

ИНСТИТУТ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА, ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛНИМ. Н.В. ПУШКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИЗМИРАН)

1

Ħ

H

Пушковские чтения – 2019

Магнетизм на Земле и в Космосе

Сборник материалов конференции

МОСКВА, ТРОИЦК, 2019

France -

Ħ

ī

m

Общероссийская открытая научная конференция «Пушковские чтения – 2019: Магнетизм на Земле и в Космосе» 15-16 мая 2019 г. г. Москва, г. Троицк, ИЗМИРАН Сборник расширенных тезисов докладов

Под редакцией В.Г. Петрова

В настоящем сборнике представлены расширенные тезисы докладов, отражающие наиболее важные результаты, доложенные на конференции. Основная тематика включает в себя следующие направления:

- Н.В. Пушков и его роль в изучении земного магнетизма
- Мемориально-исторические сообщения
- Физика магнитосферы и геомагнитная активность
- Солнечный ветер и межпланетное магнитное поле
- Физика околоземного космического пространства
- Постоянное и переменное геомагнитное поле, методики и аппаратура для измерения геомагнитного поля

All-Russian open scientific conference «Pushkov readings: magnetism on Earth and in Space» May 15-16, 2019 Moscow, Troitsk, IZMIRAN Collection of extended abstracts

Edited by V.G. Petrov

This collection of extended abstracts comprises brief communications that present the most important results submitted to the conference. The main topics discussed are as follows:

- N.V. Pushkov and his role in the study of terrestrial magnetism
- Memorial and historical reports
- Physics of the magnetosphere and geomagnetic activity
- Solar wind and interplanetary magnetic field
- Physics of near-Earth space
- Constant and alternating geomagnetic field, methods and apparatus for measuring the geomagnetic field

http://www.izmiran.ru/library/pushkov2019/pushkov2019abs.pdf



© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Зайцев А.Н. Полярные исследователи ИЗМИРАН: In memoriam	6
Белов А.В., Ерошенко Е.А., Гущина Р.Т., Янке В.Г., Михайлов Ю.М. Лев Исаакович Дорман – 90-летний юбилей	14
Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Филиппов С.В. Литосферное магнитное поле Арктики (по данным спутника СНАМР)	19
Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Филиппов С.В. О перспективах исследования коровых магнитных аномалий сейсмоактивных зон по спутниковым данным	23
Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В. Изучение глубинного строения центрально- азиатского складчатого пояса по спутниковым и приземным магнитным данным	27
<i>Бикташ Л.3.</i> Вклад ионосферных токов в геомагнитные вариации на средних и низких широтах	31
<i>Биленко И.А.</i> Влияние вариаций фотосферных магнитных полей на параметры межпланетного магнитного поля и солнечного ветра	35
Бондарь Т.Н., Харитонов А.Л. Результаты исследований главного и аномального магнитных полей на территории южно-каспийской мегавпадины	39
Вальчук Т.Е. Триада «Гелиофизика-Геомагнетизм-Метеорология» как путь к пониманию атмосферной динамики	43
Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Исследование характера широтной зависимости распределения значений геомагнитных вариаций	47
Гаврилов С.В., Харитонов А.Л. Анализ магнитного и гравитационного полей над зонами мантийной субдукции	51
Гаврилов С.В., Харитонов А.Л. Моделирование гидродинамических процессов термической конвекции под черноморской плитой	55
Гайворонская Т.В., Карпачев А.Т. Статистика землетрясений в связи с солнечной и геомагнитной активностью	59
Громова Л.И., Клейменова Н.Г., Громов С.В., Малышева Л.М. Магнитная буря 25- 26 августа 2018 г. – последняя магнитная буря уходящего 24-го цикла солнечной активности	63
Гудошников С.А., Гребенщиков Ю.Б., Одинцов В.И., Любимов Б.Я. Магнитометры на основе эффекта гигантского магнитного импеданса с умеренной частотой возбуждающего сигнала	67
<i>Дремухина Л.А., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г.</i> Развитие магнитных бурь, инициированных разными типами течений солнечного ветра	71
<i>Ишков В.Н.</i> Солнечная активность в XXI веке: Основные характеристики и прогноз развития	75
Калиничева Е.С., Саванов И.С., Дмитриенко Е.С. Анализ поверхностной активности звезд солнечной массы в молодых скоплениях по данным	79

телескопа «Кеплер»

- *Карпачев А.Т.* Структура экваториальной аномалии в летних условиях по 82 данным «Интеркосмос-19»
- *Кобелев П.Г., Янке В.Г.* Долгопериодные вариации космических лучей с учетом 87 временных изменений жесткостей геомагнитного обрезания
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Латышева О.В. Магнитные аномалии 91 литосферы в околоземном космическом пространстве
- Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. Параметры верхней 95 ионосферы над тропическими циклонами при изменениях стратосферного ветра после извержения вулкана Пинатубо
- *Кукса Ю.И., Теодосиев Д., Шибаев И.Г.* Динамика регулярных и эпизодических 99 событий по данным магнитометрического комплекса: Материалы проекта «Шуман»
- *Легенька А.Д., Корсунова Л.П., Хегай В.В.* Некоторые особенности в суточном 103 ходе месячных медиан *foF2* в зимний период по данным наземных станций вертикального зондирования ионосферы японского региона
- *Лещинская Т.Ю., Пустовалова Л.В.* Оценка точности описания моделью SM-MIT 107 структуры главного ионосферного провала в европейском долготном секторе
- Лундин Б.В. О ряде особенностей ОНЧ волн в приземной плазме 110
- *Макаров Г.А.* Сезонные и циклические распределения магнитно-возмущенных 114 дней со среднесуточным значением геомагнитного индекса Dst < –100 нТл
- Мандрикова О.В., Родоманская А.И., Зайцев А.Н. Особенности возникновения и 118 распространения геомагнитных возмущений в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь (по измерениям сети станций INTERMAGNET)
- Меньшов С.А., Одинцов В.И., Попова А.В., Гудошников С.А. Оптимизация 123 импедансных характеристик магнитных датчиков на основе аморфных микропроводов
- Одинцов В.И., Петров В.Г., Гудошников С.А. Численное Моделирование и 127 экспериментальные исследования магнитных полей 3-х компонентной системы колец гельмгольца квадратной формы
- Рани Х.П., Рамешвар Я., Старченко С.В. Магнитоконвекция в плоском слое 131
- Семаков Н.Н., Ковалев А.А., Павлов А.Ф., Федотова О.И. История и новые цели 135 абсолютных геомагнитных наблюдений в Арктике
- Середкина А.И., Филиппов С.В. Предварительные оценки глубин залегания 139 магнитных источников в Арктике и их связь с параметрами литосферы
- Середкина А.И., Филиппов С.В. Параметры магнитоактивного слоя литосферы 143 прибайкалья по данным глобальной модели WDMAM
- Сидорова Л.Н., Филиппов С.В. Изменчивость долготного распределения 147 экваториальных плазменных «пузырей» с высотой
- Симонян А.О., Оганян М.В., Мецоян Т.А. Усовершенствованная пространственно-151 временная модель поля ускорений главного магнитного поля Земли

- Смирнов А.Ю., Старченко С.В. Объемные токи современного магнитного 155 диполя в ядре Земли
- Старченко С.В., Яковлева С.В. Вероятностно временной анализ геомагнитных 159 мультиполей Гаусса с 1900 по 2005 гг.
- Старченко С.В., Рани Х.П., Рамешвар Я. Масштабирование и турбулентность 163 планетарной магнитоконвекции
- *Харитонов А.Л.* Магнитное и гравитационное поля луны по данным космических 167 аппаратов «Apollo»
- *Харитонов А.Л.* Анализ магнитного поля, измеренного космическим аппаратом 171 «СНАМР» над южно африканским мантийным плюмом
- *Харитонов А.Л.* Геолого-геофизические исследования тектонического строения 175 коры в шельфовой зоне восточной Арктики
- Харитонова Г.П., Харитонов А.Л. Аэромагнитные и геолого-геофизические 179 исследования тектонического строения алданской палео-плюмтектонической структуры
- Харитонова Г.П., Харитонов А.Л. Создание цифровой базы космического 183 аппарата «Космос-49» под руководством Ш.Ш. Долгинова соратника Н.В. Пушкова
- Цветков Е.П., Цветков Ю.П. Термоядерные ритмы Солнца 187
- *Чегис В.В., Харитонов А.Л.* Магнитные аномалии, измеренные на территории 192 тихоокеанской морфоструктуры центрального типа и результаты их геологогеофизической интерпретации
- Черток И.М., Белов А.В., Абунин А.А., Абунина М.А. Пекулярные явления 196 солнечной активности и космической погоды в минимуме 24-ого цикла
- *Щекотов А.Ю., Беляев Г.Г.* Низкочастотные поля, как инструмент прогноза 200 землетрясений
- *Яковлева С.В., Старченко С.В.* Энергия и мощность геомагнитного потенциала: 204 Сравнение сумм и спектров по трем моделям
- Янке В.Г. Долговременные изменения жесткостей геомагнитного обрезания 208 космических лучей

ПОЛЯРНЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛИ ИЗМИРАН: IN MEMORIAM

Зайцев А.Н.

ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия alex.zaitsev1940@mail.ru

THE POLAR EXPLORERS OF IZMIRAN: IN MEMORIAM

Zaitsev A.N.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

IZMIRAN was established 80 years ago and since that play a role as leading institute in the magnetism, ionosphere and solar-terrestrial physics. In addition the key projects connected with the polar geomagnetic studies, which were performed by N.V. Rose, N.V. Pushkov, S.I. Isaev, N.P. Benkova, N.D. Medvedev, B.M. Lyakhov, S.M. Mansurov, O P. Kolomiytsev and many others. This report presents a short notes in memoriam of scientists of IZMIRAN, who devoted their lives and their knowledge to the study of polar geomagnetic phenomena.

80 лет назад был сформирован современный комплексный институт ИЗМИРАН (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН), www.izmiran.ru. Оглядываясь на прошедшие годы можно назвать три главных направления развития института – магнетизм, ионосфера и солнечно-земная физика. Особо следует отметить полярные геомагнитные исследования, которые были выполнены отцами-основателями – Н.В. Розе и Н.В. Пушковым и их ближайшими сподвижниками: С.И. Исаевым, Н.Д. Медведевым, Б.М. Ляховым, С.М. Мансуровым, О.П. Коломийцевым, В.И. Почтаревым и многими другими.

Планетарный характер исследования явлений земного магнетизма приобрели в период проведения Международного геофизического года (1957-58), ставший началом космической эры. По результатам МГГ стало ясно большое значение исследований магнитных бурь и полярные сияния как индикаторов воздействия космической среды на околоземное пространство. Знание космической погоды стало важным элементом обеспечения работы высокотехнологичных систем в том числе навигации, энергетики, космической связи, управления космическими полетами и спутниками.

В настоящем докладе представлены краткие сведения о ведущих ученых ИЗМИРАН, которые посвятили всю свою жизнь и свои знания исследованиям полярных геомагнитных явлений. Очевидно, что мы смогли назвать лишь некоторую часть имен, имена остальных будут названы в следующих публикациях. Смысл доклада также в том чтобы

6

обратить внимание что ИЗМИРАН рос вместе с развитием исследований в Арктике. Большинство учёных ИЗМИРАН в 1919 - 1991 годы так или иначе были вовлечены в исследования и организацию наблюдений в Арктике. Сейчас в 2019 году следует вновь обратить внимание на национальную задачу России по освоению Арктики, вспомнить как работали наши предшественники, что будет новым стимулом развития ИЗМИРАН.

НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ РОЗЕ (1890-1941)

Н.В. Розе родился в 1890 году в семье немцев, живших в России со времен Екатерины. После окончания физико-математического факультета Санкт-Петербургского университета в 1912 году поступил на работу в Главную геофизическую обсерваторию Академии наук (ГГО). Здесь он в 1917-1921 годах работал в составе Северной гидрографической экспедиции, проводя гидрографические исследования и геомагнитные измерения в полярных районах. По итогам экспедиции один из вновь открытых островов у южного острова Новой Земли был назван именем «Розе», позднее именем Н.В.Розе в 1930-е годы советские картографы назвали мыс на о.Ли-Смита в арх. ЗФИ и один из ледников в составе большого ледника Норденшельда на Северном острове Новой Земли.



Рис. 1. Графический коллаж-портрет Н.В.Розе, автор М.Пушков, галерея ИЗМИРАН

Н.В.Розе многие годы работал в ГГО, где под его руководством были организованы масштабные работы по геомагнетизму и далее работы по генеральной геомагнитной съемке СССР. В 1932 году Н.В. Розе был директором Центрального Института назначен первым Земного атмосферного электричества AH CCCP Магнетизма И как самостоятельного подразделения ГГО. Н.В.Розе пишет книги, учебники, ведет большую преподавательскую работу. Среди них в 1934 году был издан учебник Розе Н.В., Трубятчинский Н.Н., Яновский Б.М. «Земной магнетизм и магнитная разведка», послуживший базой для подготовки самого широкого круга специалистов в СССР. Продолжая работы по геомагнетизму, Н.В.Розе работал в разных областях механики, издал учебник "Динамика твердого тела", двухтомник "Теоретическая гидромеханика" в приложениях к постройке кораблей. Н.В.Розе много сил отдавал преподаванию в Военно-морской академии, ЛИТМО, в Ленинградском университете, где в 1935 году получил ученую степень доктора физико-математических наук по геофизике. К началу 1939 года Н.В.Розе был ведущим ученым в СССР как гидролог, геомагнитолог, механик, исследователь Севера, контр-адмирал.

При Н.В.Розе в магнитной обсерватории в Павловске в пригороде Ленинграда сложился большой и дружный коллектив магнитологов. Среди них выделялся Н.В.Пушков своим трудолюбием и умением строить отношения с товарищами по работе. Большим плюсом было рабочее происхождение Н.В.Пушкова, он защитил диссертацию и был членом ВКП (б) с большим стажем, вел большую партийную работу в ГГО. иностранными Н.В.Розе Свободно владея языками поддерживал дружеские связи со многими зарубежными учеными, в том числе с Ф. Нансеном, У. Нобиле, он дружил с В.Ю.Визе, Р.Л.Самойловичем, Е.К. Федоровым. С началом Великой отечественной войны В.Н.Розе остался в Ленинграде и в блокаду в декабре 1941 года был арестован по обвинению в "шпионско-вредительской деятельности" и принадлежности к "Союзу старой русской интеллигенции". В январе 1942 года Н.В.Розе скончался от голода во время следствия. Вторая жена Н.В.Розе Т.Н.Симоненко, с сыном Евгением 1939 г.р., пережили блокаду и после войны работали в ИЗМИРАН, продолжая в науке путь, которым шел Н.В.Розе.

В истории ИЗМИРАН Н.В.Розе занимает место создателя института, выдающегося организатора и полярного исследователя.

НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ПУШКОВ (1903-1981)

Жизнь и судьба Николая Васильевича Пушкова олицетворяют собой историю Советской России. Революция 1917 года открыла дорогу миллионам детей рабочих и крестьян к свету Науки и Просвещения. Н.В.Пушкова родился в крестьянской семье, получил трудовую закалку и принял советскую власть на Кубани став активным комсомольцем (1921 год), затем в 1925 году стал коммунистом. В 1926 году по призыву партии пошёл учиться. Сначала учился в Московском университете, затем в Гидрометинституте, где изучил основы земного магнетизма. В 1931 году поступил в аспирантуру в Главной геофизической обсерватории в Ленинграде, защитил диссертацию в 1934 году и начал работать в магнитный обсерватории в Павловске под Ленинградом. В 1937 году был назначен директором обсерватории, а затем в 1940 году - директором вновь организованного общесоюзного Института земного магнетизма при Гидрометслужбе СССР. Биография советского учёного Н.В.Пушкова хорошо представлена на сайте, который сотрудники ИЗМИРАН сделали к его 100-летнему юбилею http://izmiran.ru/info/personalia/npushkov/.



