности направлений векторов градиентов и фазовых скоростей УНЧ ($F=0.03-0.1$ Гц) геомагнитных возмущений до и в течение сейсмоактивного периода, п-ов Изу, Япония, 2000 г.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что за несколько месяцев до сильных землетрясений ($M > 5$) величины градиентов и фазовых скоростей начинают аномально изменяться. По данным трех магнитовариационных станций, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга (магнитный градиентометр) определено, что в распределении направлений векторов градиентов появляются направления на очаги этих будущих землетрясений. В

распределении направлений векторов фазовых скоростей появляются направления от очагов будущих землетрясений. При наличии двух магнитных градиентометров, разнесенных на расстояние ~ 50 км по направлениям векторов можно определять местоположение будущего эпицентра. Проблема прогноза сильных землетрясений очень сложна и должна решаться комплексно, с привлечением разных видов наблюдений. Исследования УНЧ геомагнитных возмущений могут быть использованы в качестве одного из факторов для осуществления краткосрочного прогноза сильных землетрясений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Mogi K. Earthquake predictions. Japan: Academic Press. 166 P. 1985.
- [2] Kopytenko Yu.A., Matiashvili T.G., Voronov P.M., Kopytenko E.A., Molchanov O.A.. Detection of Ultra-Low Frequency emissions connected with the Spitak Earthquake and its aftershock activity based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories // Phys. Earth and Planet. Inter. V. 77. P. 85–95. 1993.
- [3] Hayakawa M., Kawate R., Molchanov O. A., Yumoto K. Results of Ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993 // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. P. 241–244.
- [4] Копытенко Ю.А., Исмагилов В.С., Копытенко Е.А., Воронов П.М., Зайцев Д.Б. Магнитная локация источников геомагнитных возмущений // ДАН / серия «Геофизика». Т. 371. № 5. С. 685–687. 2000.
- [5] Исмагилов В.С., Копытенко Ю.А., Хаттори К., Хаякава М. Использование градиентов и фазовых скоростей УНЧ геомагнитных возмущений для определения местоположения очага будущего сильного землетрясения // Геомагнетизм и аэрномия. 2006. Т. 46. № 3. С. 423–430.
- [6] Goto T.-N., Sayanagi K., Mikada H. Calibration and running test of torsion magnetometer made in Russia // Rep. of Japan Marin Sci. and Tech. Center (JAMSTEC). 45 (March, 2002). 2002. P. 41–53.
- [7] Uyeda S., Hayakawa M., Nagao T., Molchanov O., Hattori K., Orihara Y., Gotoh K., Akinaga Y., Tanaka H. Electric and magnetic phenomena observed before the volcano-seismic activity in 2000 in the Izu Island Region, Japan // Proc. US Nat. Acad. Sci. 2002. V. 99. No. 11. P. 7352–7355.
- [8] Ismaguilov V.S., Kopytenko Yu.A., Hattori K., Voronov P.M., Molchanov O.A., Hayakawa M. ULF Magnetic Emissions Connected with Under Sea Bottom Earthquakes // Natural Hazards and Earth Sys. Sci., v.1, p. 23–31, 2001.
- [9] Ismaguilov V.S., Kopytenko Yu.A., Hattori K., Hayakawa M. Variations of phase velocity and gradient values of ULF geomagnetic disturbances connected with the Izu strong earthquakes // Natural Hazards and Earth Sys. Sci. v.20, p.1–5, 2002
- [10] Ковтун А.А. Использование естественного электромагнитного поля при изучении электропроводности Земли. Л.: Изд. Ленгосуниверситета. 195 с. 1980.

Мониторинг геофизических параметров полярной ионосферы как основной инструмент исследования магнитосферно-ионосферного взаимодействия

А. Л. Котиков

Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук
andkot54@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования магнитосферно-ионосферного взаимодействия с учетом активной роли высокоширотной ионосферы. Особое внимание уделено методам обработки и анализа спутниковых и наземных данных экспериментов по искусственному возбуждению ионосферы. Показано, что эффект от искусственного воздействия на ионосферу коротковолнового радионизлучения уверенно регистрируется в спутниковых данных по потокам высыпающихся электронов, данных снимков полярных сияний и в вариациях геомагнитного поля на поверхности Земли.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера; авроральное поглощение; активный эксперимент; магнитосферно-ионосферное взаимодействие

I. ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена активно развивающемуся направлению в физике ионосферно-магнитосферных взаимодействий – экспериментам по искусственному возбуждению ионосферы. Воздействие на ионосферу мощным КВ радиоизлучением, прежде всего, приводит к изменению проводимости ионосферы. На границах области неоднородности проводимости возникает электрическое поле поляризации, что приводит к генерации дополнительной мелкомасштабной структуры продольных токов. Возмущения электрического поля и связанные с ним продольные токи передаются в магнитосферу с Альфвеновской скоростью, что может вызывать возмущения во всей цепочке магнитосферно-ионосферной связи, которые могут быть обнаружены экспериментально. Цель данной работы – показать, что эффект от искусственного воздействия на ионосферу коротковолновым радиоизлучением проявляется в спутниковых данных по измерениям потоков высыпающихся электронов, в данных полярных сияний и в вариациях магнитного поля на поверхности Земли. Также, для подтверждения наличия эффекта в электронных высыпаниях, приведены результаты по анализу риометрических измерений. Подобные работы проводились, и их результаты описаны в [Bernhardt, et al, 1991], [Brandstrem, et al, 1999], [Kolesnikova, et al, 2002]. В предлагаемой работе проводится анализ данных активного эксперимента 16 февраля 2003 года на нагревном стенде EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association), расположенного в городе Тромсё.

Эксперимент был приурочен к пролету спутников Cluster над областью нагрева. Так же анализировались данные камеры всего неба (all-sky) расположенной в Килписяarvi и данные риометра IRIS. Передатчик работал в следующем режиме: волна накачки поляризована в X-моду, частота волны накачки 4.04 МГц с периодом 10 минут (5мин. включен / 5мин. выключен).

II. АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

A. Данные сети магнитометров IMAGE

Для построения динамических картин плотности ионосферных токов (электроджетов) использовались записи вариаций магнитного поля на полигоне IMAGE (10-ти секундное разрешение) [Kotikov, et al, 1987], [Kotikov, et al, 1991]. На рис. 1 представлена интенсивность западного (красные изолинии) и восточного (синие изолинии) электроджетов в интервале исправленных геомагнитных широт 54.0 – 78.0 градусов с 16:00 до 23:59 UT. Нагревный эксперимент стартовал в 20:00 UT.

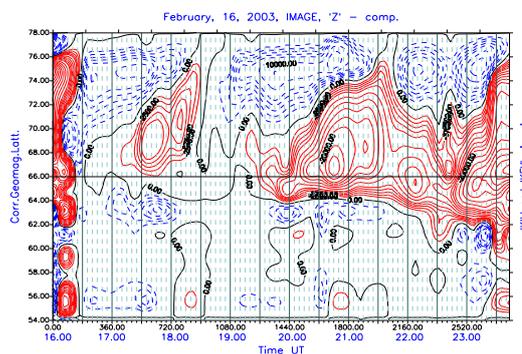


Рис. 1. Плотность ионосферных токов по данным магнитометров IMAGE

Из рисунка следует, что южная граница западного электроджета на подготовительной и начальной фазах суббури стабилизируется на широте нагрева (горизонтальная черная линия) и только во время взрывной фазы граница резко смещается к экватору. В естественных условиях, в отсутствие нагрева, происходит синхронное расширение зоны занятой западным электроджетом как к северу, так и к экватору вплоть до широты ~ 60.0 градусов. С областью занятой западным джетом связывают зону высыпания электронов. Таким образом, эффект работы нагревного

передатчика должен проявиться в модуляции потока высыпающихся электронов.

В. Данные спутников Cluster

В работе использовались данные спутников Cluster европейского космического агентства. В силу того, что четыре спутника образуют правильный тетраэдр, можно проводить измерения в некотором объеме, а не в точке, и разделять пространственные и временные явления. Использовались данные прибора PEACE (Plasma Electron And Current Experiment), который регистрирует плотность электронных потоков в широком диапазоне энергий: от 0.7 до 30 000 эВ с высоким временным разрешением. С использованием модели геомагнитного поля Циганенко T96 [Tsyganenko N.A., Stern D.P., 1999] были спроецированы орбиты спутников вдоль силовых линий магнитного поля на ионосферу, на высоту области нагрева ~100 километров (рис. 2). При этом использовались следующие параметры модели: индекс DST = -27 нТ, компоненты межпланетного магнитного поля $B_y=2.9$ нТ, $B_z=2.3$ нТ, давление солнечного ветра SW=2.5 нПа.

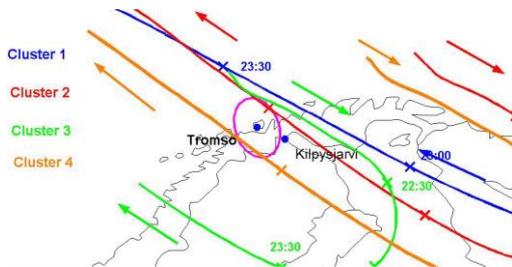


Рис. 2. Проекция орбит спутников на высоту ионосферы

В ходе анализа построенных проекций были получены следующие приближенные интервалы времен пролета спутников над возмущенной областью: Cluster1 – 23:10-23:30 UT, Cluster2 – 23:20-23:35 UT, Cluster3 – 22:00-22:15 UT, Cluster4 – 23:30-23:40 UT. Четвертый и второй спутники пролетели ближе двух других к возмущенной области. Предполагалось, что частота работы передатчика 0.0017 Гц (1/600), может быть зарегистрирована в данных спектров плотности высыпающихся электронов зарегистрированных спутниками Cluster при пролете над областью нагрева.

Первоначально для обработки данных спутников Cluster были применены стандартные методы, такие как оконное преобразование Фурье и вэйвлет-анализ. Однако, первый метод пришлось исключить из-за ошибки, вносимой трендом самого сигнала. Для корректного применения второго метода не хватило длины выборки (время пролета над пятном нагрева не превышает 20 минут). Поэтому был применен метод EMD (Empirical Mode Decomposition) [Huang, et al., 1998]. EMD метод представляет собой итерационную вычислительную процедуру, в результате которой исходные данные (непрерывный или дискретный сигнал) раскладываются на эмпирические моды или внутренние колебания (intrinsic mode functions, IMF). В отличие от гармонического анализа, где модель (дискретного или непрерывного) сигнала задается заранее, эмпирические моды вычисляются в ходе процесса, что и подчеркивается в названии метода. Разложение на эмпирические моды позволяет анализировать локальные явления, поэтому данный метод может быть использован при обработке нестационарных временных рядов (или процессов).

В ходе проведения EMD анализа были получены результаты, представленные на рис. 3. На рисунке приведены: график изменения плотности высыпающихся электронов, соответствующая EMD-мода и рассчитанный для неё спектр Фурье, для каждого из четырех спутников. Панель А – для спутника пролетающего в стороне от области нагрева и панель В – для спутника пролетающего над этой областью. Из графиков следует, что частота модуляции (следовательно и эффект от нагрева) ярче проявляется в спектрах высыпающихся электронов четвертого и второго спутников. В данных величина максимумов значительно меньше. Возможно, это связано с тем, что они пролетели в стороне от пятна нагрева.

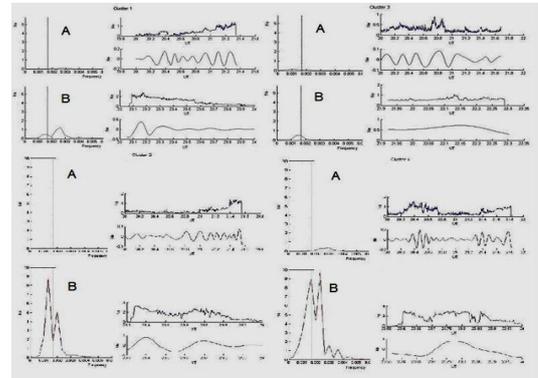


Рис. 3. Результаты анализа EMD для четырех спутников

С. Данные камеры всего неба (all-sky)

В качестве подтверждения наличия эффекта от нагрева на уровне Земли использовались записи сияний, полученных с помощью камеры всего неба расположенной в городе Килписярви. Для обработки снимков использовался пакет программ написанных на кафедре физики Земли СПбГУ [Шибков и др. 2004]. Каждый кадр фильма был спроецирован на плоскость ионосферы на высоту ~100 километров, и разбит на 100 равных частей. Для каждой части кадра высчитывалась величина суммарной светимости, и далее анализировался временной массив значений для всего интервала записи (время проведения нагревного эксперимента). К полученным временным рядам светимости применялось быстрое преобразование Фурье. Результаты показаны на рис. 4. Здесь белым контуром обозначена предполагаемая область нагрева – проекция диаграммы направленности антенны КВ-передатчика на E-слой ионосферы (~ 100 км), черным квадратом область для которой высчитывается светимость. Для анализа было выбрано пять областей на кадре. Три – в предполагаемом пятне нагрева и две – вне него. Для каждого из них рассчитывался спектр Фурье, также представленный на рис. 4.

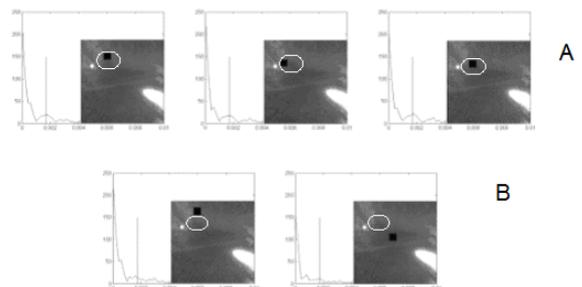


Рис. 4. Результаты обработки данных камеры всего неба

Из анализа результатов, представленных на рис.4 можно сделать следующие выводы:

- в предполагаемой области нагрева наблюдается отчетливый пик в спектре суммарной светимости на частоте модуляции (0.0017 Гц) (панель А);
- вне области нагрева пик на частоте модуляции не наблюдается (панель В).

Полученный результат однозначно указывает на наличие эффекта от работы нагревного передатчика в данных снимков полярных сияний.

D. Данные риометра IRIS

Риометр (riometer – relative ionospheric opacity meter) прибор, который определяет поглощение радиоволны в ионосфере, измеряя мощность космического радиоизлучения. Использование в одном пункте нескольких риометров, работающих на различных частотах, позволяет судить о высоте поглощения области и о профилях электронной плотности в нижней ионосфере. Одновременные же наблюдения с использованием антенн с различными характеристиками направленности дают возможность определить горизонтальную протяженность областей повышенной ионизации ответственных за поглощение радиоволн в высоких широтах [Дриацкий, 1974]. В данной работе использовались пятисекундные данные отображающего риометра IRIS [<http://www.dcs.lancs.ac.uk/iono/iris/>] (Килписярви, Финляндия), антенна которого представляет собой 49 (7*7) лучей, получающих информацию из узконаправленной области. Вместе они отражают двумерную картину риометрического поглощения, которую можно пересчитать на различные высоты из диапазона от 80 км до 120 км.

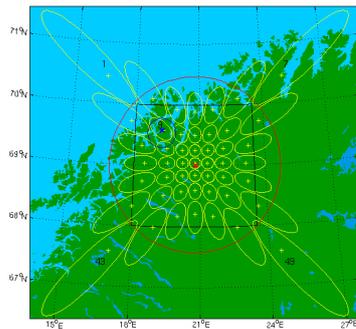


Рис. 5. Схема нагревного эксперимента 16 февраля 2003 года

На рис.5 представлена захваченная обзором риометра область в пересчёте на высоту ~100 км. Большим кругом отмечена область зрения all-sky камеры в Килписярви, небольшим кругом, обозначена область нагрева КВ-передатчика, положение самого передатчика представлено крестиком. Из рисунка следует, что эффект от нагрева вероятнее всего должен проявляться в данных измерений девятого луча, и отсутствовать в несопряженных с областью нагрева секторах.

На рис. 6 представлен результат подсчёта оконного преобразования Фурье с несущей частотой 0.0017 Гц по данным 9-го луча риометра. Сплошной линией на горизонтальной оси отмечен временной интервал, где отчетливо проявился отклик работы нагревного передатчика в спектре уровня риометрического

поглощения, зарегистрированного в девятом луче. Этот интервал соответствует подготовительной фазе суббури, когда в ионосфере уже сформировался E-слой, но максимальные токи, соответствующие взрывной фазе суббури, еще не развились. Взрывная фаза суббури отмечена пунктирной линией на горизонтальной оси. В это время регистрация эффекта от работы нагревного КВ-передатчика, который на несколько порядков ниже суббурового возмущения, не представляется возможной. Во временном интервале от 22 часов UT 16 февраля 2003 года до 01 часа UT 17 февраля 2003 года можно отметить несколько пиков в спектре, соответствующих режиму работы передатчика. При этом эксперимент по нагреву закончился в 23:59 UT.

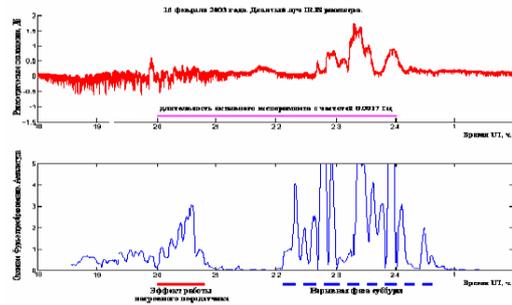


Рис. 6. Результаты обработки риометрических данных

Как и ожидалось, в начале эксперимента с 20 до 21 UT 16 февраля 2003 года значительный пик в спектре уровня аномального поглощения на данной частоте зарегистрирован именно в девятом луче, в остальных 48-ми лучах риометра IRIS подобного пика не наблюдается, что свидетельствует о локальном ионосферном возмущении, связанном с работой нагревного передатчика.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе использовались оригинальные комбинации методов обработки, позволившие выделить «тонкий» эффект от воздействия нагревного передатчика на фоне шумов. Проведенный анализ показал наличие этого эффекта на трех уровнях: Земли, ионосферы и орбит спутников Cluster. Причем следует отметить, что за флуктуации свечения, зарегистрированные с помощью камер всего неба, «ответственны» электроны с энергиями порядка 3–5 кэВ. В спутниковых данных отмечена модуляция потоков плотности электронов с энергиями от 8 до 27 кэВ, а за риометрическое поглощение ответственны потоки высокоэнергичных электронов с энергиями ~ 45 кэВ. Из этого следует, что включение нагревного передатчика создает такие условия в самой ионосфере, которые позволяют магнитосферным частицам различных энергий проникать в ее нижние слои. Так как электроны этих энергий всегда присутствуют в магнитосфере, то можно не рассматривать вопрос о механизме «разгона» электронов до энергий, ответственных за увеличение риометрического поглощения (45 кэВ) за счет работы КВ-передатчика. Тем самым снимается вопрос о несоответствии энергии, закачиваемой передатчиком во время сеансов нагрева с энергией потоков высыпавшихся электронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дриацкий В.М. Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт. Л.: Гидрометеоиздат, 1974.
- [2] Шибков А.С., Пудовкин М.И., Котиков А. Л. Мелкомасштабные продольные токи и движение плазмы в авроральных дугах // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 45 № 4. С. 438-444. 2005.
- [3] Brandstrem B.U.E., Leyser T.B., Steen A., Rietveld M.T. Unambiguous evidence of HF pump-enhanced airglow at auroral latitudes // GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 26, NO. 23, PAGES 3561-3564, DECEMBER 1, 1999.
- [4] Bernhardt, P.A., Scales W.A., Grach S.M., Karashtin A.N., Kotik D.S., and Polyakov S.V., Excitation of artificial airglow by high power radio waves from the SURA ionospheric heating facility, Geophys. Res. Lett., 18, 1477-1480, 1991.
- [5] Kolesnikova E., Robinson T.R., Davies J.A., Wright D.M., Lester M. Excitation of Alfvén waves by modulated HF heating of the ionosphere, with application to FAST observations. //Ann. Geophys., 20, 57-67, 2002.
- [6] Kotikov A.L., Latov U.O., Troshichev O.A. Structure of auroral electrojets by the data from a meridional chain of magnetic stations, Geophysica, 23, pp. 143-154, 1987.
- [7] Kotikov A.L., Bolotinskaya B.D., Gizler V.A., Troshichev O.A., Pashin A.B., Tagirov V.R. Structure of auroral zone phenomena from the data of meridional chains of stations: magnetic disturbances in the nighttime auroral zone and aurorae // J.Atmosph.Terr.Phys., 53, 265-274, 1991.
- [8] Huang, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. //Proc. R. Soc. Lond. A. 1998. T. 454. C. 903-995.
- [9] Tsyganenko N.A., Stern D.P. A new generation global magnetosphere field model, based on spacecraft magnetometer data // ISTP newsletter. V. 6, № 1. p. 21.
- [10] <http://www.dcs.lancs.ac.uk/iono/iris/>