Рис. 2. Графический коллаж-портрет Н.В.Пушкова, автор М.Пушков, галерея ИЗМИРАН

Во время учёбы и работы с 1926 года любимыми предметами Н.В.Пушкова стали земной магнетизм и полярные сияния. В своей диссертации «Теории космического магнетизма» Н.В.Пушков фактически наметил стратегию исследования этой области науки на многие годы вперёд. Практически ИЗМИРАН стал воплощением его опыта, знаний и умений организовать и вести научно-исследовательскую работу. Он знал, умел и с желанием занимался любимой наукой. Его внутренняя культура, целеустремленность, исключительная честность, яркий ум и доверие к людям сделали из него идеального советского ученого. До конца своих дней Николай Васильевич Пушков отдавал все свои знания и умения любимой науке и поддержке молодых талантов. При нем Институт стал ведущей организацией страны в области земного магнетизма и солнечноземной физики. Его большой заслугой была умение увлечь наукой других людей и помочь организовать близкие ИЗМИРАН институты в других частях страны. Иркутск, Якутск, Мурманск - города, где и сейчас работают близкие к ИЗМИРАН институты.

В тридцатые годы СССР осваивал Арктику – Челюскин, СП-1, ледоколы и СевМорПуть - эти работы были приоритетом в науке и на практике. Н.В.Пушков и его сотрудники в Павловске принимали участие в обеспечении прогнозов радиосвязи для Арктики. При Н.В.Пушкове в ИЗМИРАН было создано несколько лабораторий и тем по Арктике и затем по Антарктике. Особенно много внимания уделялось полярным широтам и кроме Магнитной съемки СССР к 1965 году была создана магнитно-ионосферная служба СССР, которая действует и сегодня по наставлениям, созданным Н.В.Пушковым и его соратниками.

СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ ИСАЕВ (1906-1986)

Одним из создателей современного ИЗМИРАН безусловно следует считать Сергея Ивановича Исаева. После окончания Смоленского Университета попал в Ленинград (1930), затем участвовал в МПГ 1932-33 гг., зимовал на станции Маточкин Шар, работал по Программе "Генеральная магнитная съемка СССР", работал в ААНИИ, откуда добровольцем ушел защищать Ленинград. В войну был командиром батареи, прошел всю войну на Западном и Белорусском фронтах, форсировал Днепр и освобождал города в Европе, дошел до Берлина. Был награжден орденами Ленина, Красного Знамени, Отечественной войны I и II степеней и многими медалями. После войны пришел на работу в НИИЗМ, где с 1952 года возглавил отделение в Мурманске. В 1960 году ПГИ стал институтом под руководством С.И.Исаева. В 1974 г. он был награжден вторым орденом Ленина за развитие геофизических исследований на Крайнем Севере. В 1976 году С.И.Исаев вернулся в Москву, работал в МЦД-Б2. С. И. Исаев - автор более 60 научных работ, в том числе 4 монографий, посвященных исследованиям полярных сияний и магнитосферы Земли. Книга с М.И.Пудовкиным «Полярные сияния и процессы в магнитосфере Земли». Наука, Ленинград, 1972, до сих пор служит одним из лучших введений в полярную геофизику. Н.В.Пушков очень ценил С.И.Исаева в качестве творческой личности. А общая любовь к полярным исследованиям и взаимодоверие и поддержка скрепляла их дружбу.

БОРИС МИХАЙЛОВИЧ ЛЯХОВ (1912-1994)

Борис Михайлович Ляхов родился в Казани и в 1936 г. окончил геофизическое отделение Казанского университета. В 1936 – 1944 гг. как многие увлекся Арктикой, участвовал в экспедициях на Севере, зимовал на полярных станциях Тихая и Уэлен. После войны в марте 1946 года пришел на работу в НИИЗМ, где освоил работу в ионосферном бюро прогнозов, где познакомился с Л.Н.Ляховой, которая стала его женой. С 1950 г. Б.М.Ляхов работал начальником магнитной партии в отделе постоянного магнитного поля Земли. Его научные интересы связаны с вопросами происхождения магнитного поля Земли. На основании анализа результатов наблюдений магнитного поля Земли как современного, так и за прошлые эпохи, он пришел к выводу о недипольном характере этого поля и интерпретировал его тремя эксцентрическими диполями. Эти исследования легли в основу его кандидатской диссертации, которую он защитил в 1969 г. В 1956 – 1975 гг. Борис Михайлович был бессменным ученым секретарем института. Б.М.Ляхов проработал в ИЗМИРАНе до 1979 г., затем работал вне штата. К 50 летнему юбилею ИЗМИРАН Б.М.Ляхов написал краткую историю института, в которой отразил достижения советской науки в области земного магнетизма.

НАТАЛЬЯ ПАВЛОВНА БЕНЬКОВА (1912-1992)

Наталья Павловна Бенькова – дочь известного русского художника П.П.Бенькова, родилась и выросла в Казани. Здесь после окончания

Казанского университета по специальности геомагнетизм, в 1934 г. Н. П. Бенькова была направлена на работу в Главную геофизическую обсерваторию (ГГО) им. А.И.Воейкова в Ленинграде (Павловске), где начала работу под руководством Н.В.Розе. Знание французского и немецкого языков позволило ей быстро освоить научные сведения и развить широкий научный кругозор. Вскоре она уже работала над диссертацией «Расчёты вторичной системы токов суточных вариаций земного магнитного поля по методу Чепмена», как аспирантка Университета в Казани. В 1937 году она вернулась в ГГО, в магнитный отдел Слуцкой магнитной обсерватории, а затем в конце1939 года защитила диссертацию в Ленинградском университете.

Отечественная война сильно поменяла жизнь НИИЗМ – в феврале 1942 года по Ладоге сотрудники были вывезены под Свердловск на магнитную обсерваторию Высокая Дубрава в пос. Косулино. В сентябре 1944 года Н.П.Бенькова приехала в Красную Пахру, где в тяжелейших условиях возрождался НИИЗМ. Оперативная работа в ионосферном бюро не заслоняла научную работу – Н.П.Бенькова с 1948 года начала работу над докторской диссертацией, которую защитила в 1954 году. Став ведущим сотрудником по вопросам магнитного поля и ионосферных исследований Н.П.Бенькова руководила широким кругом вопросов, в том числе в приложениях к Арктике и Антарктике. Она опубликовала более 300 научных статей и 3 монографии, более 20 её учеников защитили кандидатские диссертации, и пятеро из них стали докторами наук. Работы посвященные Н.П.Беньковой исследованию магнитных вариаций, магнитных бурь и магнитной активности не потеряли актуальность и сегодня, она была одним из создателей первой аналитической модели геомагнитного поля Земли. С Н.В.Пушковым Н.П.Бенькову связывали многие годы работы, личная дружба и единство взглядов на перспективы дальнейших научных исследований, оба были сторонниками комплексного подхода к изучению системы Солнце-Земля, правильность которого подтвердило время. Жизнь, прожитая Натальей Павловной, - пример беззаветного служения науке и любимому ИЗМИРАН.

НИКОЛАЙ ДМИТРИЕВИЧ МЕДВЕДЕВ (1911-1992)

Н.Д. Медведев родом из служивой петербургской дворянской семьи. В 1930 году после 8 классов «Петер-Шуле» попал в магниторазведочную экспедицию в Казахстан, где быстро освоился с магнитными наблюдениями. Далее его путь лежал еще через 11 экспедиций под руководством проф. Н.Н.Трубятчинского и проф.Н.В.Розе. В 1939 году Н.Д.Медведев пришел на работу в Павловскую магнитную обсерваторию, где стал ближайшим сотрудником у Н.В.Пушкова. Вместе со всеми пережил начало Великой Отечественной войны, ушел добровольцем на защиту Ленинграда, отозвали как специалиста и со всеми сотрудниками НИИЗМ отправили на Урал. Период 1944 – 1952 строил институт в Пахре, но затем ушел в ГлавСевМорпуть в экспедиции на СП-3, зимовки на Диксоне, Новой Земле, Таймыре.

Новая жизнь началась с Антарктиды. Он пробился во 2 САЭ, где прокладывал путь к станции Восток и где были открыты новые станции Комсомольская, Пионерская. Именно Н.Д.Медведев сделал первые определения Южного магнитного полюса, и выполнил эпигноз и прогноз движения Южного магнитного полюса со времен Кука до наших дней, см. Бюллетень САЭ, № 115. Всего Н.Д.Медведев провел 6 зимовок, в том числе на станции Ленинградская. Он вел свое дело магнитолога так, что результаты его экспедиций легли в основу карт магнитного поля в Арктике и Антарктике. Всегда и везде он был душой компании, писал стихи, вел дневники, выборка из которых издана в виде книги. Образ полярника Н.Д.Медведева служит примером беззаветной любви к своему делу и примером следующим поколениям сотрудников ИЗМИРАН.

СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ МАНСУРОВ (1911-1980)

С.М.Мансуров из семьи православных мещан, получил образование в народной школе, и в юности попал в геофизические экспедиции. Затем его путь привел в Павловскую магнитную обсерваторию. Обладая редкой настойчивостью, талантом наблюдателя, незаменимым ОН стал помощником в деле организации сети магнитных обсерваторий. При первой возможности он попал в Антарктиду в составе 2 САЭ и зимовал в обсерватории Мирный. Здесь он провел точные вариационные наблюдения со льда на больших удалениях от береговой черты и обнаружил и описал береговой эффект. Этот же прием точного описания и сравнения вариаций магнитного поля позволил ему открыть и описать связь между секторной структурой межпланетного магнитного поля и вариациями в полярной шапке. Позднее в научной литературе это явление было названо эффектом Мансурова-Свалгаарда.

Большая работа была выполнена С.М.Мансуровым при составлении Атласа Антарктики, где им представлена типизация вариаций магнитного поля в высоких широтах. Завершение исследований С.М.Мансурова – реализация большого проекта «Геофизический полигон в Антарктиде, 1973-1993. Следует отметить что яркими участниками проекта были П.А.Майсурадзе и А.А.Шабарин. Об этом можно будет рассказать в следующих статьях. К сожалению, в связи с распадом СССР работы на полигоне в Антарктиде были прекращены и еще предстоит оценить большую роль, что сыграл С.М.Мансуров в полярной геофизике как ученый и как практик.

ОРДИНАРД ПАНТЕЛЕЙМОНОВИЧ КОЛОМИЙЦЕВ (1933-2012)

О.П.Коломийцева следует поставить в один ряд с теми, кто создавал ИЗМИРАН в самом начале. Новая волна сотрудников пришла в ИЗМИРАН в период МГГ – 1957-58 гг. О.П.Коломийцев родился и вырос в Саратове, окончания радиофизического факультета Саратовского гле после университета в 1956 году пришел на работу в ИЗМИРАН. Он сразу включился в работу ионосферного отдела и пробился в Антарктическую экспедицию. В 1957 - 1963 годах в составе 3-й, 5-й и 8-й САЭ зимовал на станции Восток. После трех зимовок Э.П.Коломийцев углубился в науку – пора было осваивать результаты экспедиций. Но тут появилась другая перспектива – Космос. В Академии наук создавали свой отряд космонавтов и Э.П.Коломийцев прошел отбор и был зачислен в 1967 году в отряд космонавтов. В отряде космонавтов он пробыл 10 лет и стал специалистом по пилотируемым полетам. Хотя отряд РАН на Луну не полетел, но подготовка и закалка отряда космонавтов сохранилась на Научная и общественная работа О.П.Коломийцева многие годы. развивалась по восходящей. В 1969 году он защитил кандидатскую, а в 1994 году получил степень доктора физико-математических наук. Многие годы он был ученым секретарем института. В конце творческого научного книгу воспоминаний «Антарктика Космонавтика. пути издал _ Экстремальная тональность жизни» (2011).

В истории ИЗМИРАН много имен специалистов связанных по жизни и по работе с Арктикой и Антарктикой. Часть этих имен представлена в этой статье. О многих других следует рассказать в следующих публикациях. Кто возьмет на себя такой труд ?

Литература

- 1. Медведев Н.Д. Моя шестикратная Антарктида: страницы из дневника // Москва, Полиграф сервис, С.78, 2015, частное издание
- 2. Александр Шабарин, Исповедь 100-летнего гражданина // Сбор и обработка О.Скворцовой, Москва, С.148, 2018, частное издание
- 3. Коломийцев О.П. Арктика Космонавтика. Экстремальная тональность жизни // Москва Троицк, ИЗМИРАН, С.96, 2011, частное издание
- 4. Исаев С.И., Пудовкин М.И. Полярные сияния и процессы в магнитосфере Земли. Наука, Ленинград, 1972, 244 с.

ЛЕВ ИСААКОВИЧ ДОРМАН – 90-ЛЕТНИЙ ЮБИЛЕЙ

Белов А.В., Ерошенко Е.А., Гущина Р.Т., Янке В.Г., Михайлов Ю.М. ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия <u>abelov@izmiran.ru</u>

LEV ISAAKOVICH DORMAN – 90 YEARS ANNIVERSARY

Belov A.V., Eroshenko E.A., Gushina R.T., Yanke V.G., Michailov Yu.M. IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

1 мая — международный день солидарности трудящихся, праздник Мира и Труда. Этот праздник имеет прямое отношение к одному из старейших и заслуженных сотрудников ИЗМИРАН – Льву Исааковичу Дорману.

1 Мая 2019 г. исполняется 90 лет этому выдающемуся российскому учёному, беспримерному труженику, чья жизнь и деятельность неразрывно связаны с г. Троицком. Имя этого учёного можно поставить в один ряд с именами основателей ИЗМИРАН – Н.В. Пушкова, Ю.Д. Калинина, Н.П. Беньковой, Э.И. Могилевского. Именно он явился зачинателем того направления, которое плодотворно развивается в ИЗМИРАН – физики космических лучей.



Рис. 1. Профессор Л.И. Дорман, в течение многих лет заведовавший отделом космических лучей ИЗМИРАН, и его сотрудники в настоящее время.

Придя в ИЗМИРАН в 1951 г., Л.И. Дорман в короткий срок подготовил и защитил кандидатскую, а затем докторскую диссертации и стал одним из ведущих специалистов в солнечно-земной физике в Советском Союзе и мире. В 1957-1964 гг. он работал в Магнитной лаборатории АН СССР (ныне ТРИНИТИ), где им был предложен ряд интересных идей по методам прямого преобразования ядерной энергии в электрическую. С 1964 г. Лев Исаакович, работая заведующим отделом космических лучей в ИЗМИРАН, развивает теоретическую, методическую и экспериментальную базу наземных наблюдений космических лучей. Обладая даром научного предвидения и интуиции, подкрепляемой феноменальной работоспособностью, Лев Исаакович за 90 лет научной деятельности смог обеспечить формирование и интенсивное развитие нового направления в физике: "Вариации космических лучей". Под его руководством создан нейтронный монитор, который успешно работает и в настоящее время, являясь одним из самых больших и известных детекторов космических лучей этого типа.



Рис. 2. Молодой Лев Дорман стоит рядом с Николаем Васильевичем Пушковым, основателем ИЗМИРАН и нашего города.