Верификация глобальных моделей аномального магнитного поля (WDMAM и EMAG2) по материалам магнитометрических данных, полученных в ходе кругосветной экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский» (2019–2020)

С. А. Меркурьев^{1,2}

¹Санкт-Петербургский филиал Федерального Государственного Бюджетного Учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН;

²Санкт-Петербургский государственный университет
sam_hg@hotmail

С. А. Иванов

Санкт-Петербургский филиал Федерального Государственного Бюджетного Учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

В. А. Солдатов

Санкт-Петербургский филиал Федерального Государственного Бюджетного Учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

Аннотация. Приводятся результаты сравнения и верификации глобальных моделей магнитных аномалий EMAG2 и WDMAM с магнитометрическими данными полученными в кругосветной экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский» в разных регионах Мирового океана. Это позволило провести сравнительный анализ измеренных значений с вычисленными по глобальным моделям. В результате модель EMAG2 дала лучшее приближение наблюдаемых магнитных аномалий. В то же время амплитуда ряда магнитных аномалий лучше приближалась моделью WDMAM. Как и следовало ожидать, наилучшее приближение было получено в районах ранее проведенных детальных съемок.

Ключевые слова: компонентный магнитометр; рыскание судна

I. ВВЕДЕНИЕ

Наличие моделей геопроостранственных геофизических данных, открывает возможность их использования для решения целого ряда задач фундаментального и прикладного значения.

Распределение геомагнитного поля может быть представлено с помощью различных моделей и цифровых карт (баз данных), которые строятся на основе данных разных типов, разных методов построения и разных способов представления. Наиболее универсальным способом построения модели геомагнитного поля является разложение скалярного магнитного потенциала по сферическим гармоникам. С помощью такой модели можно в любом желаемом месте определить компоненты вектора магнитного поля и его угловые характеристики. Разложение потенциала поля в ряд, используемое в такой модели, было предложено в 1838 г. К.Ф. Гауссом. Это разложение имеет вид [1]

$$\Psi(r, \theta, \varphi, t) = R \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \cdot (g_n^m(t) \cos m\lambda_0 + h_n^m(t) \sin m\lambda_0) P_n^m(\cos\theta_0), \mathbf{B} = -\mu_0 \nabla \Psi,$$

где λ_0 – долгота точки, в которой определяется вектор напряженности, $\theta_0 = 90^\circ - \varphi_0$, φ_0 – ее широта, r – расстояние от центра Земли, R – средний радиус Земли, g_n^m, h_n^m – коэффициенты, определяемые из таблицы [2], $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ кг·м·А⁻²·с⁻² – магнитная постоянная (или магнитная проницаемость вакуума), P_n^m – квазинормализованные по Шмидту присоединенные функции Лежандра. Величины коэффициентов определяются эмпирически с помощью измерений магнитного поля, производимых спутниками. Самыми известными современными глобальными аналитическими моделями, построенными таким способом и используемыми в практике, благодаря свободно распространяемому программному обеспечению и онлайн сервису, являются модели IGRF и WMM.

Международное геомагнитное аналитическое поле International Geomagnetic Reference Field (IGRF) [2] – это самая первая появившаяся глобальная модель, которую предпочитает и разрабатывает академическое сообщество, она является результатом добровольных усилий ряда научных групп, связанных с IAGA [3, 4].

Всемирная Мировая магнитная модель 2005 World Magnetic Model – (WMM) [5] разработана Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA) и Британской геологической службой (BGS). Эта модель используется в военных и гражданских навигационных системах как в США, так и в Великобритании. Обе эти стандартные, конкурирующие модели, построенные разными

научными сообществами по единой идеологии, отличаются лишь наборами коэффициентов и имеют общие ограничения:

- могут использоваться для высот до 600 километров над поверхностью Земли (WGS84 – всемирная система геодезических параметров Земли 1984 года);
- применимы до определенного года;
- имеют ограниченную степень разрешения магнитного поля (длина волны > 3000 км.);
- поскольку используют представления сферическими гармониками до степени $n=12$ (WMM) и $n=13$ (IGRF).

Аналитические модели, в силу принципа их построения, удобно использовать для анализа изменения во времени дипольных и недипольных компонент поля, а также магнитного момента. Эти изменения отражают поведение глубинных источников, расположенных в жидком ядре и ответственных за главное МПЗ.

Однако, для анализа процессов, происходящих в верхней оболочке Земли, тектонических процессов, или решения специальных и прикладных задач, необходим класс моделей более высокого разрешения. Такими моделями, представленными в виде гридов и описывающими магнитное поле земной коры с разрешением во времени 2 угл. мин (3,5 км), являются EMAG2 и WDMAM. Обе эти модели составлены на основе спутниковых, аэромагнитных и морских магнитных измерений, и их можно использовать для разведки ресурсов, навигации в местах, где недоступен GPS (подводные лодки, направленное бурение и т. д.), а также для изучения структуры и эволюции литосферы Земли.

WDMAM – Мировая карта цифровых магнитных аномалий впервые была предоставлена Комиссией по геологической карте мира в 2007 году [8]. Составленный на основе данных правительств и институтов, проект координировался Международной ассоциацией геомагнетизма и аэронавигации (IAGA) и был представлен Майком Пурукером (NASA) и Колин Ривз.

Последняя версия модели WDMAM [9] была принята на 26-й генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геомагнетизма (IUGG). Эта модель вклада литосферы в глобальное магнитное поле, параметризованная сферическими гармониками, была получена до степени 800.

Для построения этих моделей используется другой метод построения и требуется значительно больший объем приповерхностных данных аэромагнитных и морских магнитных измерений.

Ввиду того что в разных районах Земли плотность данных существенно отличается, для построения моделей приходится заполнять пробелы и использовать разные методы интерполяции:

- Версия 1-B WDMAM для заполнения пробелов в этих областях [9] использует синтетические магнитные аномалии, вычисленные на основе возрастной карты дна океана [10, 11]. Поскольку не было предпринято никаких попыток

приспособить модельные аномалии к наблюдаемым, в результате часто преобладают модельные аномалии, амплитуды которых плохо совпадают с данными наблюдений.

- Версия 2-EMAG2v3 – карта земных магнитных аномалий [12], в которой разреженные морские магнитные данные интерполируются с использованием координатной сетки и экстраполируются на основе возрастной карты морского дна [11]. Результат показывает, однако, искусственно удлиненные особенности из-за неправильной интерполяции аномалий, не связанных со спредингом морского дна, а связанных, например, с подводными горами.

Наличие нескольких моделей магнитных аномалий, созданных разными коллективами авторов, использующих различные методы пересчета данных, их увязки и интерполяции, наводит на мысль о сравнении этих моделей. До недавнего времени в литературе не было четкого общего обзора сопоставимого качества этих моделей. Однако такое исследование было выполнено [13] с использованием независимо обработанного набора морских данных, извлеченного из геофизической базы данных Shom (Французская гидрографическая и океанографическая служба) [14].

II. ДАННЫЕ И МЕТОД

В этой работе были оценены пространственные расхождения между рассматриваемыми моделями и независимыми данными с целью сравнения качества этих геомагнитных моделей. В качестве меры расхождения опорных данных и моделей использовались стандартные отклонения. Как показал этот анализ, стандартные отклонения различий между моделями и данными составляют около 65 нТл.

Данные, полученные на ОИС «Адмирал Владимирский», дают возможность вновь обратиться к этой теме и провести сравнительный анализ моделей с использованием нового набора данных.

В данной работе в качестве материала для сравнительного анализа моделей нами использовались независимо обработанные морские магнитометрические данные, полученные на ОИС «Адмирал Владимирский» во время кругосветной экспедиции 2019-2020 гг. Большая часть этих данных представляют собой данные маршрутной морской магнитной съемки, пролегающей в различно изученных районах Мирового океана. Кроме того, нами проведен сравнительный анализ данных систематических магнитометрических исследований, выполненных в районе расположения Южного магнитного полюса (ЮМП).

A. Сопоставление моделей на маршрутных галсах

Рассмотрим результат сопоставления глобальных модельных полей с наблюдаемыми полями в Южной Атлантике во время выполнения маршрутной магнитной съемки. При переходе из Лиссабона в Рио-де-Жанейро, когда позволяли погодные условия, на ОИС «Адмирал Владимирский» проводились измерения заборным модульным магнитометром. Одним из таких районов была Бразильская котловина, расположенная к востоку от Южной Америки. Учитывая генеральное юго-западное направление движения судна на этом переходе,

простираение профиля оказалось под острым углом к простираению линейных магнитных аномалий, имеющих генеральное субмеридиональное простираение [15]. Для этого района характерны магнитные аномалии спредингвого типа позднемелового возраста субмеридионального простираения с номерами А33 (рис. 1).

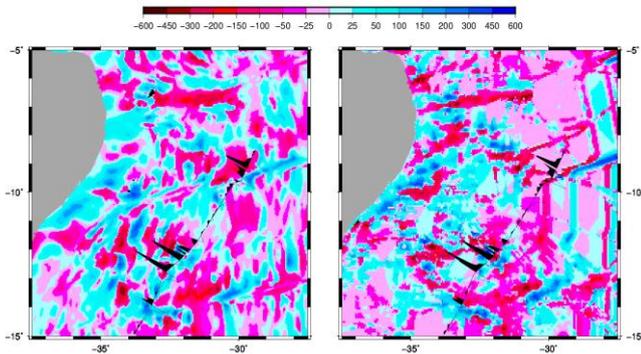


Рис. 1. Карты аномального магнитного поля в районе прохождения маршрутного галса в Бразильской котловине, построенные по глобальным гритдам EMAG (слева) и WDMAM (справа). На обоих картах показаны магнитные аномалии, измеренные на профиле.

С помощью моделей EMAG2 и WDMAM (рис. 1) на том же маршруте были рассчитаны аномальные поля (рис. 2) и проведен сравнительный анализ моделей с наблюдаемыми аномалиями. Были рассчитаны коэффициенты корреляции наблюдаемых аномалий с модельными, полученными с помощью глобальных гритдов. Как видно из рис. 1 и 2, модель EMAG качественно отражает реальное аномальное поле в отличие от поля модели WDMAM. Это связано с тем, что в модели WDMAM интерполяция строится с использованием спредингвой модели, которая часто дает идеализированные формы аномалий.

Результаты этого анализа представлены в таблице.

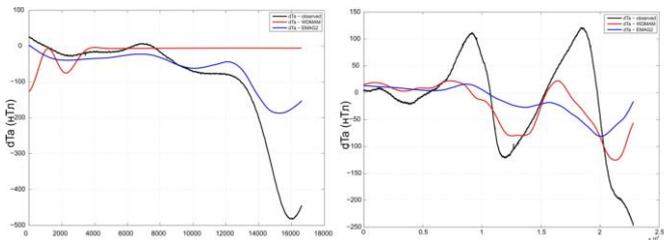


Рис. 2. Пример сравнительного анализа моделей аномального магнитного поля в районе прохождения маршрутного галса в Бразильской котловине. Показаны наблюдаемые фильтрованные аномалии и модельные аномалии для сегмента 2 и 3

В. Сопоставление моделей на основе площадной съемки в море Дюрвиля

В районе предполагаемого положения ЮМП была выполнена детальная площадная магнитная съемка по квадратной системе галсов. Данные модульных измерений были обработаны по обычной схеме, которая включала удаление сбоев и фильтрацию. Учет вариаций проводился за счет увязки профилей по невязкам в точках их пересечения.

Далее в точках наблюдений были получены значения магнитных аномалий с использованием аналитической модели главного поля. В тех же точках были получены аномальные поля (АМП) на основе рассматриваемых

глобальных моделей. На рис. 3 показаны карты сравниваемых аномальных полей.

В результате сопоставления полученных аномальных полей оказалось, что коэффициент корреляции аномального поля, полученного в результате измерений, с модельными полями для модели EMAG2 составляет 0.30, а для модели WDMAM отрицателен и равен -0.74.

Таким образом, аномальное поле, построенное по модели EMAG2, дает некоторое приближение к реальному полю в отличие от аномального поля, построенного по модели WDMAM.

С нашей точки зрения это объясняется тем, что в данной области имеется мало магнитометрических данных, а само поле плохо описывается в рамках двумерных моделей, которые используются в модели WDMAM.

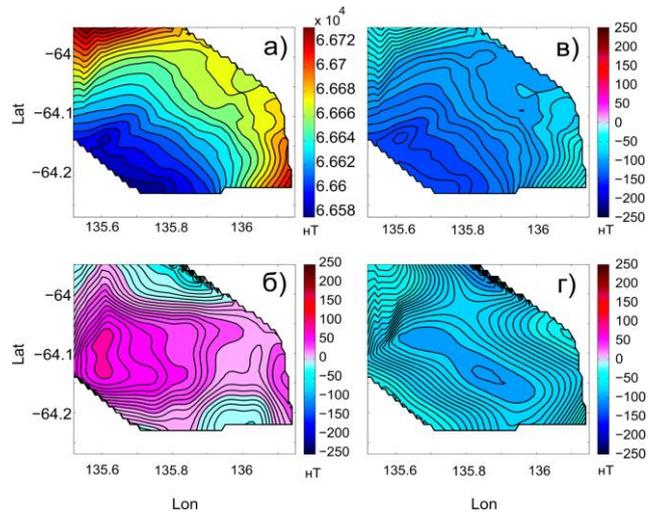


Рис. 3. Карты наблюдаемых и модельных магнитных полей в море Дюрвиля в районе ЮМП. а) карта измеренных значений модуля полного вектора магнитной индукции, построенная по данным детальной магнитной съемки ОИС «Адмирал Владимирский»; б) карта аномального поля после обработки наблюдаемых модульных данных; в) карта модельного аномального магнитного поля по глобальному гритду WDMAM; г) карта модельного аномального магнитного поля по глобальному гритду EMAG

ТАБЛИЦА I

ТАБЛИЦА Коэффициенты корреляции

Table Head	Коэффициенты Корреляции	
	EMAG	WDMAM
Brazil1	0.95	-0.26
Brazil2	0.62	-0.33
Brazil3	0.32	0.73
Brazil4	-0.1	0.42
Brazil5	0.81	0.87
Brazil6	-0.28	-0.27

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная верификация глобальных моделей аномального магнитного поля (WDMAM и EMAG2) по материалам новых магнитометрических данных, полученных в ходе кругосветной экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский» показало, что модель EMAG2 дала лучшее приближение наблюдаемых магнитных аномалий. В то же время амплитуда ряда магнитных аномалий лучше приближалась моделью WDMAM. Как и следовало ожидать, наилучшее приближение было получено в районах ранее проведенных детальных съемок.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Коллектив авторов выражает благодарность всем, кто принимал участие в доставке оборудования для экспедиции, оперативно организовывал передачу информации, обеспечивал связь и координацию по маршруту следования ОИС «Адмирал Владимирский»:

- руководителю экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский», заместителю начальника Управления навигации и океанографии МО РФ Осипову Олегу Дмитриевичу;
- заместителю директора ФГБУ Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова Минлигарееву Владимиру Тимуровичу;
- управляющему директору АО «Южморгеология» Красинскому Егору Михайловичу (Российский геологический холдинг «Росгеология»), начальнику отдела Гравиметрических и магнитометрических морских исследований Григорьеву Евгению Константиновичу;
- сотруднику 6-ой Атлантической экспедиции к.т.н. Процаенко Сергею Владимировичу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Яновский Б.М. Земной магнетизм: Учеб.пособие. Изд. 4-е, перераб. и доп. Под ред. В. В. Металловой. Л.: Ленингр. ун-т. 592 с. 1978.
- [2] <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>
- [3] Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // *Earth Planet Sp V.67. art. 79. doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9. 2015*
- [4] Macmillan S., Maus S. International Geomagnetic Reference Field – the tenth generation // *Earth Planets Space V. 57. P. 1135-1140. 2005.*
- [5] https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/WMM_old_reports.shtml
- [6] Chulliat A, Macmillan S, Alken P, Beggan C, Nair M, Hamilton B, Woods A, Ridley V, Maus S, Thomson A. The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020: Technical Report, National Geophysical Data Center, NOAA. doi: 10.7289/V5TB14V7. 2015
- [7] <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/>
- [8] Korhonen J. V.et al. Magnetic Anomaly Map of the World (and associated DVD). Scale: 1:50,000,000. 1st ed.. Commission for the Geological Map of the World. Paris. France. 2007
- [9] Lesar V., Hamoudi M., Choi Y., Dymont J., Thebault E.: Buiding the second version of the World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM). // *Earth Planets and Space, V. 68, article 27. 2016.*
- [10] Müller R.D., Roest W.R., Royer J.Y., Gahagan L.M., Slater J.G. Digital isochrons of the world's ocean floor // *Journal of Geophysical Research. V. 102. p. 3211–3214. 1997.*
- [11] Müller D., Seton M., Gaina C., Roest W.R. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the World's ocean crust // *Geochemistry Geophysics Geosystems. V. 9. No. 4Q04006. doi: 10.1029/2007GC001743. 2008.*
- [12] Meyer B., Saltus R. and Chulliat A: EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information. doi:10.7289/V5H70CVX. 2017.
- [13] Oehler J.F., Rouxel D., Lequentrec-Lalancette M. Comparison of global geomagnetic field models and evaluation using marine datasets in the north-eastern Atlantic Ocean and western Mediterranean Sea // *Earth Planets Space V.70. Artic. 99.doi:10.1186/s40623-018-0872-y. 2018.*
- [14] Shom. Acquisition et traitement des mesures magnétiques marines // Procédure spécifique PS2007-072. Shom's internal document
- [15] Whittaker J., Seton M., Wessel P., Müller R., DeMets C., Merkuriev S., Cande S., Gaina C., Eagles G., Granot R., Stock J., Wright N., Williams S. Community infrastructure and repository for marine magnetic identifications. // *Geochem. Geophys. Geosyst V. 15. Issue 4, p. 1629–1641. doi:10.1002/2013GC005176. 2014.*
- [16] Wessel P., Luis J.F., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W.H. F., & Tian D. The Generic Mapping Tools version 6. // *Geochem., Geophys., Geosyst. V. 20. p. 5556–5564. doi: 10.1029/2019GC008515. 2019*

Использование свободного программного обеспечения: пример обработки, анализа и визуализации магнитометрических данных кругосветной экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский»

В. А. Солдатов

Санкт-Петербургский филиал Федерального
Государственного Бюджетного Учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
Vadim.A.Soldatov@gmail.com

С. А. Меркурьев^{1,2}

¹Санкт-Петербургский филиал Федерального
Государственного Бюджетного Учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН;
²Санкт-Петербургский государственный
университет
sam_hg@hotmail.com

Аннотация. В статье представлено использование как свободно распространяемых языков и наборов программ с открытым исходным кодом (Python, Julia, Octave, GMT), так и коммерческих (Matlab) для обработки и анализа геопространственных данных. Отдельные модули обработки объединены в единую систему посредством среды разработки Jupyter, также являющейся продуктом с открытым исходным кодом, распространяющимся под лицензией BSD. География исследований сосредоточена на акватории Мирового океана (Срединно-Атлантическом хребте, Атлантический океан). Целью практического исследования является анализ и сравнение измеренных морских магнитных аномалий с модельными, полученными с помощью глобальных и локальных цифровых моделей. Мы использовали магнитометрические данные, полученные сотрудниками СПбФ ИЗМИРАН в ходе кругосветной экспедиции на ОИС «Адмирал Владимирский» в 2019–2020 гг.