Около 2000 научных статей, более 30 монографий – таков грандиозный (промежуточный!) итог научной деятельности юбиляра. Он стал одним из создателей нового метода исследования космического

пространства с помощью наземных наблюдений космических лучей и вырастил большой коллектив научных сотрудников, успешно решающих сложные проблемы физики космических лучей, геофизики и астрофизики.

В 1964 году Л.И. Дорман возглавил отдел космических лучей ИЗМИРАН, который стал ведущим научным центром. Во многом благодаря усилиям Л.И. Дормана, создана сеть станций космических лучей. Долгое время Лев Исаакович являлся членом бюро Научных Советов АН СССР «Космические лучи» и «Солнце-Земля», председателем Секции по космическим лучам и радиационным поясам, координирующей исследования по вариациям космических лучей в России, руководителем Международной комплексной темы «Космические лучи в атмосфере и магнитосфере Земли».



Рис. 3. Очередная конференция по Space Weather Week в 2012 г. (ESWW12), совмещенная с рабочим семинаром по NMDB где Л.И. Дорман был активным участником.



Рис. 4. В свободное время на (ICRC) в Мексике (2013 г.).

Среди полученных научных результатов Л.И. Дормана отметим создание теории метеоэффектов, метод коэффициентов связи. классификацию и исследование основных типов вариаций, развитие теории переноса космических лучей в регулярных и случайных магнитных полях межпланетного пространства и кинетической теории флуктуаций лучей. Широта научных интересов Льва Исааковича космических проявилась в создании им радиоуглеродного метода исследования вариаций космических лучей. Характерной чертой научной работы Льва связь Исааковича неразрывная теоретических является И экспериментальных исследований. Все главные теоретические работы убедительно Льва Исааковича подтверждены многолетними наблюдениями на наземных детекторах и космических аппаратах.



Рис. 5. Доклад Л.И. Дормана на Ученом совете в ИЗМИРАН (2016 г.).



Рис. 6. Л.И. Дорман накануне 90-летия среди своих учеников в очередной приезд в ИЗМИРАН

В последние годы Лев Исаакович, в основном, работает в Израиле, где он создал единственную в регионе высокогорную станцию космических лучей и возглавил центр исследования космических лучей. Но у него, попрежнему, прочная связь с коллегами в ИЗМИРАН, и другими российскими учёными, многие из которых считают себя его учениками.

Юбиляр, как и прежде, бодр и энергичен, каждый день занимается спортом, молод не только душой, но и телом. По научной продуктивности Л.И. Дорман, как и в молодые годы, может соперничать с большой научной лабораторией или небольшим институтом. Каждый год к уже рекордно длинному списку публикаций прибавляется около десятка новых научных работ, полных свежих идей и интересных результатов, пишутся и издаются новые книги, по которым учатся всё новые поколения учёных. Лев Исаакович, не жалея ни сил, ни времени, оказывает научную и организационную поддержку исследованиям космических лучей в нашей стране, и именно благодаря его усилиям, эти исследования завоевали международное признание и пользуются заслуженной известностью. Интенсивность его научной работы со временем не снижается. Он продолжает успешно соперничать в научной производительности и эффективности со всем, созданным им, отделом. Это создает уверенность, заслуг Л.И. Дормана будет существенно что перечень научных расширяться и дополняться к следующим юбилеям.

Для многих 90 лет – это почтенный возраст, но не для Льва Исааковича. Он, по-прежнему, прост и демократичен в общении с друзьями, со знакомыми и незнакомыми людьми, по-прежнему, с юной непосредственностью смотрит на окружающий мир и радуется каждому мигу жизни. Юбилей для Льва Дормана - это не более чем километровый столб, мимо которого пролетает он на длинном и славном пути к новым открытиям и свершениям.

ЛИТОСФЕРНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ АРКТИКИ (ПО ДАННЫМ СПУТНИКА СНАМР)

Абрамова¹ Д.Ю., Абрамова² Л.М., Варенцов² Ив.М., Филиппов¹ С.В.

¹Йнститут земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия ² Центр геоэлектромагнитных исследований Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ЦГЭМИ), г. Москва, г. Троицк, Россия dasha1yan@yandex.ru

LITHOSPHERIC MAGNETIC FIELD OF THE ARCTIC (ACCORDING TO CHAMP SATELLITE DATA)

Abramova¹ D.Yu., Abramova² L.M., Varentsov² Iv.M., Filippov¹ S.V.

¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk, Russia ²Geoelectromagnetic Research Centre, Shmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Troitsk, Russia

The base of the CHAMP geomagnetic field data at ~ 280 km over the Arctic Ocean (SLO) was created to study the lithosphere anomalies within this territory and to compare them with the tectonic structures. A series of maps over the territory of the SLO of various scales and averaging parameters were constructed. Lithosphere anomalies reflecting the Lomonosov Ridge, Mendeleev-Alpha Rise and other structures were revealed.

Северный Ледовитый океан (СЛО) является исключительно важным районом в свете решения практических задач, связанных с поисками и разведкой месторождений нефти и газа, их дальнейшим освоением, а геополитическими вопросами разграничения особых также С [1]. зон на шельфе Арктики По объективным экономических И получение субъективным причинам плотных систем наблюдений геофизических полей в арктическом регионе весьма сложно и дорого, что существенно ограничивает возможности его исследования.

Спутниковые данные, измеренные в течение нескольких месяцев, а тем более, нескольких лет, обеспечивают беспрецедентный глобальный и равномерный охват земной поверхности, что делает их привлекательными и перспективными для изучения региона.

Настоящая работа направлена на решение комплексных геолого геофизических проблем строения литосферы сектора СЛО в части исследования аномального магнитного поля (АМП) непосредственно по спутниковым данным. С этой целью для региона Северного Ледовитого океана, была создана база данных параметров магнитного поля вдоль витков орбиты спутника за 5 последних месяцев его «жизни» в 2010 г. В этот период высота орбиты (280 – 290 км) позволяла получить более достоверные величины амплитуд аномального магнитного поля по сравнению с высотами 400-600 км, на которых летали другие спутники.

геолого-тектонических Северного Из истории исследований Ледовитого океана известно, что регион представляет собой «коллаж», составленный молодыми и более старыми океаническими бассейнами с разбросанными среди них блоками континентальных микроструктур и микроконтинентов смешанной корой. Российском секторе co В Арктического бассейна под слоем воды толщиной от 1 до 4 км расположены хребет Ломоносова и поднятие Менделеева, разделенные котловиной Макарова. В Канадском секторе расположено поднятие Альфа [2]. Происхождение этих бассейнов и природа земной коры в этой области (является она континентальной или океанической) составляют объект оживленных дискуссий среди геологов и геофизиков.

Карта аномалий модуля полного вектора магнитного поля T_a над Северным Ледовитым океаном на высоте наблюдения спутника СНАМР ~280 км приведена на рис. 1.



Рис. 1. Карта аномалий магнитного поля T_a на высоте спутника СНАМР ~280-290 км над Северным Ледовитым океаном. Цифры соответствуют положению магнитных аномалий над структурами: 1- хребет Ломоносова; 2 – поднятие Менделеева; 3- поднятие Альфа; 4 – Хатангский центр трапповых излияний.

На фоне пониженных значений магнитного поля четко выделяется ряд протяженных положительных магнитных аномалий *T_a* различной формы и

интенсивности, самые яркие из которых приурочены к структурам хребта Ломоносова, поднятиям Менделеева и Альфа.

Хребет Ломоносова в рельефе дна Северного Ледовитого океана прослеживается от континентальной окраины Евразии до о. Элсмир (Канадский архипелаг).

Расположенная над ним магнитная аномалия также простирается к северу от Сибирской платформы и имеет четкие границы. Максимальные значения амплитуды составляют ~ 12 нТл, к северу интенсивность ее падает. Это является свидетельством того, что кора под хр. Ломоносова имеет значительную мощность магнитоактивного слоя, и изотермическая поверхность Кюри магнетита находится глубоко.

Поднятия Менделеева и Альфа на батиметрических картах разделены, однако, как показывает карта рис. 1, аномальное поле над ними представляет собой единый сегмент. Видна значительная по площади и значимая для такой высоты наблюдений по амплитуде (20 нТл) аномалия магнитного поля. Это говорит о большой мощности магнитоактивного слоя и глубоком положении изотермической поверхности Кюри магнетита, присущим природе континентальной коры.

Поднятие Альфа достаточно хорошо исследовано геофизическими методами. Оно подстилается мощной корой: от 20—25 км до 40 км. Формирование структур такого типа чаще всего связывается с выплавлением базальтовых магм из крупных мантийных плюмов, поступивших из глубины к океанической литосфере вблизи осей спрединга. Судя по гравиметрическим данным, кора в этой области может относиться как к океаническому, так и к континентальному типу [3]. Магнитные данные свидетельствуют в пользу континентальной природы коры данного сегмента.

Регион поднятия Менделеева изучен значительно слабее. Предполагается, что в отличие от хр. Ломоносова, эта структура с сильно повышенной мощностью коры представляет собой след на океанической коре горячего пятна, с которым были связаны мощные излияния траппов на Сибирской платформе.

В последние годы все большее внимание привлекают исследования природы мантийных плюмов, их роли в эволюции литосферы, развитии процессов магматизма и рудообразования.

Считается, что в раннем пермском периоде произошло столкновение Карского блока с Таймыром, позднее были сформированы огромные поля траппов и трапповых интрузий на огромных территориях Сибири. Обусловленные этими тектоническими процессами образовались крупные месторождения Cu, Ni, Pt-Pd. Одним из центров плюмовых излияний является область Енисей - Хатангского рифтового прогиба [4], так называемый Хатангский центр трапповых излияний. Аномалия с максимальной амплитудой около 15 нТл приурочена к местоположению так называемого Хатангского плюма. Это обширная изометрическая область положительных значений магнитного поля с центральным «ядром» около 95/110° в.д. и 70/74° с.ш. в западной части карты на рис. 1. Форма аномалии типична для образов магнитных аномалий плюмовой природы.

Построенные карты и анализ регионального аномального магнитного поля по данным спутника СНАМР над территорией Северного Ледовитого океана отражают геологические представления о строении коры под ним.

Исследование показывает, что литосферные магнитные аномалии Арктического региона представляют собой сложный комплекс положительных и отрицательных различных форм и амплитуд. Это обусловлено его тектоническим строением, состоящим из молодых и бассейнов древних океанических И континентальных блоков, разбросанных среди них. Использование измеренных на спутнике магнитных аномалий обеспечивает основу для более детального изучения и интерпретации магнитных аномалий полярной Арктики.

Работа показывает перспективность использования спутниковых наблюдений геомагнитного поля для изучения региональной тектоники, глубинного картирования неоднородностей коры и верхней мантии и создания нового поколения карт прогноза скрытых месторождений.

Литература

- 1. Конторович А.Э., Эпов М.И., Бурштейн Л.М., Каминский В.Д., Курчиков А.Р., Малышев Н.А., Прищепа О.М., Сафронов А.Ф, Ступакова А.В., Супруненко О.И. Геология, ресурсы углеводородов шельфов Арктических морей России и перспективы их освоения // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 7-17.
- 2. Артюшков Е.В. Континентальная кора на хребте Ломоносова, поднятии Менделеева и в котловине Макарова. Образование глубоководных впадин в неогене // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 11. С. 1515-1530.
- Alvey A., Gaina C., Kusznir N.J., Torsvik T.H. Integrated crustal thickness mapping and plate reconstructions for the high Arctic // Earth Planet. Sci. Lett. 2008. V. 274. P. 310— 321.
- 4. Добрецов Н.Л., О.П. Полянский, В.В., Ревердатто В.В., Бабичев А.В. Динамика нефтегазоносных бассейнов в Арктике и сопредельных территориях как отражение мантийных плюмов и рифтогенеза // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1145—1161.

О ПЕРСПЕКТИВАХ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРОВЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОН ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Абрамова¹ Д.Ю., Абрамова² Л.М., Филиппов¹ С.В.

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

dasha1yan@yandex.ru

² Центр геоэлектромагнитных исследований Объединенного института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ЦГЭМИ), г. Москва, г.Троицк, Россия ludabr50@mail.ru

ON PROSPECT FOR STUDY OF THE CRUST MAGNETIC FIELD ANOMALIES AT THE ACTIVE TECTONIC ZONES ON THE BASE OF SATELLITE DATA

Abramova¹ D.Yu., Abramova² L.M., Filippov¹ S.V.

¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk, Russia ²Geoelectromagnetic Research Centre, Shmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Troitsk, Russia

Based on CHAMP measurements some maps of the geomagnetic anomalies field total vector T_a for two active tectonic regions (Carpathian-Balkan and Baikal zone) were constructed. It was shown that satellite data as well representing of the deep tectonic structures have good prospect to study an active area in combination with other geological and geophysical methods.

Изучение глубинного строения и динамики тектоносферы активных областей является одной из важных проблем современной геофизики.

Магнитная съемка, осуществляемая низколетящими околоземными спутниками, на сегодняшний день является одним из наиболее дешевых геофизических методов изучения внутреннего строения Земли.

Магнитные аномалии указывают на закономерности распределения магнитных неоднородностей различных типов В земной коре, свидетельствуют о "просвечивании" древних структур. Зоны сочленения магнитных областей, по-видимому, являются отражением глубинных и долгоживущих разломов, на которых развивались авлакогены и депрессии. Аномальное магнитное поле (АМП) можно рассматривать как некоторый пространственный образ крупных тектонических единиц. Авторами настоящей работы проведены исследования в области изучения поля литосферных магнитных аномалий с использованием экспериментальных данных спутника СНАМР над различными территориями [1-3].

Для изучения АМП над территорией Карпато-Балканского и Байкальского сейсмоактивных регионов были отобраны, систематизированы и преобразованы в удобную для дальнейшего анализа форму данные измерений компонент геомагнитного поля ~200 витков спутника СНАМР, полученных в 2010 году, когда высота орбиты была на минимальном уровне ~280-290 км.

Измеренное на спутнике геомагнитное поле представляет собой сумму вкладов нескольких источников, являющихся внешними и внутренними по отношению к поверхности Земли. Для разделения вкладов различных источников: главного геомагнитного поля, полей магнитосферных и ионосферных токовых систем, индукционных полей токов в проводящих слоях коры и верхней мантии и, наконец, аномального поля, связанного с намагниченностью пород литосферы, использованы авторские технологии, максимально повышающие надежность выделения литосферных данных.

Карпато Балканский регион. Пример карты модуля полного вектора литосферного АМП T_a (согласно модели EMAG2) над Карпато - Балканским регионом на высоте ~4 км представлен на рис. 1.



Рис. 1. Карта магнитных аномалий *T_a* Карпато-Балканского региона на высоте 4 км. Разломы: Трансильванский (TRS), Интра-Мизийский (INT), Тротус (TRT), Центральный Родопский (RD). МР – Мизийская плита, S-pl – субдуцирующая плита, АР - горы Апусени, ВR –бассейн Брашов.

Карпато-Балканский регион характеризуется чрезвычайно сложной структурой литосферы: состоит из многочисленных складчатых поясов и кристаллических областей, разделённых глубинными разломными зонами

[4]. Мощная тектоническая активность продолжается здесь непрерывно по настоящее время. Эта область предоставляет уникальную возможность изучения конечного и коротко живущего этапа конвергенции плиты, когда передовая часть погружающейся литосферы, наконец, отрывается от нее и начинает тонуть в мантии [5]. Именно по этой причине в зоне Вранча происходят глубокофокусные катастрофические землетрясения (на рис.1 отмечены точками).