Ключевые слова: геомагнитное поле, модели геомагнитного поля, аномальное магнитное поле, морские магнитные аномалии, свободное программное обеспечение

I. ПРИНЦИП ПАКЕТНОЙ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Использование принципа пакетной обработки для анализа геопространственных геофизических данных, по всей видимости, впервые началось в 1988 году в обсерватории Ламонт-Доэрти Колумбийского университета с разработки аспирантами Полом Весселем и Уолтером Х.Ф. Смитом первой версии пакета программ, который получил название GMT и включал несколько картографических программ [1]. С помощью этого пакета, который предоставлял внушительный набор возможностей по обработке данных и их представления в различных географических проекциях, стало возможно также создание высококачественных иллюстраций в формате PostScript. Вторая версия этого пакета вышла со статьей в EOS в октябре 1991 г. и быстро распространилась по всему миру. В настоящее время шестая версия этого пакета [2] широко

используется десятками тысяч пользователей по всему миру в самых разных областях науки. В пакет GMT для работы с геопространственными данными, кроме общеупотребительных программ обработки (включая фильтрацию, подгонку тренда, привязку к координатной сетке, проектирование и т. д.) входят и модули для создания высококачественных иллюстраций, начиная от простых графиков (x, y) и контурных карт и заканчивая искусственно освещенными поверхностями и трехмерными видами в перспективе. Кроме того, в этот пакет вошли специальные программы, позволяющие обрабатывать морские геофизические данные: использовать глобальную самосогласованную, иерархическую базу данных береговой линии с высоким разрешением, читать из баз данных в формате MGD77, анализировать точки пересечения профилей, осуществлять дирекционную фильтрацию для регионально-остаточного разделения батиметрических данных, моделировать аномалии вертикального градиента силы тяжести. Первоначально простейшие скрипты включали в основном последовательность команд GMT, но необходимость поиска и извлечения требуемой порции данных и представления их в нужном формате потребовала привлечения возможностей скриптового языка AWK и помогла вывести обработку потоков данных на более высокий уровень.

Следующим шагом стало комплексирование пакета GMT с языками более высокого уровня, например таких как MATLAB, что позволило расширить возможности обоих инструментов, когда GMT получает доступ к мощным вычислительным возможностям MATLAB, а последний получает возможность доступа к специализированным алгоритмам привязки к сетке.

С появлением последней версии пакета GMT в настоящее время существует три направления разработки с использованием API GMT:

(1) Набор инструментов GMT/MATLAB предназначен для пользователей MATLAB, которые

хотят получить полный доступ к модулям GMT во время работы в средах MATLAB или Octave.

(2) Библиотека PyGMT позволяет программам Python вызывать модули GMT, в том числе в интерактивных средах, таких как ноутбук Jupyter.

(3) Пакет GMT.jl аналогичным образом позволяет пользователям Julia получать доступ к GMT из своей среды.

Удобство и эффективность подобного подхода трудно переоценить.

II. ОБРАБОТКА МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Первичная обработка морских магнитометрических данных является довольно рутинной, но трудоемкой процедурой без использования специального программного обеспечения. Основная цель такого обеспечения – оперативно и качественно преобразовать входной поток исходных магнитных и навигационных данных в пригодный для количественной интерпретации материал.

Граф обработки магнитометрических данных, безусловно, зависит от типа измерительной аппаратуры (магнитной, навигационной), типа измеряемых данных и формата записи, а также конечной цели обработки.

Однако можно выделить ряд общеупотребительных процедур, составляющих граф обработки морских магнитометрических данных:

- удаление выбросов в магнитометрических и навигационных данных;
- объединение данных магнитометрических измерений и навигационных данных;
- выделение аномальной части с помощью IGRF;
- составление и визуализация карты маршрута;
- составление карты графиков магнитных аномалий.

III. СРЕДА РАЗРАБОТКИ JUPYTER

Поскольку для обработки данных изначально предполагалось использование нескольких языков программирования и различных наборов ПО, было бы желательно объединить отдельные модули обработки в единый комплекс, чтобы новый пользователь мог воспроизвести необходимую последовательность действий при обработке имеющегося массива данных или обработать новые.

Для таких целей оказалось очень удобным использовать среду разработки Jupyter [3]. Jupyter представляет собой клиент-серверное приложение, позволяющее создавать, редактировать и запускать на выполнение т. н. «блокноты» (notebooks), содержащие блоки кода (напр., на языке Python) и текст (комментарии и т. п.) При этом серверное приложение может быть запущено как на локальном компьютере, не требующем подключения к сети Интернет, так и на удаленном сервере. Работа с блокнотами осуществляется через локальный веб-браузер. Jupyter весьма популярен в среде специалистов по анализу данных. Он позволяет удобным образом объединить в одном файле блоки кода,

вывод их результатов на экран, текст (в т. ч. математические формулы) и визуализацию. С помощью Jupyter notebook пишутся статьи и даже книги, например [4]. В Интернете можно найти целые коллекции блокнотов, содержащие примеры кода для различных областей наук [5].

Jupyter способствует обмену программами, упрощает повторное использование кода. Многие преподаватели в университетах применяют Jupyter в процессе обучения студентов.

Хотя Jupyter изначально разрабатывался и прежде всего популярен среди разработчиков на Python, на данный момент он поддерживает более ста языков программирования, включая и коммерческие (Matlab).

Мы в процессе обработки данных старались на каждом этапе использовать тот язык или набор программ, который, на наш взгляд, был бы в каждом конкретном случае наиболее удобен, лаконичен и прозрачен. Очевидно, что выбор ПО не может быть свободен от субъективных предпочтений авторов, но следует отметить, что модульный подход позволяет при необходимости относительно легко заменить или переписать заново тот или иной фрагмент кода/этап обработки, если возникнет такая необходимость.

Поскольку нам для обработки данных потребовалось использовать более одного языка программирования, для объединения всей последовательности процедур в среде Jupyter мы решили воспользоваться ядром bash; при этом каждый модуль вызывается отдельной командой и может быть запущен на выполнение независимо от других модулей.

```
File Edit View Insert Cell Help Help Bash
Предварительная обработка данных протонного магнитометра (SeaSpy)
Ввод [ 1 ] : # Исходные данные:
tree -n ../DATA

Для удобства обработки скопируем исходные данные в ../DATApro/in, в поддиректории 1-4 (в порядке очередности). Они представляют собой текстовые файлы, состоящие из заголовка и нескольких колонок, причем для разных режимов работы количество колонок различно. Нас интересуют только первые три колонки: дата, время и значение поля.
Предварительно обработанные данные будем записывать в ../DATApro/out.

Ввод [ 1 ] : # Скопируем файлы данных в каталог для предварительной обработки:
tree -n ../DATApro/seaspy/in

Для пакетной обработки будем использовать bash-скрипты и стандартные утилиты для обработки текста (tail, sed, cut и т.д.):
• уберем заголовки в каждом файле данных,
• соединим дату и время в одно поле (<дата><время>),
• а также уберем лишние пробелы;
B DATA/1, 2 и 4 используется время из первых двух колонок (reading date, reading time). B DATA/3, судя
```

Рис. 1. Предварительная обработка с использованием сценариев командной строки

IV. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА, КОНВЕРТАЦИЯ

Первоначальное чтение «сырых» магнитометрических данных (данные координирования, данные модульных измерений) было выполнено с помощью сценариев командной оболочки (shell scripts), поскольку в них содержатся встроенные (весьма удобные) команды обработки текстовых файлов: tail, sed, cut, cat, tr, awk и т. д. С помощью них осуществлялся автоматический поиск и замена фрагментов текста, вырезались отдельные куски/колонки, сортировались и записывались в нужный файл в соответствии с выбранными критериями. Обработка данных включала удаление выбросов в магнитке и навигации,

корректировку временных отсчетов и разбивку по галсам.

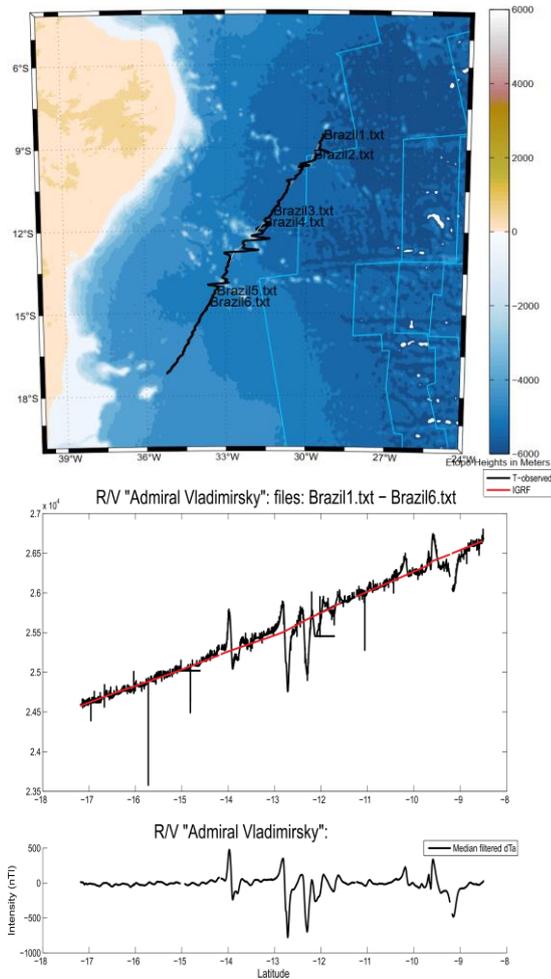


Рис. 2. Магнитный профиль в Бразильской котловине и пример выделения магнитных аномалий. (а) Карта рельефа дна у берегов Южной Америки, на которую вынесены магнитные аномалии, измеренные в ходе кругосветной экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский». Положение изохрон показано голубыми линиями; (б) Пример выделения магнитных аномалий из измеренных значений модуля полного вектора на маршрутном галсе в Бразильской котловине с удалением выбросов с помощью медианного фильтра и вычитанием главного поля с помощью международной аналитической модели.

С получившимися в результате текстовыми (ASCII) файлами, содержащими несколько колонок данных, в принципе можно было бы работать, однако на практике это было неудобно по следующим причинам: большой размер и, соответственно, медленная загрузка в память при обработке. Поэтому было решено для удобства преобразовывать их в двоичную форму, а именно в современный формат HDF5, который в настоящее время становится de facto стандартом во многих областях науки [6], в том числе и в науках о Земле [7]. При таком преобразовании размер файла уменьшился в пять раз, а скорость загрузки возросла на порядок. Для конвертации

была написана небольшая программа на Python с использованием модуля Pandas, содержащего все необходимые процедуры [8]. Дополнительным преимуществом перехода к формату HDF5 стало то, что данные загружаются сразу в виде датафрейма (dataframe) – особой табличной структуры данных, удобной для последующей обработки. При выборе формата мы также руководствовались соображениями универсальности: процедуры для работы с HDF5 имеются во многих языках программирования, в частности, в Matlab/Octave, Python, Julia, C, Fortran и т. п.

Данные судовой навигации и магнитометрии были объединены в один массив также с использованием Pandas.

The screenshot shows a Jupyter Notebook titled "Объединение данных протонного магнитометра (SeaSpy) и судовой навигации". The code includes:


```

import sys, os
import pandas as pd
import numpy as np

# Читаем файл судовой навигации, убираем ненужные столбцы:
NAV=pd.read_hdf("nav.h5")
#NAV.drop(columns=["c", "v"], inplace=True)

print(NAV)

# Читаем данные SeaSpy, убираем доли секунды:
T=pd.read_hdf("seaspy.h5")
T.index=T.index.floor('S')

print(T)

# Объединяем обе таблицы по колонке dt (дата-время):
NAV=NAV.merge(T, on='dt')

print(NAV)

# Записываем результат в файл:
NAV.to_hdf("seaspynav.h5", "DF", format="table", complib="zlib", complevel=5)
    
```

Рис. 3. Пример использования Jupyter для слияния данных судовой навигации и магнитометрии

V. СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ПРОТОННОГО МАГНИТОМЕТРА С МОДЕЛЯМИ WDMAM И EMAG2

Сопоставление данных протонного магнитометра с моделями WDMAM и EMAG2 проводилось также в среде Jupyter. Для этого был выбран подходящий отрезок профиля (галс). Магнитные аномалии были получены путем вычитания из каждого измеренного значения магнитного поля значений главного магнитного поля, рассчитанного, по международной аналитической модели IGRF [9].

Картографирование и геопространственный анализ были выполнены с помощью пакета Generic Mapping Tools (GMT), точнее, с помощью Python и модуля PyGMT, представляющего собой интерфейс к пакету GMT и, следовательно, имеющего ту же самую функциональность. GMT использовался для картографического картирования на основе растровой сетки EMAG2 и WDMAM и автоматической оцифровки профилей, пересекающих границы систематических ММС.



Рис. 4. Сравнение данных с моделями WDMAM и EMAG2

Сопоставление показало:

- наилучшее согласие формы магнитных аномалий (shape of magnetic anomaly characteristic curve) наблюдается с моделью EMAG2;
- амплитуда некоторых аномалий по модели WDMAM ближе к наблюдаемым аномалиям, в то время как имеются крупные аномалии этой модели, противоречащие наблюдениям;
- как и следовало ожидать, наибольшее соответствие наблюдаемый профиль имеет с профилем, построенным по данным детальных исследований.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение описанных выше свободных программных средств показало свою эффективность, удобство и нетребовательность к вычислительным ресурсам. Многие задачи предварительной обработки магнитометрических данных с их использованием вполне могут быть решены даже в полевых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Wessel, P. and W. H. F. Smith, Free software helps map and display data, EOS Trans. AGU, 72, 441, 1991.
- [2] GMT 6: Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., & Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556–5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>
- [3] <https://jupyter.org>. Дата обращения: 1.04.2022.
- [4] <https://jupyterbook.org>. Дата обращения: 1.04.2022.
- [5] <https://github.com/jupyter/jupyter/wiki/A-gallery-of-interesting-Jupyter-Notebooks>. Дата обращения: 1.04.2022.
- [6] <https://www.hdfgroup.org/solutions/hdf5/>. Дата обращения: 1.04.2022.
- [7] <https://www.hdfgroup.org/portfolio-item/earth-sciences/>. Дата обращения: 1.04.2022.
- [8] <https://pandas.pydata.org/>. Дата обращения: 1.04.2022.
- [9] Alken, P., Thébault, E., Beggan, C.D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth Planets Space* 73, 49 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>

Геофизическая станция GI-MTS-1 и возможности её применения для локализации источников электромагнитных возмущений

П. А. Сергушин, М. С. Петрищев

Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук
pavel.sergushin@gmail.com, petrischev@gmail.com

Аннотация. Представлено техническое решение для локализации источников электромагнитных (ЭМ) возмущений на базе геофизических станций GI-MTS-1, разработанных и изготавливаемых в СПбФ ИЗМИРАН.

Ключевые слова: электромагнитный мониторинг; источники ЭМ возмущений; геофизическая станция

I. ВВЕДЕНИЕ

Среди актуальных задач геофизики можно выделить вопрос краткосрочного и среднесрочного прогноза землетрясений и цунами. Известны случаи [1–6] наблюдения ЭМ сигналов, связанных с этими и другими геофизическими процессами. В СПбФ ИЗМИРАН опыт изготовления и успешного применения геофизической аппаратуры насчитывает несколько десятилетий. Современной разработкой является геофизическая станция GI-MTS-1.

II. ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ GI-MTS-1

A. Состав, устройство и принципы работы

Внешний вид геофизической станции GI-MTS-1 представлен на рис. 1, характеристики приведены в табл. 1.



Рис. 1. Внешний вид геофизической станции GI-MTS-1: 1 – регистратор MTS-R, 2 – магнитометр MS, 3 – GPS-антенна, 4 – кабель связи MS и MTS-R, 5 – кабель питания 12 В для АКБ, 6 – карта памяти CF, 7 – электроды, 8 – коммутатор подключений внешних датчиков

Регистратор MTS-R (рис. 2.) является центральным блоком, к которому подключаются остальные составные части станции. Он предназначен для оцифровки 9

Работа выполнена в рамках научно-технического сотрудничества с Институтом Сейсмологии АН Республики Узбекистан

каналов данных с датчиков с частотой дискретизации 50 Гц с привязкой ко времени с помощью GPS с динамическим диапазоном 24 бит. Запись данных осуществляется на карту памяти CF.

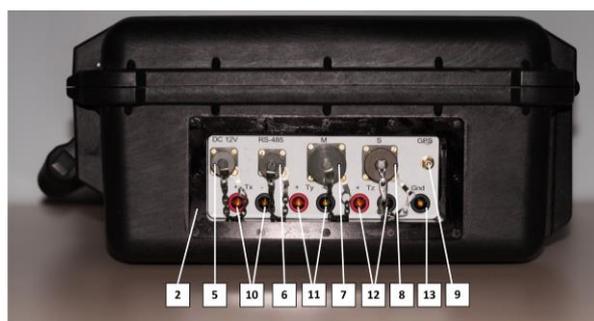


Рис. 2. Регистратор MTS-R (вид со стороны панели разъемов): 2 – панель разъемов; 5 – разъем АКБ 12В; 6 – разъем передачи данных по RS-485; 7 – разъем подключения магнитометра; 8 – разъем подключения внешних датчиков; 9 – разъем антенны GPS; 10, 11, 12 – разъемы подключения измерительных электродов по дифференциальной схеме, 13 – разъем подключения центрального (заземляющего) электрода

Магнитометр MS (рис. 3.) предназначен для преобразования трех взаимно-ортогональных компонент переменного магнитного поля H, D, Z в электрические сигналы.

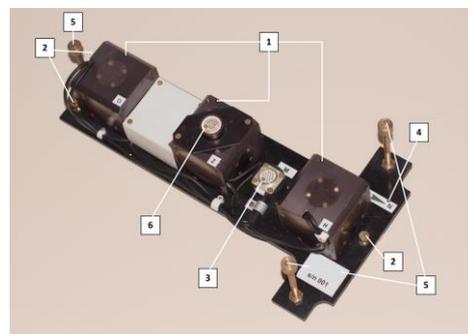


Рис. 3. Внешний вид магнитометра MS: 1 – магнитные компоненты (H, D, Z); 2 – транспортные винты; 3 – разъем связи с регистратором; 4 – направление на геомагнитный север (N); 5 – горизонтирующие винты; 6 – пузырьковый уровень

В каждом компонентном измерителе (рис. 4.) происходит фотоэлектрическое преобразование угла поворота магнита в электрический ток, который, в свою очередь поступает на аналоговый преусилитель. Там происходит выработка команды на компенсацию угла поворота током в катушках обратной связи, магнит

возвращается на начальное положение. Отфильтрованный и усиленный аналоговый сигнал, прямо пропорциональный углу поворота магнита, поступает на регистратор MTS-R.