На карте рис. 1 наблюдается мозаичная структура чередующихся крупных положительных и отрицательных аномалий, что характерно для сейсмоактивных областей. В северо-восточном секторе карты положительные значения АМП коррелируют с субдуцирующей с востока под Юго-Восточные Карпаты океанической плитой (S_pl), ограниченной разломами Интра-Мизийским (INT-M) и Тротус (TRT). Значительная отрицательная аномалия приурочена к бассейну Брашов и области Вранча.

Байкальская рифтовая зона. Данная сейсмоактивная область является частью Центрально-Азиатского складчатого пояса и также имеет сложную структуру литосферы, составленную группами складчатых поясов, террейнов и кристаллических массивов с докембрийским фундаментом [6]. Тектоническая активность здесь проявляется до сих пор, а ее природа приписывается межплитному взаимодействию и (или) мантийным процессам.

На рис. 2 показана карта магнитных аномалий модуля полного вектора поля T_a на высоте наблюдений 280 км.



Рис. 2. Карта магнитных аномалий *T*_a на высоте ~280 км.

В центре карты четко прослеживается положительная аномалия, свидетельствующая о наличии в нижней части коры магнитоактивной области. Характерно, что именно зона Байкальского рифта является областью повышенной сейсмической активности.

Полученные результаты показывают, что спутниковые геомагнитные наблюдения содержат ценную информацию о строении сейсмоактивных тектонических зон, локализация полученных аномалий литосферного поля хорошо коррелирует с данными других геофизических методов, такими как тепловое поле и поле скоростей сейсмических волн. Таким образом, экспериментальные данные АМП, полученные на спутниках, как реально отражающие современное положение глубинных тектонических структур и некоторые их физические свойства и не требующие значительных материальных затрат, в сочетании с другими геологическими и геофизическими методами имеют хорошие перспективы в области изучения глубинного строения активных областей.

Литература

- 1. Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Филиппов С.В., Фрунзе А.Х. О перспективах использования спутниковых измерений для анализа региональных магнитных аномалий // Исследование Земли из космоса. 2011. № 6. С. 1-11.
- 2. Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Филиппов С.В. Роль спутниковых литосферных магнитных аномалий при анализе геологогеофизических данных в Центрально-Азиатской коллизионной зоне // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов (Материалы VI международного симпозиума). Бишкек: НС РАН. 2015. С. 45-54.
- 3. Абрамова Д.Ю., С. В. Филиппов, Л. М. Абрамова, И. М. Варенцов, И. Н. Лозовский. Изменения литосферных магнитных аномалий с высотой (по данным спутника CHAMP) // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Том 56, № 2. С. 254–264.
- 4. Wortel M.J.R., Spakman W., 2000. Subduction and slab detachment the Mediterranean Carpathian region // Science, 290 (5498), 1910-1917.
- 5. Gvirtzman Z., 2002. Partial detachment of a lithospheric root under the southeast Carpathians: toward a better definition of the detachment concept // Geology. V.30. P. 51-54.
- 6. Диденко А.Н., В.Б. Каплун, Ю.Ф. Малышев, Б.Ф. Шевченко. Структура литосферы и мезозойская геодинамика востока Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геология и геофизика. 2010.Т. 51. № 5. С. 629-647.

ИЗУЧЕНИЕ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА ПО СПУТНИКОВЫМ И ПРИЗЕМНЫМ МАГНИТНЫМ ДАННЫМ

Абрамова¹ Д.Ю., Филиппов¹ С.В.

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия dasha1yan@yandex.ru

STUDY OF THE DEEP STRUCTURE OF THE CENTRAL ASIAN FOLD BELT ON THE BASE OF SATELLITE AND NEAR-EARTH MAGNETIC DATA

Abramova¹ D.Yu., Filippov¹ S.V.

¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk, Russia

According to the satellite CHAMP data the maps of the lithosphere geomagnetic field for some regions of the Central-Asian fold belt have been constructed. It was shown that the lithospheric magnetic field as a parameter reflecting both the present position of tectonic structures and their physical properties could be effectively used to describe large-scale geological-tectonic structures on equal with other geological and geophysical methods.

Согласно исследованиям последних десятилетий, тектоносфера Земли, состоит из разноранговых разноплановых неоднородностей, положение которых в разрезе и по латерали не всегда однозначно коррелирует с видимыми на дневной поверхности геологическими структурами. В настоящее время возникает необходимость глубинного картирования неоднородностей коры и верхней мантии, обусловленная задачами формирования глубинных прогностических критериев и создания нового поколения карт прогноза скрытых месторождений нефти, газа, твердых полезных ископаемых.

Магнитные минералы в нижней части земной коры вызывают магнитные поля достаточные по величине, чтобы быть зафиксированными приборами низкоорбитальных спутников.

В 2000 г. был запущен германский искусственный спутник Земли СНАМР, измерявший с высокой точностью параметры магнитного поля (МП). Его миссия успешно продолжалась более 10 лет.

С помощью оригинальной технологии выделения магнитных аномалий [1,2] по данным СНАМР сформирована база экспериментальных данных для зоны Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП).

ЦАСП представляет собой сложнейший структурный ансамбль, где на огромном пространстве собраны фрагменты континентальных блоков, пластины палеозойской и мезозойской океанической коры,

разновозрастные островные вулканические дуги, новообразованные складчатые системы и континентальные массы с активными и пассивными окраинами [3,4]. Здесь мы представляем сопоставление полученного по спутниковым данным пространственного распределения поля литосферных магнитных аномалий с современными геолого-геофизическими взглядами на строение восточной и азиатской частей ЦАСП.

Восточная часть территории ЦАСП.

На рис. 1 показана карта спутниковых магнитных аномалий вертикальной компоненты, *T_a* над восточной частью территории ЦАСП. На карте отчетливо выделяется несколько крупных сегментов положительных и отрицательных аномалий различной формы и интенсивности.



Рис. 1. Карта *Т*_{*a*}, над территорией ЦАСП на высоте ~290 км.

В центре территории находится обширная изометрическая область положительных значений магнитного поля, приуроченная к местоположению, так называемой, Амурской литосферной плиты (AM).

Севернее и северо-западнее этой аномалии видны еще две положительные аномалии: над территорией Алданского (АЛД) архейского массива и Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Значительная интенсивность этих аномалий для такой альтитуды наблюдений объясняется наличием в составе их литосферы магнитных магматических комплексов высокой степени намагничения.

Область отрицательных значений T_a приурочена к территории высокой степени сейсмичности, обусловленной проявлением позднекайнозойского вулканизма, здесь возникли обширные площади, связанные с деятельностью отдельных мантийных плюмов, подъемом в астеносферу вещества мантии. В результате термического воздействия на литосферу происходит её прогрев стационарной тепловой мантийной аномалией, что, в свою очередь, выражается в повышении теплового потока и вызывает поднятие изотермической поверхности Кюри магнетита, приводя к уменьшению мощности магнитоактивного слоя и понижению значений аномального литосферного магнитного поля.

Центрально-Азиатская коллизионная зона. Для выделения крупных структур магнитного поля на территории Центрально-Азиатской коллизионной зоны по данным измерений спутника СНАМР построены карты пространственного распределения вертикальной компоненты (Z_a) его литосферной части (рис. 2).



Рис 2. Карта Z_a над Центрально-Азиатской частью ЦАСП. Т_SH – Тянь-Шань, JGB – Джунгарский блок, QTB – Квантангский блок.

Карта литосферных магнитных аномалий, представленная на рисунке, демонстрирует мозаичную структуру чередующихся крупных областей положительных и отрицательных аномалий.

Положительные аномалии магнитного поля наблюдаются в районах некоторых осадочных бассейнов, таких как Тарим и Джунгарский (JGB). На самом юге карты положительными значениями литосферного аномального поля характеризуется краевая часть субдуцирующей под территорию Евразии Индийской плиты.

Памир находится на северо-западной окраине Индо-Азиатской коллизионной зоны и является наиболее сейсмически активной областью, его изучению уделяется большое внимание мировыми сейсмологами. Над территорией Памира наблюдается значительная изометрическая отрицательная аномалия литосферного магнитного поля.

Для оценки достоверности выделенных "региональных" литосферных магнитных аномалий проведено сравнение с соответствующими "глобальными" спутниковыми аномалиями [5] для аномалии над Таримом. Сравнение подтвердило реальность наблюдаемых аномалий и достаточно высокую степень надежности определения их пространственной структуры.

Построенные по измерениям спутника СНАМР экспериментальные карты аномального магнитного литосферного поля над территорией Центрально-Азиатского складчатого пояса вполне адекватно согласуются с современными взглядами на распределение возможных источников магнитного поля в литосфере Земли на его территории. Магнитное поле достаточно однородно на больших глубинах и демонстрирует влияние активных тектонических процессов.

Литература

- 1. Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Филиппов С.В. Об исследовании тектоносферы с использованием спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 167-182.
- 2. Абрамова Л.М., Абрамова Д.Ю., Фрунзе А.Х. Литосферные аномалии на территории Юго-Восточной Азии по измерениям спутника СНАМР // Физика Земли. 2013. № 1. С. 53-62.
- 3. Добрецов Н.Л. Крупнейшие магматические провинции Азии сибирские эмейшаньские траппы (платобазальты) и ассоциирующие гранитоиды // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 9. С. 870 890.
- 4. Диденко АН., Каплун В.Б., Малышев Ю.Ф., Б.Ф. Шевченко. Структура литосферы и мезозойская геодинамика востока Центрально–Азиатского складчатого п.ояса // Геология и геофизика. 2010. т. 51. № 5. С .629 647.
- Hemant, K., Maus, S. Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique // J. Geophys. Res., 2005, v. 110, p. 1-23.

ВКЛАД ИОНОСФЕРНЫХ ТОКОВ В ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ НА СРЕДНИХ И НИЗКИХ ШИРОТАХ

Бикташ Л.3 ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия lilia_biktash@mail.ru

CONTRIBUTION OF IONOSPHERIC CURRENTS TO GEOMAGNETIC VARIATIONS AT THE MIDDLE AND LOW LATITUDES Biktash L.Z.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia lilia_biktash@mail.ru

The contribution of ionospheric currents to geomagnetic variations at the middle and low latitudes in connection with semi-annual geomagnetic variations is investigated. The behavior of a quiet and disturbed ionosphere is considered depending on the season. It is shown that the ionospheric currents make a significant contribution to the quiet geomagnetic variations, which are explained by the high values of the heliospheric latitude of the Earth and the Russell-Mac Ferron effect.

В настоящее время огромная сеть солнечных, магнитных, ионосферных обсерваторий и космических аппаратов, бороздящих гелиосферу и магнитосферу, помогают решать сложную проблему взаимодействия Солнце-Земля. Наземные магнитные и ионосферные наблюдения остаются базовыми в этих исследованиях. Именно по мере накопления сведений о магнитных и ионосферных вариациях все более выяснялись многообразные связи, существующие между вариациями земного магнитного поля и физическими процессами, происходящими на Солнце. Особое место занимают периодические спокойные солнечно-Sq, которые являются основанием для расчета суточные вариации электрических полей и токов в спокойной ионосфере и магнитосфере Земли. Ѕд вариации являются наиболее устойчивыми из всего спектра вариаций геомагнитных И изучены основательно многими исследователями. Однако тонкости в морфологии и их физические источники все еще до конца не выяснены. Токовая система Sq изменяется день ото дня, усиливаясь летом, реагирует на солнечные вспышки, солнечные затмения и зависит от межпланетных полей и динамики В геомагнитных вариациях обнаружены полугодовые магнитосферы. вариации геомагнитного поля с амплитудой около 15 нТ (амплитуда изменяется в зависимости от солнечной активности) с максимумами около равноденствий и минимумами вблизи солнцестояний. Имеется несколько теорий, касающиеся физического механизма полугодовых вариаций. Одна

31

использует аксиальную гипотезу (т.н. эффект Корти), в которой основную роль играет гелиографическая широта Земли: Земля располагается благоприятно для взаимодействия с потоками солнечной плазмы около 7 сентября, когда ее северная гелиографическая широта 7,2° максимальна, и вблизи 6 марта, когда широта 7,2° максимальна к югу. Другая теория использует равноденственную гипотезу, согласно которой основную роль играет наклон оси эквивалентного геомагнитного диполя. Предполагается, что максимум геомагнитной активности достигается тогда, когда ось диполя перпендикулярна потоку плазмы солнечного ветра, что случается вблизи равноденствий.

В работе Рассела и МакФеррена выдвинута гипотеза, согласно которой полугодовая и суточ-ная вариации геомагнитной активности обусловлены эффективной южной компонентой ММП, которая создается азимутальной компонентой MMΠ вследствие изменения взаимной ориентации солнечно-эклиптической и солнечно-магнитосферной систем координат. Авторы постулируют, что северная В компонента ММП не взаимодействует с магнитосферой. Поэтому они получают две полуволны с максимумами в осенний и весенний периоды в случае +Ву и -Ву секторов ММП соответственно. Все указанные явления оказывают влияние на геомагнитные вариации, но основной эффект оказывает то, что Sq вариации имеют два вихря, и токи в этих вихрях протекают в противоположных направлениях и несколько различаются по амплитудам весной и осенью, что и отражается в геомагнитных индексах как различие в амплитудах полугодовых вариаций в равноденствия. Различие северного и южного полушарий ярко выражено на рис.1 взятой из работы [2], в которой приводятся Н-компоненты станций по которым рассчитывается Dst - вариация. В июле разница в Н –компоненте составляет около 5 нТ, а в декабре разница достигает до 15 нТ.



Рис.1 Сезонные вариации Н-компоненты магнитного поля Земли в северном и южном полушариях.

Особенно четко выражена разница в Sq – вариациях для магнитосопряженных станций, например Германус и Лампедуза разница составляет около 50 нТ в 12 UT (рис.2).



Рис.2 Геомагнитные вариации в спокойный день на геомагнитносопряженных станциях Лампидуза и Германус.

Поскольку в алгоритм вычисления Dst и ASY индекса входит Sqвариация, такое существенное различие в Sq-вариациях северного и южного полушария вносит погрешность при прогнозе Dst и ASY индексов по параметрам солнечного ветра. Алгоритм расчета Dst индекса, представленный в наших работах [3,4] следующий:

$$dDR^{d} / dt = Q^{d}(t) - DR^{d} / \tau, \quad (1)$$

$$Dst = 1/N \sum_{i=1}^{N} (H^{d} - H^{q}) = \Delta \overline{H}, \quad (2)$$

$$Dst = Hmp^{d} + Hrc^{d} - Hmp^{q} - Hrc^{q}, \quad (3)$$

$$Dst = DCF^d + DR^d - DCF^q - DR^q, \quad (4)$$

$$DR^d = Dst - DCF^d + DCF^q + DR^q.$$
 (5)

В уравнения 1-5 входит величина H^q , что представляет собой H компоненту геомагнитного поля в спокойный день. В H компоненту спокойного дня входит не только Sq-вариация, но свой вклад H^q вносит и спокойный кольцевой ток и спокойные токи магнитопаузы, поэтому необходим тщательный анализ поведения спокойных геомагнитных вариаций. Все вышеупомянутые спокойные токи вносят свой вклад в Dst и ASY индексы, которые широко используются в исследованиях солнечно-земных связей.