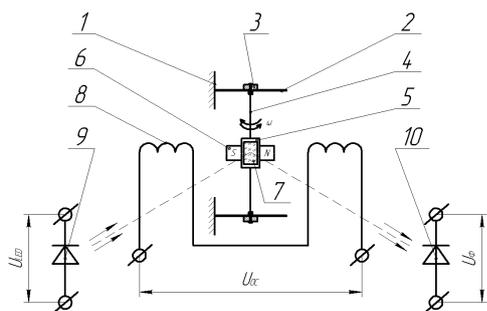


Рис. 4. Принципиальная схема работы торсионного магнитометра (магнитоэстатического вариометра): 1 – корпус, 2-4 – подвес, 5-7 – магнит с отражателем, 8 – катушки обратной связи, 9 – излучатель, 10 – фотоприёмник

Для регистрации электрических потенциалов в почве (теллурических сигналов) применяются электроды, подключенные к регистратору (рис. 5). Конструкция и принцип действия электродов могут быть различны, в штатную комплектацию станции входят электроды в виде латунных стержней.

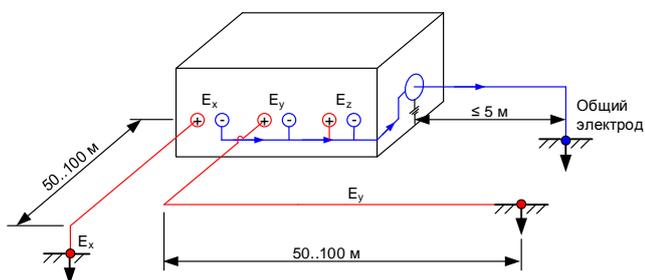


Рис. 5. Пример схемы подключения электродов

Оставшиеся три канала могут быть использованы для решения вспомогательных задач, например, для регистрации температуры в блоке магнитометра, либо для подключения сейсмоприемников.

Для согласования сигналов от разных датчиков в регистраторе реализованы аналоговые фильтры.

В. Характеристики

ТАБЛИЦА 1 ХАРАКТЕРИСТИКИ GI-MTS-1

№ п/п	Наименование характеристики	Ед. изм.	Значение
Основные характеристики GI-MTS-1			
1.	Протокол передачи данных		RS-232, RS-485
2.	Частота дискретизации	Гц	50
3.	Точность АЦП	bit	24
4.	Частотный диапазон измерений,	Гц	0,001–15
5.	Диапазон напряжений на входе АЦП (9 каналов)	В	±3
6.	Напряжение питания	DC, В	12
7.	Потребляемая мощность	Вт	≤2
8.	Рабочий диапазон температуры	°С	от –20 до +50
9.	Срок эксплуатации	лет	5
Характеристики магнитометра			
10.	Тип магнитных датчиков	Магнитоэстатический,	3 измерительных оси
11.	Динамический диапазон	нТл	±2100

№ п/п	Наименование характеристики	Ед. изм.	Значение
12.	Уровень собственного шума, во всем частотном диапазоне измерений	нТл	≤20,0
13.	Температурный дрейф, не более	нТл/°С	3
Характеристики электрических (теллурических) каналов			
14.	Динамический диапазон	мВ	±185

С. Преимущества GI-MTS-1

- Автономность (питание от АКБ =12 В, запись данных на Compact Flash карту);
- Мобильность, компактность, небольшой вес;
- Высокая помехоустойчивость (способность работать в зоне промышленных электромагнитных полей);
- Высокая чувствительность и низкий уровень собственных шумов;
- Широкий температурный диапазон эксплуатации;
- Высокая устойчивость к динамическим нагрузкам (6 – 8 г);
- Возможность использования как для регулярных наблюдений, так и для сеансовых экспериментов;
- Приспособленность как для работы в обсерватории, так и в полевых условиях (для дистанционной регистрации данных на ПК по протоколу RS-232 (до 15м) и RS-485 (до 1 км), возможно подключение блока питания от сетей переменного тока);
- Модульная система комплекса позволяет адаптировать его к условиям эксперимента;
- Регистрация данных производится с высокоточной привязкой по времени от GPS.

III. ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАБОТ

СПбФ ИЗМИРАН имеет богатый опыт применения станций GI-MTS-1 для мониторинга вариаций ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных и сейсмических полей с целью изучения динамики источников УНЧ возмущений: ионосферного, литосферного и техногенного происхождения, проведения магнитотеллурического зондирования, обеспечения УНЧ магнитной локации в авроральных и сейсмоактивных зонах - для изучения ионосферных неоднородностей и краткосрочных предвестников сильных землетрясений (магнитудой более 5 баллов).

Станции GI-MTS-1 применялись в ряде площадных экспериментов по исследованию глубинной геоэлектрической структуры Балтийского щита.

Основной целью эксперимента BEAR (1998 г.) был поиск возможного залегания астеносферы в виде промежуточного проводящего слоя частично расплавленных пород на глубинах в несколько сотен километров. Идея и методика эксперимента основывались на проведении синхронных магнитотеллурических зондирований на единой сети наблюдений для последующей 2D и 3D интерпретации. Исследование выполнялось в поле естественных источников. Серия экспериментов FENICS выполнялась в поле естественных и контролируемых источников, отклик от которых регистрировался на больших удалениях. Результаты экспериментов позволили

уточнить особенности строения литосферы Балтийского щита.

Станции GI-MTS-1 с успехом использовались для исследования динамики положения плазмопаузы во время сильной магнитной суббури по данным меридиональной цепочки станций [5]. С этой целью в 2012 г. на территории Карелии была установлена меридиональная цепочка из пяти станций с разносами до 90 км. Исследование УНЧ геомагнитных пульсаций на густой меридиональной цепочке магнитовариационных станций позволяет отслеживать динамику изменения местоположения проекции плазмопаузы во время суббури, используя широкий диапазон частот. Ранее положение плазмопаузы определялось статистически и по конкретным типам геомагнитных пульсаций. Граница смены направления ионосферных токов хорошо соответствует положению плазмопаузы.

Станции GI-MTS-1 были использованы в серии экспериментов по методу фазово-градиентного зондирования. В серии долговременных наблюдений в Японии в 2000–2003 гг. (рис. 6) были установлены характерные особенности в поведении градиентов и фазовых скоростей электромагнитных волн, позволившие выделить предвестники сильных землетрясений ($M > 5$).

Установка станций по этому методу выполнялась в ряде регионов России с целью изучения глубинных аномалий электропроводности земной коры. В районе п. Толвуя (Карелия), где наблюдаются выходы высокопроводящих шунгитоносных пород на земную поверхность, эксперимент выполнен в 2012 году [6]. Результаты эксперимента были сопоставлены с данными магнитотеллурических зондирований, они показали их хорошее соответствие. Результаты обработки позволили выявить ряд проводящих слоев в земной коре на глубинах 2–3 и 15–20 км, вероятно связанных с шунгитоносными горизонтами.

На базе метода фазово-градиентного зондирования была разработана и опробована технология использования эффекта вызванной поляризации при синхронном магнитовариационном профилировании вертикальной компоненты естественного магнитного поля Земли [4]. Отметим, что естественные источники длиннопериодных вариаций электромагнитного поля позволяют вести поиски глубинных неоднородностей до 10 км и более. Проведённый эксперимент подтвердил принципиальную возможность нахождения поляризующихся залежей на основе аналитического продолжения данных синхронных измерений длиннопериодных вариаций магнитного поля.

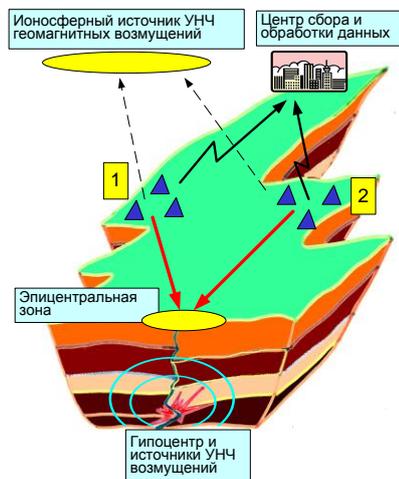


Рис. 6. Принципиальная схема установки станций для локализации краткосрочных ЭМ предвестников крупных землетрясений

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение сети геофизических станций GI-MTS-1 для мониторинга электромагнитных возмущений позволяет определять характеристики источников ЭМ сигналов, в частности, для краткосрочного предсказания землетрясений и цунами. В настоящее время являются актуальными задачи составления базы данных ЭМ предвестников, их классификации и определения их связи с теми или иными геофизическими процессами. В 2022 планируется поставка геофизических станций в республику Узбекистан для дальнейшей установки и применения в качестве комплекса краткосрочного прогнозирования землетрясений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kopytenko Y.A., Matiashvili T.G., Voronov P.M., Kopytenko E.A., Molchanov O.A., 1993. Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 77 (1–2), 85–95. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(93\)90035-8](https://doi.org/10.1016/0031-9201(93)90035-8).
- [2] Ismaguilov V.S., Kopytenko Y.A., Hattori K., Voronov P.M., Molchanov O.A., Hayakawa M., 2001. ULF magnetic emissions connected with under sea bottom earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 1 (1–2), 23–31. <https://doi.org/10.5194/nhess-1-23-2001>.
- [3] Копытенко Ю.А., Зайцев Д.Б., Леваненко В.А., Радиллов А.В., Тимошенко Ю.П., Сергушин П.А., Петрищев М.С., Исмагилов В.С., Перечесова А.Д. Геофизический комплекс GI-MTS-1 // Материалы Пятой всероссийской Школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. В двух книгах. Книга 2. СПб.: СПбГУ, 2011. С. 459–461.
- [4] Ермохин К.М., Копытенко Ю.А., Петрищев М.С., Собисевич А.Л., Сергушин П.А. Об использовании естественных электромагнитных полей для поиска глубинных поляризующихся объектов // ДАН. 2019. Т. 485, № 2. С. 217–220. DOI: 10.31857/S0869-56524852217-220
- [5] Копытенко Ю.А., Исмагилов В.С., Котиков А.Л., Петрищев М.С., Терешенко П.Е., Петленко А.В., Зайцев Д.Б., Сарычев Д.Ю. Исследование динамики положения плазмопаузы во время сильной магнитной суббури по данным меридиональной цепочки станций // *Physics of Auroral Phenomena*, 2013. Т. 36, С. 33–36.
- [6] Копытенко Ю.А., Исмагилов В.С., Петрищев М.С. Исследование геоэлектрической структуры земной коры методом фазово-градиентного зондирования // ДАН. 2015. Т. 462, № 3. С. 352–355. DOI: 10.7868/S0869565215150256

Законодательное регулирование научных исследований земного магнетизма

В. С. Лаврова
ООО «Олимп Групп»

Аннотация. Назрела необходимость совершенствования законодательства о защите интеллектуальной собственности, патентного права и права авторства, а также популяризации знаний в перечисленных областях, с целью увеличения подачи заявок на патентование научных достижений.