Литература

- 1. Mursula K. and A. Karinen. Explaning and correcting the excessive semiannual variation in the Dst index. Geophysical Research Letters, V 32, L14107, doi:10.1029/2005GL023132, 2005
- 2. Сизова Л.З., Зайцева С.А. Скорость роста и распад магнитосферного кольцевого тока. Препринт ИЗМИРАН № 52, Москва, 1984

ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ ФОТОСФЕРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Биленко И.А.

ГАИШ МГУ, г.Москва, Россия bilenko@sai.msu.ru

INFLUENCE OF THE PHOTOSPHERIC MAGNETIC FIELD VARIATIONS ON INTERPLANETATY MAGNETIC FIELD AND SOLAR WIND PARAMETRS

Bilenko I.A.

SAI MSU, Moscow, Russia

The periods of the non-polar and polar magnetic field domination are determined during cycles 21-24. The peculiarities of the interplanetary magnetic field and solar wind parameter behavior during each period are analyzed. The importance of taking into account the influence of different dynamics of non-polar and polar magnetic fields on interplanetary magnetic field and solar wind parameters is discussed.

Солнечный ветер – поток плазмы непрерывно расширяющейся солнечной короны, который определяет состояние межпланетной среды и космическую погоду на орбите Земли. Истечение вещества солнечного ветра определяется солнечным магнитным полем из-за высокой электрической проводимости корональной плазмы. Межпланетное магнитное поле (ММП) формируется крупномасштабными магнитными полями Солнца [5, 7]. Параметры солнечного ветра зависят от солнечных магнитных полей разного масштаба [4]. Общее глобальное магнитное поле Солнца является суммой циклически изменяющихся полярных и неполярных фотосферных магнитных полей [1]. Их поведение различно в течение циклов солнечной активности [2] и они являются видимым проявлением динамики полоидальной и тороидальной компонент глобального магнитного поля Солнца.

В настоящей работе рассматриваются вариации ММП и параметров солнечного ветра в зависимости от циклических изменений вклада полярного и неполярного магнитных полей. В качестве исходных использованы данные наблюдений крупномасштабных фотосферных магнитных полей солнечной обсерватории Wilcox [6] и базы данных ОМNI 2 [3].

На рис. 1а показаны циклические изменения суммы модулей положительного и отрицательного полярного (штриховая линия) и неполярного (сплошные линии) крупномасштабных фотосферных магнитных полей для 21-24 солнечных циклов (КО 1642-2172). Видно, что неполярное (Вt) и полярное (Вр) магнитные поля изменяются в противофазе.



Рис. 1. (а) Изменения суммы модулей положительного и отрицательного неполярного (сплошные линии), и усредненная сумма модулей полярного (штриховая линия) крупномасштабных фотосферных магнитных полей. (b) Процент вклада неполярного (толстая линия) и полярного (тонкая линия) магнитных полей. (c) Сумма модулей положительного и отрицательного Вх ММП на орбите Земли. (d) Вариации скорости (красные линии) и плотности (синие линии) солнечного ветра. Для (a, c, d) тонкие линии – значения усредненные за 1 кэррингтоновский оборот (KO), а толстые линии – за 7 KO.

В работе [1] было показано, что магнитное поле может быть рассчитано на разных расстояниях от Солнца как суперпозиция крупномасштабных фотосферных неполярного и полярного магнитных полей:

$$B(t,r) = \left(\frac{B_{phot+}(t) + B_{phot-}(t)}{2} + \frac{B_{pol}(t)}{2}\right) \times \left(\frac{1}{r}\right)^{2}$$
(1)

где: $B_{phot+}(t)$ и $B_{phot-}(t)$ модули положительного и отрицательного неполярного (от -55 до +55 градусов по широте), а B_{pol} – полярного фотосферного магнитного поля. t и r – параметры времени и расстояния. Для оценки
вклада полярного и неполярного полей в общее магнитное поле по формуле (1) был рассчитан относительный вклад неполярного (Вt, толстая линия) и полярного (Вр, тонкая линия) полей, который позволяет выделить периоды доминирования каждой компоненты (рис. 1b). Периоды доминирования полярного поля (P1, P3, P5, P7) выделены серым цветом. На поздних фазах роста в максимумах и начале спада активности доминируют неполярные, а в периоды минимума активности, начале роста и конца спада – полярные поля. На рис. 1с показаны циклические изменения суммы модулей положительного и отрицательного Вх ММП на орбите Земли. На рис. 1d приведены вариации скорости (красные линии) и плотности (синие



Рис. 2. Зависимости скорости (a1-d1) и плотности (a2-d2) солнечного ветра от Вt для каждого периода.

лини) солнечного ветра. Из рис. 1 следует, что в периоды доминирования полярного поля (P1, P3, P5, P7) средняя скорость солнечного ветра резко уменьшается с одновременным уменьшением ММП, а плотность возрастает. В периоды доминирования неполярного поля (P2, P4, P6, P8) наблю-

даются отдельные выбросы в скорости и плотности солнечного ветра и их поведение различается в разных циклах. Хорошо прослеживается отрицательная корреляция между скоростью и плотностью солнечного ветра на масштабах усреднения за 7 КО. Средний уровень плотности солнечного ветра значительно выше в 21 и 22 циклах, чем в 23 и 24, что, повидимому, является следствием наблюдаемого снижения и полярного, и неполярного магнитных полей в 23 и 24 циклах.

На рис. 2 показаны зависимости скорости (a1-d1) и плотности (a2-d2) солнечного ветра от величины процента вклада Вt в общее магнитное поле для каждого периода. Тонкие вертикальные линии разделяют периоды доминирования полярного (P1, P3, P5, P7) и неполярного (P2, P4, P6, P8) полей. Видно, что зависимости имеют разный характер и в зависимости от периода, и от цикла.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости детального учета влияния циклических вариаций и неполярного, и полярного солнечных магнитных полей при исследовании и построении моделей формирования межпланетного магнитного поля и солнечного ветра.

Wilcox Solar Observatory data used in this study were obtained via the web site http://wso.stanford.edu at 2018:03:11 01:13:34 PST courtesy of J.T. Hoeksema. The Wilcox Solar Observatory is currently supported by NASA. Data on the IMF and solar wind parameters were obtained from multi-source OMNI 2 database via the web site <u>https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html</u>. The author thanks the GSFC/SPDF and OMNIWeb for the opportunity to use the data.

Литература

- Bilenko I.A. Determination of the coronal and interplanetary magnetic field strength and radial profiles from large-scale photospheric magnetic fields // Solar Phys. V. 293. P105 24 pp. 2018.
- 2. Bilenko I.A., Tavastsherna K.S. Coronal hole and solar global magnetic field evolution in 1986-2012 // Solar Phys. V. 201. P. 2329-2352. 2016.
- 3. King J.H., Papitashvily N.E. Solar wind spatial scales in and comparison of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // JGR. V. 110. A02104. 2005.
- 4. Lotova N.A., Obridko V.N. Dependence of the solar wind speed on the coronal magnetic field in cycle 23 // Astronomy Letters. V. 39. P. 474-480. 2013.
- 5. Ness N.F., Wilcox J.M. Extension of the photospheric magnetic field into interplanetary space // Astrophys. J. V. 143. P. 23-31. 1966.
- 6. Hoeksema J.T. An atlas of photospheric magnetic field observations and computed coronal magnetic fields: 1976-1985 // Solar Phys. V. 105. P. 205-211. 1986.
- Plyusnina L.A. The relationship between the interplanetary magnetic field inhomogeneous structure and the distribution of large-scale magnetic fields in the photosphere (1969-1975) // Solar Phys. V. 102. P. 191-202. 1985.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЛАВНОГО И АНОМАЛЬНОГО МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ ЮЖНО-КАСПИЙСКОЙ МЕГАВПАДИНЫ

Бондарь Т.Н., Харитонов А.Л.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия bondar@izmiran.ru

RESULTS OF RESEARCHES OF THE MAIN AND ANOMALY MAGNETIC FIELDS IN THE TERRITORY OF THE SOUTHERN CASPIAN MEGA-DEPRESSION Bondar T.N., Kharitonov A.L.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

According to the results conducted by employees of IZMIRAN geomagnetic studies in the waters South of the Caspian, the author of after the calculation and removal of hydro magnetic measurements of the main magnetic field of the Earth was constructed a summary map of the regional magnetic field anomalies for the waters of the South Caspian megadepression. According built the pivot of the summary map of regional magnetic anomaly field of the South Caspian mega-depression made the determination of some physical (magnetic susceptibility) and the morphological parameters basement blocks of relict oceanic crust (the depth of the upper and lower edges basement blocks of the crust, their horizontal sizes). The results of these studies suggest the existence of the fragment of the Paleozoic subduction zone in the South Caspian mega-depression, which was the source of many hydrocarbon deposits.

Под руководством заместителя директора ИЗМИРАН – д.ф.-м.н. Пушкова Александра Николаевича на акватории Южно-Каспийской мегавпадины были проведены масштабные работы по выполнению гидромагнитной съемки. Полученные во время экспедиции данные были переобработаны и переосмыслены с учетом появления новых методов и новых геофизических концепций.

Для изучения глубинных особенностей тектонического строения коры Южно-Каспийской мегавпадины И. В частности, ee реликтовой океанической коры, были использованы различные метолы математического анализа и геофизической интерпретации данных морской магнитной съемки, измерявшей модуль полного вектора индукции (скалярного) магнитного поля этого региона ВДОЛЬ региональных профилей, акваторию Южного Каспия. В через всю качестве математических методов редуцирования аномального магнитного поля из измеренного на акватории Южно-Каспийской мегавпадины модуля полного вектора индукции геомагнитного поля был использован метод сферического гармонического анализа с расчетом гармоник до n=m=13, пространственно-временным соответствующих параметрам главного магнитного поля, генерируемого во внешнем ядре Земли [1].

По результатам проведенных геомагнитных исследований на акватории Южного Каспия, автором после расчета и удаления из гидромагнитных измерений значений главного магнитного поля Земли, была построена сводная карта региональных аномалий скалярного магнитного поля для акватории Южно-Каспийской мегавпадины с учетом поправок за перекос поля на окружающих береговых территориях (рис. 1).



Рис. 1. Сводная карта региональных аномалий скалярного магнитного поля для акватории Южно-Каспийской мегавпадины, с учетом поправок за перекос уровня региональной составляющей этого поля на окружающих территориях.

По данным построенной сводной карты региональных аномалий скалярного магнитного поля Южно-Каспийской мегавпадины выполнено решение обратной задачи спектральным методом и проведено определение некоторых физических (магнитная восприимчивость) и морфоструктурных параметров магнитовозмущающих блоков фундамента, в том числе и блока с реликтовой океанической корой (глубина залегания верхних и нижних кромок магнитовозмущающих блоков фундамента коры, их горизонтальной мощности и некоторые другие параметры) [2, 3]. Проведенные расчеты по статистическим параметрам региональных аномалий магнитного поля позволили выделить два крупных мегаблока Южно-Каспийской мегавпадины (западный и восточный мегаблоки), также принципиально различающиеся не только по структуре аномального магнитного поля, но и по своему глубинному строению (продолжение блока континентальной коры Куринской впадины И реликтовая океаническая кора Туркестанского палеозойского океана). На основе полученных результатов расчетов вышеперечисленным по математическим методам была построена магнитная модель глубинного строения Южно-Каспийской мегавпадины, с определением глубины залегания верхней нижней кромок магнитоактивного слоя И И определением магнитной восприимчивости пород этого слоя (рис. 2).



Рис. 2. Магнитная модель глубинного строения Южно-Каспийской мегавпадины, с определением глубины залегания верхней (h) и нижней (H) кромок магнитоактивного слоя и определением магнитной восприимчивости (χ) пород этого слоя вдоль регионального профиля «Восточный».

Под магнитной моделью исследуемого региона понимается такое распределение в разрезе земной коры границ намагниченных тел, которое удовлетворяет распределению, выделенного из измеренных данных, аномального магнитного поля и не противоречит другим геофизическим данным о строении коры этого региона. В результате была построена карта глубины залегания границы верхней кромки кристаллического фундамента Южно-Каспийской мегавпадины (рис. 3).



Рис. 3. Карта глубины залегания поверхности кристаллического фундамента Южно-Каспийской мегавпадины. 1 – изображение береговой линии, 2 – изолинии глубины залегания поверхности Мохоровичича (в километрах), 3 – изолинии глубины залегания поверхности кристаллического фундамента (в километрах).

Проведенный анализ стационарности модуля приращения полного вектора индукции (скалярного аномального) магнитного поля на акватории Южно-Каспийской мегавпадины свидетельствует о том, что это поле является кусочно-стационарным, причем размеры участков стационарности первом приближении соответствуют В размерам тектонических структур этого региона. Проведенный спектральный анализ скалярного аномального магнитного поля, вдоль субширотных И субмеридиональных морских региональных профилей на акватории

Южно-Каспийской мегавпадины, выявил существенную неоднородность частотных свойств аномального магнитного поля. а также асимметричность в субширотном и субмеридиональном направлениях. На основании результатов расчетов обратной задачи потенциала можно сделать вывод о том, что локальные магнитные аномалии связаны с неоднородностями осадочного слоя, а региональные магнитные аномалии на акватории Южно-Каспийской мегавпадины с интенсивностью 50-1000 нанотесл вызываются влиянием магнитоактивных источников «гранитного» слоя кристаллического фундамента в прибрежной части Каспийского моря и «базальтового» слоя в глубоководной части акватории Южно-Каспийской мегавпадины. На акватории Южного Каспия выделена область, которая может быть связана с зоной палеосубдукции, которая может служить каналом для углеводородной дегазации мантии этого региона и способствовать образованию многочисленных месторождений нефти и газа.

Литература

- 1. Bondar N.N., Burdelnaja I.A, Golovkov V.P., Zvereva T.I. Main geomagnetic field model and space-time structure of external, internal and induced geomagnetic variations derived from satellite magnetic survey // Proc/ of the 3nd Internat. Sci. Team Meeting.Grasse. France. 2000.
- 2. Серкеров С.А., Харитонов А.Л. Некоторые оценки глубины залегания возмущающих масс гравитационных и магнитных аномалий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 24. № 1. С. 117–123. 1984.
- 3. Серкеров С.А., Цветков Ю.П., Харитонов А.Л. Применение метода взаимных корреляционных функций для интерпретации данных градиентных магнитных съемок // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 35. № 6. С. 172–176. 1995.

ТРИАДА «ГЕЛИОФИЗИКА-ГЕОМАГНЕТИЗМ-МЕТЕОРОЛОГИЯ» КАК ПУТЬ К ПОНИМАНИЮ АТМОСФЕРНОЙ ДИНАМИКИ

Вальчук Т.Е.

ИЗМИРАН им. Н.В.Пушкова РАН, г.Москва, г.Троицк, Россия <u>valchuk@izmiran.ru</u>

TRIAD «HELIOPHYSICS-GEOMAGNETISM-METEOROLOGY» AS A PATH TO UNDERSTANDING OF ATMOSPERIC DYNAMICS

Valchuk T.E.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

Trinity of these sciences is a perspective way to understanding of meteorological processes on Earth with the solar-terrestrial physics (STP). This new science has been based by the first director of IZMIRAN N.V. Pushkov (1903-1981). The main concept of STP is an interrelation of space and terrestrial processes in all their variety, that concept is confirmed reasonably now.