Ключевые слова: интеллектуальная собственность, исключительные права, автор, авторское право, научные открытия, научное достижение, патентное право

В современных условиях сложной гео-политической и экономической ситуации, на первый план выходят вопросы национальной безопасности государства. Научные достижения, новейшие изобретения, в том числе и исследования в области земного магнетизма, являются неотъемлемой частью повышения обороноспособности страны, позволяют добиться результатов в космических технологиях, в военно-промышленном секторе, энергосберегающих технологиях и др.

Научные достижения являются объектом интеллектуальной собственности, имеющими помимо прочего и материальную ценность. В современных экономических реалиях, цифровизации и развитии информационных технологий, научные достижения превращаются в инновационные технологии, а следовательно, формируют необходимость в гражданско-правовой защите.

В российском законодательстве защите интеллектуальной собственности отведена часть 4 Гражданского кодекса Российской Федерации. В соответствии с названным кодексом интеллектуальные права на изобретения, полезные модели и промышленные образцы являются патентными правами. Автору изобретения, полезной модели или промышленного образца принадлежат: исключительное право и право авторства.

Необходимо обратить внимание, что право авторства при публикации научной статьи возникает на форму, а не на содержание. Автор получает исключительные права на публикацию, право считаться автором научной идеи. Содержание научной статьи, само научное достижение — это область патентного права.

В России действует принцип «патент выдается тому, кто первый за ним обратился». То, что автор идеи высказал ее публично на конференции или в научной статье, никак не поможет ему в использовании своего достижения, если он вовремя не оформит патент. В Роспатенте проверяют новизну изобретения, а не авторство.

Хорошо известным всем примером являются А. Попов и Г. Маркони: случай с изобретением радио. Попов опубликовал статью о разработанном им приборе в 1895 г., а Маркони подал свою заявку в 1896 г., я видел этот патент. Но статья не давала Попову никаких прав, кроме приоритета в признании авторства.

В Российской Федерации подается критически мало патентных заявок, порядка 20–30 тыс. в год. В то же время в США это число по разным источникам от 300 тыс. до 600 тыс. в год, в Китае доходит до 1 млн 300 тыс. в год.

Такая непопулярность патентования связана в большей степени с плохой сцепкой науки и бизнеса, отсутствием у российских ученых навыков монетизации своих достижений, а также с не достаточной осведомленностью о принципах действия патентного права и права интеллектуальной собственности в целом.

Многие изобретатели считают, что необходимо раскрыть сущность своего достижения, вследствие чего сведения об изобретении становятся общедоступными, а после, через пару лет можно будет и патент получить. Но согласно статье 1330 Гражданского кодекса РФ, необходимо в течение 6 месяцев со дня раскрытия информации, подать заявку на патент, далее изобретение теряет принцип новизны.

Государство в сфере инновационной политики направляет усилия для увеличения патентования изобретений, снижает финансовые затраты на приобретение патента. Российской экспортный центр на основании Постановления Правительства РФ от 15 декабря 2016 г. № 136, компенсирует 100% оплаты пошлины и 70 % оплаты услуг по подготовке, подаче и делопроизводству по международным заявкам.

Внедрение разработок в производство гарантирует изобретателю получение вознаграждения.

Недоработки есть в современном законодательстве и иногда встречаются, так называемые, дубликаты, когда берут известное техническое решение, добавляют небольшие изменения и получают новый патент на якобы новое изобретение. Такая проблема должна решаться на уровне государства, путем повышения требований к новизне изобретения и не формальному подходу при изучении заявок, поданных в Роспатент.

Также на наш взгляд необходимо учитывать авторство идеи, чтобы принцип «патент выдается тому, кто первый за ним обратился», в идеале исчез совсем, таким образом повысить ценность авторства, творческого труда.

На наш взгляд назрела необходимость введения курса (факультатива) основ патентования или защиты интеллектуальной собственности в высших учебных

заведениях для студентов технических специальностей. Практика показывает, что недостаточное информирование о защите интеллектуальных прав приводит к потерям и для авторов, и для государства в целом.

В заключение необходимо подчеркнуть, что развитие защиты интеллектуальных прав и институт патентования является мощным фактором развития научно-технического потенциала государства, в свою очередь повышающим национальную безопасность страны.

Законодательную базу необходимо прорабатывать с учетом современных реалий, облегчения

бюрократических процедур, а следовательно упрощения регистрации новых научных достижений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гражданский кодекс Российской Федерации (часть четвертая) от 18 декабря 2006 г. № 230-ФЗ (ред. от 11.06.2021) // Собрание законодательства РФ. 2006. № 52. Ч. 1. Ст. 5496.
- [2] Шмачкова К.Т. Проблемы российского патентного права / К.Т. Шмачкова, С.Е. Меркуль. Текст : непосредственный // Молодой ученый. 2020. № 24 (314). С. 363-365. — URL: <https://moluch.ru/archive/314/71729/> (дата обращения: 27.04.2022).
- [3] Шатковская Т.В. Научные результаты интеллектуальной деятельности как объекты исключительного права: понятие и особенности правовой охраны // Проблемы теории и истории права и государства. Северо-Кавказский юридический вестник. 2019. № 2.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Актуальные вопросы проектирования элементов несущих конструкций радиоэлектронной аппаратуры для измерения магнитного поля Земли</i>	
Афонин П. Н., Лебедева Е. А.	3
<i>Особенности возбуждения электромагнитного поля в диапазоне менее 100 Гц заземленным или заводненным горизонтальным излучателем</i>	
Терещенко П. Е.	7
<i>Применение геоинформационной технологии для мониторинга и оценки параметров окружающей среды</i>	
Минина А. А., Жданова Е. Н.	11
<i>Основные направления исследований СПбФ ИЗМИРАН за последние 30 лет</i>	
Перечесова А. Д., Копытенко Ю. А.	15
<i>Изучение магнетизма в курсе общей физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ»</i>	
Чирцов А. С., Шейнман И. Л.	21
<i>Решение обратной СДВ задачи для определения южной границы высыпания потоков ультра-энергичных релятивистских электронов</i>	
Астафьев А. М., Чирцов А. С.	24
<i>Особенности измерения магнитного поля на ферромагнитном носителе</i>	
Петленко А. В.	28
<i>О суточных вариациях магнитного поля Земли</i>	
Иванов В. В.	31
<i>Система сопровождения индивидуализированного адаптивного общедоступного предметного обучения как база для организации углубленной целевой подготовки студентов по специализации «Исследование магнитного поля Земли»</i>	
Чирцов А. С., Алексеева О. С., Чирцов Т. А.	35
<i>Использование последнего поколения индукционных магнитометров при изучении низкочастотных электромагнитных полей</i>	
Копытенко Е. А., Поляков С. В.	39
<i>Предобработка информации из мировой сети магнитных обсерваторий INTERMAGNET с применением методов BIG DATA</i>	
Коробейников А. Г., Пирожникова О. И.	43
<i>Построение годографа на основе компонентных измерений на борту ферромагнитного судна с целью изучения геомагнитного поля</i>	
Иванов С. А., Меркурьев С. А.	45
<i>Электромагнитные поля на движущемся транспорте</i>	
Исмагилов В. С., Копытенко Ю. А.	48
<i>Определение параметров рыскания судна с помощью компонентных магнитометров</i>	
Иванов С. А., Меркурьев С. А.	50
<i>Краткосрочные электромагнитные предвестники сильных землетрясений</i>	
Исмагилов В. С., Копытенко Ю. А.	52
<i>Мониторинг геофизических параметров полярной ионосферы как основной инструмент исследования магнитосферно-ионосферного взаимодействия</i>	
Котиков А. Л.	56
<i>Верификация глобальных моделей аномального магнитного поля (WDMAM и EMAG2) по материалам магнитометрических данных, полученных в ходе кругосветной экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский» (2019–2020)</i>	
Меркурьев С. А., Иванов С. А., Солдатов В. А.	60

<i>Использование свободного программного обеспечения: пример обработки, анализа и визуализации магнитометрических данных кругосветной экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский»</i>	
Солдатов В. А., Меркурьев С. А.	64
<i>Геофизическая станция GI-MTS-1 и возможности её применения для локализации источников электромагнитных возмущений</i>	
Сергушин П. А., Петрищев М. С.	68
<i>Законодательное регулирование научных исследований земного магнетизма</i>	
Лаврова В. С.	71

Научно-практический семинар
«ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ
КАК ФАКТОР ПРОГРЕССА НАЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИИ»

12 мая 2022

Подписано в печать 5.05.2022. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 9,25
Тираж 50 экз. Заказ

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательства СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

197022, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Проф. Попова, 5, литера Ф,
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

+7 (812) 346-46-37
IRVC.eltech@mail.ru

WWW.ETU.RU