Триединство этих наук – перспективный путь к пониманию метеорологических процессов на Земле в рамках солнечно-земной физики (C3Ф) – новой науки XX века, которая была основана первым директором ИЗМИРАН Н.В. Пушковым (1903-1981 гг.). Основная концепция СЗФ – взаимосвязь космических и земных процессов во всем их многообразии обоснованно подтверждается в настоящее время посредством выявления конкретных закономерностей влияния гелиофизических процессов на множество земных проявлений: магнитосферные процессы, ионосферную динамику и атмосферные процессы во всем их многообразии - от экстремальных метеопроявлений. Главным природным сезонных ДО фактором, определяющим вариации: переменного магнитного поля Земли, солнечных космических лучей, авроральных высыпаний, ионосферных параметров, а также всего разнообразия климатических и погодных трансформаций в атмосфере – над сушей и водными пространствами Земли – является приток солнечной энергии к Земле. Развитие техногенной обеспечивает поступление информации он-лайн, цивилизации позволяет давать прогнозы : геомагнитной активности на сайте ИЗМИРАН, метеопрогноз – в средствах массовой информации, а также проводить научные исследования по влиянию гелиофизических процессов солнечной активности, которые в наше время подробно регистрируются – в их влиянии на атмосферные процессы. Основная задача настоящей работы выделить продуктивные направления связей в системе Солнце – Земля, ответственных за вариации погоды и климата, на материале календаря циркуляционных механизмов (ЭЦМ), составленного элементарных

сотрудниками Института географии РАН с 1899 г., продолженного по настоящее время усилиями Н.К. Кононовой [1], развивающей эту тематику сегодня.

В последнее время часто говорят о "короне Солнца, в которой пребывает Солнечная система", что не совсем корректно. Это пространство – суть гелиосфера, оно формируется галактическим ветром, как магнитосфера Земли – солнечным ветром (СВ). Заполняет гелиосферу СВ – он истекает со всей поверхности светила – его потоки разнообразны: высокоскоростной СВ из областей корональных дыр (КД), более замедленный – с фотосферы (всей видимой поверхности Солнца), а дополняют картину – мощные вспышечные потоки плазмы, порожденные в активных областях (АО) на Солнце.

Магнитосфера Земли [5] сформирована непрерывным течением CB. Ее граница – переходный слой, разделяющий магнитное поле (МП) Земли и МП в течениях CB.

Солнечный ветер, омывающий магнитосферу Земли, инициирует создание токовых систем и динамичных плазмосодержащих областей в ионосфере магнитосфере И Земли. В хвосте магнитосферы пересоединяются силовые линии – присходит сброс частиц в авроральные овалы Северного и Южного полюсов, возникают вертикальные токи, вспыхивают полярные сияния – их структура явственно видна теперь на космических снимках – осуществляются в наблюдениях теоретически Я.И.Фельдштейном (ИЗМИРАН) О.В.Хорошевой предсказанные И (НИИЯФ МГУ) выспания авроральных частиц в полярных регионах.

Самые энергичные возмущения в магнитосфере – это магнитные бури (МБ). Резкая вариация параметров магнитосферы, обусловленная приходом высокоскоростных, геоэффективных потоков CB к магнитосфере: содержащих потоки плазмы высокой концентрации и геоэффективный BZ (-) отрицательный компонент межпланетного магнитного поля (ММП) способствует передаче энергии от СВ к магнитосфере. В ходе развития процессов магнитной бури возникает сильное понижение Н-компонента геомагнитного поля в средних и низких широтах, кольцевой ток в экваториальном поясе Земли – глобальное проявление МБ. Она обычно протекает в виде 3-х фаз – начальной фазы, главной фазы и фазы восстановления. МБ с внезапным началом возникают при резком ударе вспышечного плазменного потока, пришедшего к магнитосфере, МБ с постепенным началом инициированы нарастанием мощности в потоке СВ - например, из корональной дыры (КД). МБ имеют особенности рекуррентного повторения в кэррингтоновских оборотах Солнца, если АО сохраняется и может генерировать новые вспышечные потоки. Подобные повторения МБ происходят также при рекуррентных прохождениях долгоживущих КД.

В ИГ РАН Б.Л. Дзердзеевским и его последователями [1] установлена смена циркуляционных режимов в атмосфере Земли, их чередование и воспроизводство за 1899-2017гг. Календарь элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) в настоящей работе является основой для исследования солнечно-земных связей.

Наша задача – сопоставить климато-погодные вариации [1] с каталогами магнитных бурь (МБ) [5,6], продолженных с 2017г. каталогами по данным трехкомпонентных геомагнитных вариационных станций в ИЗМИРАН, которые сменили работавшую с 1950 г. по 2016г. включительно обсерваторию "МОСКВА".

Отметим, что исторические работы [5,6] были основой в разработке классификации ЭЦМ, осуществленной в лаборатории климатологии ИГ РАН в течение 1970-1979 гг. Исследование циркуляции атмосферы внетропических широт Северного полушария приобрело конкретную форму описания в виде выделенных характерных типов ЭЦМ – число типовых ЭЦМ равно 41, при этом были охвачены все наблюдавшиеся формы циркуляции в суточной дискретизации. Для 41 типа ЭЦМ были построены динамические схемы ЭЦМ, проанализированы различия, вызванные особенностями их развития в разные периоды.

Только при тщательном анализе чередования магнитных бурь в сопоставлении с календарем ЭЦМ за длительные периоды могут быть выявлены характер и уровень воздействия Солнца на ЭЦМ Северного полушария.

Поиск воздействия проявлений солнечной активности в виде магнитных бурь на атмосферные циркуляции, основанный на статистических оценках, позволяет сделать выводы о том, что

1) выявлена тенденция пролонгации ЭЦМ при реализации магнитных бурь, 19 цикл СА – требует особого рассмотрения.

2) смена ЭЦМ при протекании геомагнитных бурь способствует переходам к более турбулентным формам ЭЦМ.

Основанием трактовки является поступление энергии в магнитосферу при протекании МБ.

Литература

1 Кононова Н.К. Классификация ЭЦМ Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. // РАН, Институт географии, отв. редактор А.Б. Шмакин, Воентехиздат, Москва, 372 с., 2009 г.

2 Ссылка на всеволновые изображения Солнца: Solar soft latest events, http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events/.

3 Обридко В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. // М.: Наука. Главная редакция ф.-м. литературы . 256 с., 1985.

4 Филиппов Б.П. Эруптивные процессы на Солнце. // М., ФИЗМАТЛИТ, 216с., 2007, ISBN 978-5-9221-0093-9/

5 Б.Л. Дзердзеевский, В.М. Курганская, З.М. Витвицкая. Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов. // Труды НИУ ГУГМС, Гидрометиздат, 1946, 80 с.

6 Б.Л.Дзердзеевский Избранные труды. Общая циркуляция атмосферы и климат. // Москва, Наука, 1975, 286 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ШИРОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

Воробьев А.В., Воробьева Г.Р.

ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет, г.Уфа, Россия geomagnet@list.ru

ANALYSIS OF LATITUDE DEPENDENCE OF GEOMAGNETIC VARIATIONS VALUES DISTRIBUTION

Vorobev A.V., Vorobeva G.R.

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Data from the INTERMAGNET network magnetic observatories, located along the same meridian, is used to analyse a latitude dependence of distribution and statistical parameters, changes of probability density functions and distribution law for northern and eastern components of geomagnetic field variations vector. The observed functional dependencies are approximated and presented both graphically and analytically.

Во многих современных задачах как прикладного, так и фундаментального характера, напрямую или опосредованно связанных с оценкой геомагнитной активности, знание характера широтной зависимости параметров распределения и статистических характеристик значений вариаций геомагнитного поля (ГМП) представляет вполне определенный интерес.

Кроме этого, по типу функции, аппроксимирующей распределение плотности вероятности значений геомагнитных вариаций (ГМВ), можно судить об определяющем их физическом механизме. Так, например, в результате наблюдения суммирующего воздействия многих случайных слабо взаимозависимых величин, каждая из которых вносит малый вклад отноформируется нормальное распределение; сительно общей суммы, в замкнутой системе энергия ее компонентов распределяется по экспоненциальному закону или закону Лапласа (двойное экспоненциальное распределение); случайный мультипликативный набор из нескольких параметров приводит к логнормальному распределению и т. д. При этом отдельной подзадачей является анализ тяжелых хвостов распределения, так как в распределениях такого рода дисперсия исследуемой величины определяется преимущественно редкими интенсивными (а не частыми небольшими) отклонениями.

В проводимых исследованиях в качестве исходных данных использовались минутные временные ряды типа «definitive» [3], публикуемые сетью магнитных обсерваторий INTERMAGNET (http://www.intermagnet.org) [4], в том числе отражающие вариации северной (X) и восточной (Y) составляющих вектора ГМП.

47

С целью минимизации влияния на результат исследований сторонних факторов, например, таких, как распределение источников геомагнитных данных по долготе, эффекты сезонных вариаций (например, [1, 2, 5]), среди которых асимметрия магнитосферы, наблюдаемая вследствие изменения угла наклона оси вращения Земли относительно линии Земля-Солнце, в настоящей работе рассматриваются данные одиннадцати обсерваторий (ABK, LYC, UPS, HLP, BEL, HRB, THY, GCK, HER, KMH, TSU), расположенных вдоль меридиана 19.1 \pm 1.75° в.д., в период весеннего равноденствия за нескольких лет.

Далее, для каждой обсерватории были сформированы выборки, отражающие вариации соответствующих составляющих вектора ГМП относительно годового тренда.

В результате было показано, что характер статистического распределения значений северной составляющей ГМВ переходит из формы, имеющей признаки гауссовского распределения на экваторе, в экспоненциальную и далее, вследствие утяжеления хвостов, – в логнормальную форму на полюсах (Рис. 1). При этом форма распределения восточной составляющей ГМВ на средних широтах наилучшим образом соответствует нормальному закону и трансформируется через экспоненциальную в логнормальную при движении как в сторону полюсов, так и экватора.



Рис. 1. Распределение значений *Х*-составляющей ГМВ для приэкваториальной (TSU), среднеширотной (GCK) и полярной (ABK) магнитной обсерватории.

Из вышесказанного следует, что в формировании *X*-составляющей ГМВ на экваторе и *Y*-составляющей на средних широтах все факторы вносят сопоставимый вклад. Однако при приближении к полюсам (а в случае *Y*-составляющей как к полюсам, так и к экватору) вклад доминирующих факторов, например, таких, как кольцевой ток (на экваторе) и суббури (в полярных областях), становится определяющим. Широтная зависимость параметров распределения для северной и восточной составляющих ГМВ на интервале широт от 45 до 90 ° хорошо аппроксимируется показательной функцией вида $f(x) = ab^x + c$, а на широтах от 0 до 90 ° – параболой, заданной квадратичной функцией (Рис. 2).



Рис. 2. Характер широтной зависимости параметров распределения ГМВ.

Таким образом, основываясь на характере широтной зависимости, справедливо заметить, что интенсивность вариаций *X*-составляющей вектора ГМП убывает при движении в сторону средних широт и достигает минимума на 45-й параллели, в то время, как минимум интенсивности вариаций *Y*-составляющей ГМВ наблюдаются на экваторе. Максимальные же значения параметров распределения как для северной, так и для восточной составляющей вариаций вектора ГМП наблюдаются в полярных областях планеты.

Литература

- 1. Куркин В. И., Пирог О. М., Полех Н. М. Циклические и сезонные вариации ионосферных эффектов геомагнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 4 № 5. С. 634-642. 2004.
- 2. Нусинов А. А. и др. Сезонные вариации статистических распределений индексов геомагнитной активности / А. А. Нусинов, Н. М. Руднева, Е. А. Гинзбург, Л. А. Дремухина // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55 № 4. С. 511–516. 2015.
- 3. Intermagnet technical reference manual [Электронный ресурс] (http://intermagnet.org/publications/intermag_4-6.pdf). Дата обращения: 5.02.2019.
- 4. Love J. An International Network of Magnetic Observatories // EOS, transactions, American geophysical union. Vol. 94. No. 42. P. 373–384. 2013.
- 5. Russel C. T, McPherron R.L. Semiannual Variation of Geomagnetic Activity. // J. Geophys.Res. V.78. N1. P. 92. 1973.

АНАЛИЗ МАГНИТНОГО И ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЕЙ НАД ЗОНАМИ МАНТИЙНОЙ СУБДУКЦИИ

Гаврилов С.В.¹, Харитонов А.Л.² ¹ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

²ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия <u>gavrilov@ifz.ru</u>

THE ANALYSIS OF MAGNETIC AND GRAVITY FIELDS UNDER MANTLE SUBDUCTION ZONES

Gavrilov S.V.¹, Kharitonov A.L.²

¹IFZ RAS, Moscow, Russia ²IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

Using a known hypothesis of Barazangi M. that linear geological and tectonic zones represent striate structures which are parallel to the paleo volcanic mountain belt located at an edge of a mantle subduction wedge and which can be in limits of some interval of distances from a mountain volcanic belt, and in size of this interval and to the period of an arrangement of linear magnetic and gravity anomalies of paleo subduction speed on the example of some regions is estimated.

Известно, что построение надежной физико-математической модели глубинного строения любого региона имеет существенное значение как в теоретическом плане, для исследования тектонического строения этого региона, так и в прикладном аспекте - для прогнозирования поисков полезных ископаемых на исследуемой территории. Постановка задачи данной статьи связана с разработкой методики оценки некоторых глубинных геодинамических параметров мантии Земли, на основе определения расстояния вулканической островной OT гряды, использующей известную гипотезу [1] о том, что квазилинейные магнитные и гравитационные зоны представляют собой полосчатые вулканическому которые параллельны горному структуры, поясу, расположенному у ребра мантийного субдукционного клина, и которые могут находиться в пределах некоторого интервала расстояний от горного вулканического пояса. Первые исследования в этом направлении были сделаны зарубежными коллегами на примере субдукционной зоны в районе литосферной плиты Наска [1]. На территории России имеется параметрам расположения несколько регионов, где по островных палеовулканических магнитных, гравитационных полей) ДУГ (и экспериментально могут быть проверены, основанные на известной теоретические расчеты гипотезе [1], об направлении угловом субдукционного погружения литосферных или палеолитосферных плит. В

51

частности, в районе полуострова Камчатка и островной вулканической Курильской гряды, имеются надежные гравитационные и магнитные данные [2], позволяющие рассчитать истинные параметры наклона субдукционного клина Тихоокеанской литосферной плиты под Восточно-Азиатскую плиту (рис. 1).



Рис. 1. Плотностная модель литосферы-астеносферы в переходной зоне Охотского море – Курильская гряда - Тихий океан [2]. Кривые: модель А и модель В – остаточные мантийные аномалии силы тяжести. 1-гравитационный эффект эклогитового слоя литосферы; 2- гравитационный эффект погружающейся плиты литосферы; 3- гравитационный эффект плотностных неоднородностей литосферы и астеносферы; 4-подошва литосферы.

Можно легко соответствие теоретических показать И экспериментальных расчетов о направлении угла погружения мантийного субдукционного клина и по некоторым другим регионам [3]. Еще одним важным регионом России, где можно проверить некоторые расчетные геодинамические параметры мантии в зоне палеосубдукционного клина, является территория Печорской плиты палеозойского геохронологического [3]. особенностью периода Существенной региональных гравитационных аномалий Печорской плиты является периодичность их пространственного расположения вдоль широтного направления [4] (рис. 2).



Рис. 2. Схема сопоставления плотностных неоднородностей земной коры Тимано-Печорского региона и эпицентров землетрясений на глубине до 50 км [3]. Условные обозначения: звездочка – эпицентр землетрясения, балл по шкале Рихтера, в скобках дата землетрясения.

Так, например, вытянутые в меридиональном направлении, эти периодические региональные гравитационные и магнитные аномалии Тимано-Печорского региона представляют собой своеобразные полосы шириной ~ 300 км, параллельные Уральскому хребту и расположенные с периодичностью примерно 300 км [3].



Рис. 3. Схема палеосубдукционного мантийного клина, образовавшегося в процессе палеозойского погружения литосферной плиты палеозойского Уральского океана (современное название Западно-Сибирская плита) под Русскую платформу, при относительном движении Западно-Сибирской плиты на запад. 1 – Уральская палеовулканическая гряда; 2 – направление конвективного потока нагретого вещества из мантии к поверхности Земли; 3 – литосферные тектонические разломы [4].

Кроме того, распределение гравитационных аномалий в редукции Буге поперек растягивающего поля напряжений Уральской

геотектонической системы ряд геологических аргументов И В свидетельствуют, формирования Уральского что после горного палеовулканического пояса в пермский период эволюционного развития Земли (300-250 млн. лет назад) происходило пододвигание Уральской палеоокеанической плиты (Западно-Сибирской плиты) под Русскую платформу [4], под действием относительного движения этой территории на запад (рис. 3).

Кроме того, выделенная нами система субпараллельных структур на территории Западо-Сибирской плиты [4], Тимано-Печорского [3], Крымо-Кавказского [5] регионов объясняется нами как действие конвективных вихревых структур мантии вокруг зоны палеосубдукции. Подтверждением изложенного нами механизма взаимодействия конвективных мантийных проявившихся в поверхностных геологических структурах, вихрей. является наличие подобных структур, которые были обнаружены еще и других районах субдукционных структур Мирового океана [6]. Конечно описанная в данной статье полосчатая система геолого-геофизических особенностей региона Тимано-Печорского региона не уникальна. Имеются подобные аналоги этой системы и в других регионах. Например, такие субпараллельные поверхностные геологические структуры проявляющиеся в недавней или более поздней геологической истории обнаружены в пределах Марианского и Кермадек участков субдукционных зон, приведенных в работах [6].

Литература

- 1 Barazangi M., Isacks B.L. Spatial Distribution of the Earthquakes and Subduction of the Nazca Plate beneath South America Geology. V.4. P. 686–692. 1976.
- 2 Гайнанов А.Г., Пантелеев В.Л. Морская гравиразведка: Учебное пособие для вузов. М.: Недра, 214 с. 1991.
- 3 Гаврилов С.В., Харитонов А.Л. О конвективных вихрях Карига в палеозойском мантийном клине под Тимано-Печорской плитой как механизме выноса углеводородов // Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. № 8(272). С. 12-16. 2017.
- 4 Гаврилов С.В., Харитонов А.Л. Оценка скорости субдукции Русской платформы под Сибирскую в палеозое по распределению зон выноса мантийных углеводородов в Западной Сибири // Геофизические исследования. Т.16. № 4. С. 36-40. 2015.
- 5 Gavrilov S.V., Kharitonov A.L. On the subduction velocity of the Black sea micro-plate and the mantle wedge thermal convection as a possible mechanism of mantle hydrocarbons transport in the rear of the Crimea mountains // Modern Science. № 6-1. P. 15-22. 2018.
- 6 Кариг Д. Происхождение и развитие окраинных бассейнов западной части Тихого океана. В сб. Новая глобальная тектоника. М.: Мир, С. 266-288. 1974.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕКЦИИ ПОД ЧЕРНОМОРСКОЙ ПЛИТОЙ

Гаврилов С.В.¹, Харитонов А.Л.²

¹ИФЗ РАН, г. Москва, Россия ²ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия <u>ahariton@izmiran.ru</u>

MODELLING OF HYDRODYNAMIC PROCESSES OF THERMAL CONVECTION UNDER THE BLACK SEA PLATE

Gavrilov S.V.¹, Kharitonov A.L.² ¹IFZ RAS, Moscow, Russia ²IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The aim of the paper is implementation of new highly effective methods for numerical modeling of the geodynamic processes of small-scale thermal 2D finite-amplitude convection in the mantle wedge at very small subduction angle and associated with these processes prospects of oil and gas potential of the Black Sea region.

Согласно [1], взаимодействие литосферных плит В Крымско-Кавказском регионе приводит к процессу пододвигания Черноморской микроплиты под Крымский полуостров (под Скифскую плиту). Вследствие этого происходит образование сейсмофокальной плоскости, по которой в результате сейсмических толчков поднимается литосфера под территорией Крыма. Скорости современных вертикальных движений ____ поднятия Горного Крыма и опускания прикрымской области Черноморской микроплиты – составляют соответственно V=4 мм/год и V=10 мм/год. Черноморской микроплиты Крымский Скорость субдукции под полуостров остается неопределенной. Согласно [2, 3] в мантийном клине мелкомасштабной термической конвекции. возможны два типа вызываемой диссипативным нагревом: 3D конвекция в виде струй, восходящих к вулканической цепи, и 2D конвекция в виде вихрей Карига, ориентированных поперек субдукции. В [2] показано. что пространственное разделение этих двух типов термической конвекции возникает вследствие зависимости коэффициента эффективной вязкости мантии от температуры, причем вихри Карига, если они формируются, то располагаются позади вулканической гряды. О скорости субдукции Черноморской микроплиты под Крымский полуостров нет определенных факт субдукции очевиден и проявляется суждений. ХОТЯ сам В регистрируемой сейсмичности. Параллельно южному берегу Крыма расположен глубоководный желоб. В [1] изображены извергающиеся вулканы в Горном Крыму. Логично предположить, что два максимума аномалии теплового потока, наблюдаемые в южной части полуострова [1],

55

обязаны своим происхождением конвективному соответственно 3D и 2D подводу тепла из мантийного клина. Второй из этих максимумов, расположенный в тылу Горного Крыма и намного более выраженный, имеет двумерную структуру и, видимо, связан с 2D конвекцией в мантийном клине. Численное моделирование 2D конвекции, происходящей в форме вихрей Карига и предположительно выносящей тепло, может позволить высказать суждение о средней скорости субдукции Черноморской микроплиты под Крымский полуостров (Скифская плита) и о реологический параметрах мантии.



Рис. 1. (1) – Схематическое поперечное сечение области субдукции Черноморской микроплиты под Крымский полуостров (Скифскую плиту). С₁ и С₂ – зоны восходящих конвективных 3D и 2D потоков в областях максимумов теплового потока; вихревые линии тока – возможные вихри Карига, соответствующие 2D конвекции в мантийном клине. (2) – распределение теплового потока в южной части Крыма. (3) – расположение Черноморской микроплиты, субдуцирующей под Крымский полуостров, и сейсмофокальной плоскости под Горным Крымом. По [1].

Показано. что расстояние между глубоководным желобом И имеющимся позади горной гряды максимумом аномалии теплового потока соответствуют средней скорости субдукции V = 45 мм в год при наблюдаемом угле субдукции 15°. Предполагая, что второй, более удаленный от желоба, максимум теплового потока *Q* возникает над конвективным течением, восходящим к области С2 (рис.1), и размер ячейки равен расстоянию конвективной между минимумами О. расположенными по обе стороны максимума Q (т.е. минимумы Oрасположены над нисходящими конвективными течениями), можно оценить размер конвективной ячейки $L = 250 \ \kappa M$. Для первоначальной средней скорости субдукции Черноморской микроплиты оценки рассмотрим зависимость от горизонтальной координаты *x* инкремента $\gamma(x)$ конвективной неустойчивости в виде валов, ориентированных поперек субдукции для модели мантии с постоянной вязкостью, зависимость которой от температуры и давления учитывается усредненным образом, а именно, множитель, описывающий зависимость вязкости от температуры и давления, считается равным его среднему значению. Зависимости $\gamma(x)$, вычисленные по аналитическим формулам в [2], приведены на рис.2 для угла субдукции $\beta \approx 15^{\circ}$, размере конвективной ячейки 250 км и различных скоростей субдукции V, указанных на рисунке в мм в год,



Рис. 2. Распределение $\gamma(x)$ инкрементов конвективной неустойчивости как функции горизонтального расстояния *x* при различных скоростях субдукции *V*, указанных в *мм* в год. В зоне (*x*₁, *x*₂) с $\gamma(x)>0$ протяженностью 250 км при *V*=40.5 *мм/год* возбуждается конвекция, обеспечивающая аномальный 2D тепловой поток.

Для согласованной более построения точной модели мелкомасштабной термической конвекции в мантийном клине полагаем вначале Ra = 0, Di = 0, т.е. учитывая только теплопроводность и адвекцию тепла, и интегрируя по пространственным координатам методом конечных элементов на сетке 104 х 104 и по временной координате методом Рунге-Кутта 3-го порядка при V=45 мм в год, получим квазистационарные безразмерные Ψ и $T = T_R$, где линии тока на рисунке показаны с интервалом 0.25, а изотермы – с интервалом 0.05. Результаты расчета для неньютоновской реологии, приведены для C_w=10⁻³ весовых %% и для С_w=3x10⁻¹ весовых %%. Скорость V=45 мм в год выбрана как наиболее соответствующая наблюдаемому распределению теплового потока. Плита, субдуцирующая с заданной скоростью V, показанная равноотстоящими диагональными линиями тока, считается жесткой, а коэффициент вязкости в зоне трения литосферных плит при температурах ниже 1200 К понижается на два порядка величины. Можно видеть, что возвратный поток, индуцируется в виде единого вихря при C_w=10⁻³ весовых %%, и в виде 2-х расположенных один над другим вихрей Карига, при C_w=3x10⁻¹ весовых %%, причем эти вихри сильно сжаты в вертикальном направлении, и верхний (с $\Psi > 0$) вращается по часовой стрелке, а нижний (с $\Psi < 0$) – против часовой стрелки. Микро-вихри размером $10^2 \kappa M$, формирующиеся между встречными потоками внутри верхнего вынужденного течения, очевидно, обязаны своим происхождением неустойчивости типа тангенциального разрыва (неустойчивости Кельвина-Гельмгольца).

Таким образом, расчет для неньютоновской реологии показывает, что при снижении вязкости на три порядка, т.е. при $C_w=3x10^{-1}$ весовых %%, в мантийном клине развивается конвекция в виде двух микровихрей, могущая обеспечить аномальный 2D тепловой поток. Густота линий тока соответствует скорости конвективных движений более 10 $M \times cod^{-1}$. Отметим, что образование в мантийном клине конвективных валов, ориентированных поперек субдукции, как на рис.3, характерно для малых углов субдукции, и уже при $\beta=30^{\circ}$ поперечные валы не возникают [3, 4].



Рис. 3. Квазистационарные распределения безразмерной функции тока в мантийном клине с учетом эффектов диссипативного нагрева и конвективной неустойчивости для неньютоновской реологии и концентрации воды $C_w=3x10^{-1}$ весовых %%. Восходящий конвективный поток показанный стрелкой (с), может выносить мантийные углеводороды к области C_2 на рис.1 на дневной поверхности Крыма.

При рассмотренном угле субдукции $\beta = 15^{\circ}$ конвекция не возникает при скорости $V < 4 \ cm \times cod^{-1}$. Очевидно, наличие двумерной конвекции в узком мантийном клине связано с бо́льшими, чем в широком клине, вязкими напряжениями и, следовательно, с бо́льшим диссипативным нагревом. Для неньютоновской реологии мантии конвекция при V = 45 $mm \times cod^{-1}$ возникает при концентрации воды $C_w = 3 \times 10^{-1}$ весовых %%.

Литература

- 1. Ниметулаева Г.Ш. Особенности воздействия природных факторов и их влияние на формирование оползневых процессов Крыма // Культура народов Причерноморья. №83. С. 110-113. 2006.
- 2. Гаврилов С.В., Харитонов А.Л. Оценка скорости субдукции Русской платформы под Сибирскую в палеозое по распределению зон выноса мантийных углеводородов в Западной Сибири // Геофизические исследования. Т.16. № 4. С. 36-40. 2015.
- 3. Gerya T.V. Future directions in subduction modeling // J. of Geodynamics. V. 52. P. 344-378. 2011.
- Gavrilov S.V., Kharitonov A.L. Subduction velocity of the Russian plate under the Siberian one at Paleozoic: a constraint based on the mantle wedge convection model and the oil- and gas-bearing zones distribution in Western Siberia // Modern Science. № 16. P. 160-163. 2016.

СТАТИСТИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СВЯЗИ С СОЛНЕЧНОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Гайворонская Т.В., Карпачев А.Т. ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия <u>karp@izmiran.ru</u>

STATISTICS OF THE EARTHQUAKES IN RELATION TO SOLAR AND GEOMAGNETIC ACTIVITY

Gaivoronskaya T.V., Karpachev A.T.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The magnetic flux of EUV arcades and dimmings associated with two solar eruptive flares of early September 2017 are determined. The estimated scale of space weather disturbances, caused by them, turned out to be close to observed Forbush decreases and geomagnetic storms. General circumstances of the solar eruptions and peculiarities of the geospace disturbances are discussed.

Периодические изменения ежегодного числа крупных землетрясений были сопоставлены с солнечной и геомагнитной активностью. Во время векового периода с 1910 по 2010 год, включающего 11-летние циклы солнечной активности с 15-го по 23-ий, были рассмотрены землетрясения с магнитудой М≥7 [1-3]. Оказалось, что наибольшее число землетрясений произошло в 1940-ые годы перед вековым максимумом солнечной активности, в годы максимума их число сократилось. Однако, землетрясения с магнитудой М≥7 случаются 10-30 раз за год и их число может оказаться недостаточным для выявления долговременных статистических закономерностей.

За три 11-летних солнечных цикла вариации глобального числа землетрясений рассмотрены более детально, с учетом их стратификации по магнитудам. Количество катастрофических землетрясений с магнитудами М≥8 исчисляется единицами, число землетрясений с М≥7 не превосходит 30-40, а землетрясений с магнитудой М≥6 случается за год 100-200. На Рис.1 ступеньками показано изменение ежегодного числа землетрясений с М≥6 и М≥7 на фоне солнечных циклов. Вверху стрелками отмечены годы, когда происходили землетрясения с М≥8. Здесь же плавной кривой указан долговременный ход солнечной активности, полученный сглаживанием числа солнечных пятен R посредством 11-летних скользящих периодов. Статистика землетрясений с магнитудой М≥6, достаточно полно отражающая планетарную сейсмической и солнечной активности противоположны. Это не так четко прослеживается для 11-летних сейсмических ва-

риаций, но долговременная тенденция хорошо заметна. В то время как солнечная активность падает, сейсмическая - растет.



Рис.1 Вариации глобального числа землетрясений с магнитудами М≥6, М≥7 и М≥8 за последние три 11-летних солнечных цикла.

Кроме полученных долговременных закономерностей было рассмотрено непосредственное соотношение день ото дня между развитием геомагнитных бурь, обусловленных солнечной активностью, и крупными сейсмическими событиями. Были построены статистические распределения числа землетрясений с магнитудой М≥6 в зависимости от геомагнитной возмущенности.



Рис.2. Распределение N(Kp) количества дней в году в зависимости от величины геомагнитного индекса Kp и условное распределение N(Kp/Eq) количества этих же дней при условии, что произошло землетрясение с $M \ge 6$.

Геомагнитная возмущенность в каждый конкретный день характеризовалась максимальным в этот день значением индекса Кр, Кр=0,1,... 9. По данным за 1992 год, имеющим средние показатели солнечной активности, было построено распределение количества дней в зависимости от их геомагнитной возмущенности, N(Kp). Затем так же было подсчитано количество дней, в которые геомагнитная возмущенность характеризовалась индексом Кр, но при условии, что в эти дни случились землетрясения с магнитудой М≥6. Оба эти распределения N(Kp) и N(Kp/Eq) показаны на Рис.2.

Вероятность P(Kp \cap Eq) одновременного наступления двух событий, и геомагнитного возмущения с индексом Kp, и землетрясения с магнитудой $M \ge 6$, в один и тот же день может быть представлена следующим образом:

$$P(Kp \cap Eq) = P(Kp/Eq)P(Eq) = P(Eq/Kp)P(Kp),$$
(1)

здесь вероятность P(Kp) = N(Kp)/N, а также условная вероятность P(Kp/Eq) = N(Kp/Eq)/N определяются по распределениям N(Kp) и N(Kp/Eq), построенным выше, N – число дней в году. Вероятность P(Eq) того, что наступит землетрясение с магнитудой $M \ge 6$, можно вычислить как отношение общего количества таких землетрясений за год к числу дней в году.



Рис.3. Условная вероятность P(Eq/Kp) наступления землетрясения с магнитудой $M \ge 6$ при текущей геомагнитной возмущенности с индексом Kp.

Теперь условная вероятность P(Eq/Kp) того, что при заданной геомагнитной возмущенности Кр произойдет землетрясение с магнитудой М \geq 6, может быть найдена из равенства (1). Полученное распределение P(Eq/Kp)показано на Рис.3. Из распределения видно, что вероятность наступления землетрясения превосходит среднестатистические показкния P(Eq) при возмущенности Кр=5 и, в целом, больше для дней со слабой геомагнитной активностью. Во время больших геомагнитных бурь при Кр=6-8 вероятность землетрясений заметно падает. Поэтому можно ожидать, что сейсмические события чаще всего происходят или на спаде геомагнитных бурь или в спокойные периоды. Это не противоречит отмеченной выше долговременной тенденции в поведении солнечной и сейсмической активности.

Литература

- 1. Гайворонская Т.В., Карпачев А.Т. Вариации сейсмической активности на фоне солнечных циклов / Конференция "Астрономия-2018". Секция солнечно-земная физика. Октябрь 2018, ГАИШ МГУ, Москва.
- Gaivoronskaya T.V. Variations of seismic activity during solar cycles / Book of abstracts. VIII International Crimean Conference "Cosmos & Biosphere". September 28 -October 3, 2009. Sudak, Crimea, Ukraine, 2009, P.24-25.
- 3. Gaivoronskaya T.V. Periodic variations of seismic and geomagnetic activity / International Symposium in memory of Prof. Galperin «Auroral Phenomena and Solar-Terrestrial Relations». February 4-7, 2007, Space Research Institute, Moscow, P. 96.

МАГНИТНАЯ БУРЯ 25-26 АВГУСТА 2018 Г. – ПОСЛЕДНЯЯ МАГ-НИТНАЯ БУРЯ УХОДЯЩЕГО 24-го ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АК-ТИВНОСТИ

Громова¹ Л.И., Клейменова² Н.Г., Громов¹ С.В., Малышева² Л.М.

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия ²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия e-mail: gromova@izmiran.ru

MAGNETIC STORM ON 25-26 AUGUST 2018 AS THE LAST MAG-NETIC STORM OF THE OUTGOING SOLAR CYCLE 24

Gromova¹ L.I., Kleimenova² N.G., Gromov¹ S.V., Malysheva² L.M.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia ²IPE RAS, Moscow, Russia

The behavior of dayside high-latitude geomagnetic variations as a signature of the last strong magnetic storm of the solar cycle 24 (25-26 august 2018) are considered. The main feature of this storm was a generation of the global magnetic bays observed simultaneously on the night-side auroral latitudes and on the dayside polar latitudes. The longitudinal expansion of the westward electrojet as a possible source of these global magnetic bays is discussed.

Как правило, наиболее сильные магнитные бури происходят на фазе спада цикла солнечной активности (СА). Так было и в уходящем 24-м цикле СА, что четко прослеживается при анализе годового хода солнечной (*Wp* индекс) и геомагнитной (*Ap* индекс) активности.

В 2015-2017 произошло несколько больших магнитных бурь (17-18 марта 2015 с $Dst_{min} = -223$ нГл), 22-23 июня 2015 ($Dst_{min} = -204$ нГл), 20-21 декабря 2015 ($Dst_{min} = -155$ нГл), 27-28 мая 2017 ($Dst_{min} = -125$ нГл), 07-08 сентября 2017 ($Dst_{min} = -124$ нГл). Последней в этом ряду стала большая магнитная буря 25-26 августа 2018 ($Dst_{min} = -171$ нГл). Особенностью всех этих магнитных бурь было то, что они были вызваны корональными выбросам массы (KBM), и подходу KBM к Земле предшествовала область сжатия. Типичными для фазы спада солнечной активности являются бури, связанные с быстрыми потоками солнечного ветра из корональных дыр.

Согласно наблюдениям на видимом диске Солнца значительных возмущений не отмечалось, но сравнительный анализ наземных геомагнитных наблюдений показал, что интенсивность этой магнитной бури была такова (в главной фазе значение *Dst_{min}* достигало –171 нТл), что её можно отнести к сильным бурям.

Особенностей дневных геомагнитных возмущений во время бури исследовались по данным наземных высокоширотных станций, расположенном от 47° до 76° геомагнитной широты Далее будут использованы международные коды станций и их геомагнитная широта. Рис. 1 представляет данные о параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) за анализируемый период. Можно заметить, что за несколько дней до начала магнитной бури (20-24 августа) космическая погода была очень спокойной, и скорость солнечного ветра постепенно уменьшалась от ~650 км до ~350 км. Буря началась 25 августа около 08 UT с появлением внезапного начала (*SC*), вызванного подходом к Земле резкого скачка плотности солнечного ветра (с 5 до 20 см⁻³) и, соответственно, динамического давления с ~2 нПа до ~8 нПа на фоне положительной *Bz* ММП.



Рис. 1. Вариации индекса *SymH* (1-минутный аналог часового *Dst*-индекса интенсивности кольцевого тока магнитной бури), скорости (V), плотности (Np) и динамического давления (Psw) солнечного ветра, а также *By*- и *Bz*-компонент ММП во время обсуждаемой бури [http://omniweb.gsfc.nasa.gov]

Внезапное начало бури (*SC*) сопровождалась генерацией дневных всплесков геомагнитных пульсаций *ipcl*, типичных для широт полярного каспа [1, 2]. Это наблюдалось, например, и в начальную фазу большой магнитной бури 21-23 июня 2015 [3]. Появление всплесков пульсаций *ipcl* во время *SC* отмечалось и в работе [4].

Однако нетипичные геомагнитные возмущения наблюдались в фазу восстановления бури, которая началась 26 августа в 09 UT с поворотом ММП к северу. Примерно через час после этого знак B_z компоненты ММП изменился на отрицательный (ММП повернулось к югу). Далее B_z компонента ММП еще дважды меняла знак, что показано на Рис. 2a. Все три интервала появления отрицательных значений B_z ММП сопровождались появлением суббурь, что четко видно в вариациях индексов суббуревой авроральной активности AL u AU (Рис. 26). Геомагнитные суббури в это время наблюдались не только в авроральных, но и в более высоких широтах (обс. BRW, YKC, Рис. 36).



Рис.2. Высокоширотные геомагнитные вариации в восстановительную фазу бури: a - Bz ММП, $\delta - AU$ и AL индексы суббуревой активности, в-магнитограммы ст. BRW и YKC в ночном секторе, z – магнитограмма скандинавского профиля IMAGE.

В дневном секторе Земли (скандинавский профиль IMAGE -[http://www.space.fmi.fi/IMAGE].) после 09 UT в приполярных широтах (HOR-NAL) в 10.30-13.30 UT синхронно с ночными суббурями в BRW и YKC была зарегистрирована большая магнитная бухта с амплитудой ~250 нТл (Рис. 2г). Следовательно, суббури в эти интервалы имели глобальный характер, Такие суббури ранее не обсуждались в литературе и требуют дальнейших тщательных исследований.

Появление дневных магнитных бухт в полярных широтах во время больших магнитных бурь описывалось нами ранее [3, 5, 6]. Мы условно назвали такие бухты «дневными полярными суббурями». Однако описы-

65

ваемые «дневные полярные суббури» наблюдались, в основном, при северном направлении ММП и не сопровождались ночными суббурями. Мы предполагали, что такие дневные бухты были связаны с развитием локального полярного электроджета - *PE* [7], т.е. эти бухты имели источник, отличный от источника глобальных магнитных бухт, обнаруженных в восстановительную фазу магнитной бури 25-26 августа 2018. Можно предположить, что в время развития бури западная ионосферная электроструя затекала с ночной стороны через утреннюю сторону далеко на запад в послеполуденный сектор. Остается неясным, что могло стать тригерром развития глобального по долготе западного ионосферного тока вблизи полярной границы аврорального овала.

Итак, основной особенностью магнитной бури 25-26 августа 2018 г было появление в восстановительную фазу бури отрицательных магнитных бухт, зарегистрированных синхронно в авроральном ночном секторе и в полярных широтах дневного сектора. Предполагается, что это может быть вызвано неоднократным появлением больших (до -10 нТл) отрицательных значений *Bz* ММП, что привело к развитию больших магнитосферных суббурь, наблюдаемых в глобальном масштабе. Однако, такое предположение требует дальнейших детальных исследований.

Литература

- 1. Большакова О.В., Троицкая В.А. Динамика дневного каспа по наблюдениям длиннопериодных геомагнитных пульсаций // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 17. № 6. С. 1076-1082. 1977.
- Troitskaya V.A. ULF wave investigations in the dayside cusp // Adv. Space Res. V. 5. № 4. P. 219-228. 1985.
- 3. Громова Л.И., Клейменова Н.Г., Левитин А.Е., Громов С.В, Дремухина Л.А., Зелинский Н.Р. Дневные геомагнитные возмущения в высоких широтах во время сильной магнитной бури 21-23 июня 2015: Начальная фаза бури // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 56. №3. С. 302–313. 2016..
- 4. Куражковская Н.А., Клайн Б.И. Геомагнитные импульсы (MIEs) и импульсы внезапных начал магнитных бурь (SSCs) в высокоширотной магнитосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 1. С. 33-45. 2016.
- 5. Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Дремухина Л.А., Левитин А.Е., Зелинский Н.Р., Громов С.В. Высокоширотные геомагнитные эффекты главной фазы магнитной бури 24 ноября 2001 при северном направлении ММП // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 55. № 2. С. 185-195. 2015.
- 6. Левитин А.Е., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Антонова Е.Е., Дремухина Л.А., Зелинский Н.Р., Громов С.В., Малышева Л.М. Геомагнитные возмущения и пульсации как высокоширотный отклик на большие знакопеременные вариации ММП в восстановительную фазу магнитной бури (событие 30 мая 2003 г. // Геомагнетизм и Аэрономия, Т.55. №6. С. 755-768. 2015.
- Feldstein Y.I., Popov V.A., Cumnock J.A., Prigancova A., Blomberg L.G., Kozyra J.U., Tsurutani B.T., Gromova L.I., Levitin A.E. Auroral electrojets and boundaries of plas ma domains in the magnetosphere during magnetically disturbed intervals // Ann. Geophysicae. V. 2. P. 2243–2276. 2006.

МАГНИТОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ГИГАНТСКОГО МАГНИТНОГО ИМПЕДАНСА С УМЕРЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО СИГНАЛА

Гудошников^{1,2} С.А., Гребенщиков³ Ю.Б., Одинцов¹ В.И., Любимов¹ Б.Я.

¹ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия ²НИТУ «МИСиС» г.Москва, Россия ^{3.}Финансовый университет при правительстве России, Москва gudosh@izmiran.ru

GIANT MAGNETOIMPEDANCE MAGNETOMETERS WITH A MODERATE FREQUENCY OF AN EXITING SIGNAL

Gudoshnikov^{1,2} S., Grebenshchikov³ Yu.B., Odintsov¹ V.I. Lyubimov¹ B.Ya.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia ²NUST «MISiS» Moscow, Russia ³FU Moscow, Russia

The paper presents the results of studies, conducted at IZMIRAN, aimed at creating highly sensitive giant magnetoimpedance magnetometers based on cobalt-rich amorphous ferromagnetic microwires, intended for geophysical applications. A simplified model of the magnetoimpedance sensor, which allows to calculate its transfer characteristic, is presented.

В последнее время значительное внимание уделяется исследованиям эффекта гигантского магнитного импеданса (ГМИ) в магнитомягких материалах, изменении который заключается в комплексного сопротивления ферромагнитного проводника Z(H), при воздействии на него внешнего магнитного поля Н. Повышенный интерес к ГМИ-эффекту связан, в первую очередь, с возможностью создания на его основе недорогих, миниатюрных и высокочувствительных магнитометров для различных технических приложений. Среди материалов, обладающих ГМИ-эффектом наилучшие результаты достигнуты аморфных В (A Φ M) ферромагнитных микропроводах стеклянной оболочке, В изготавливаемых по методу Тейлора – Улитовского.

Для наиболее совершенных микропроводов характерна идеальная цилиндрическая форма, небольшое количество дефектов на единицу длины, однородное распределение намагниченности, весьма малые значения поля магнитной анизотропии (~ 1 Э и менее). В АФМ на основе кобальта, с полным диаметром 30 - 40 микрометров, получены рекордно большие значения ГМИ-отношения, $\Delta Z/Z \sim 600\%$ [1]. На основе таких микропроводов разработаны лабораторные макеты ГМИ-магнитометров с

чувствительностью по магнитному полю на уровне сотых долей наноТесла в области низких частот от 0 до 1 кГц [2].

Исследования, связанные С возможностью создания высокочувствительных ГМИ-магнитометров на AΦM лля основе геофизических приложений, активно проводятся и в ИЗМИРАН. В рамках данных исследований был разработан и изготовлен лабораторный макет однокомпонентного высокочувствительного магнитометра [3], в котором, в качестве чувствительного элемента использовался отрезок АФМ длиной 5 мм с диаметром ферромагнитной жилы порядка 20 мкм состава Co-Fe-Si-В. Для регистрации сигнала недиагональной компоненты импеданса микропровода $Z_{\omega z}(f,H)$ на него была навита приемная катушка диаметром 0.5 мм содержащая $N_c = 80$ витков медного провода диаметром 40 мкм. Микропровод возбуждался синусоидальным током I_{ac} частотой f = 4 МГц, амплитудой порядка 0.5 мА. Дополнительно к микропроводу прикладывался небольшой, порядка 0.7 мА, постоянный ток смещения I_{dc}. Схема возбуждения и регистрации сигнала ГМИ сенсора приведена на Рис.1.а. Характерные зависимости амплитуды сигнала ЭДС, наводимого в приемной катушке V на частоте 4 МГц в зависимости от приложенного магнитного поля *H*₇, приведены на Рис.1.б. Для работы ГМИ сенсора в режиме магнитометра используется электронная схема, содержащая усилители, синхронный детектор и цепь обратной связи.

В ходе исследований также была построена модель АФМ со слабой геликоидальной магнитной анизотропией [4], которая позволила объяснить основные черты ГМИ эффекта, наблюдаемого экспериментально в АФМ на основе кобальта. Проведенный анализ и численные расчеты показали, что сигнал ЭДС, наводимый в приемной катушке ГМИ-сенсора во внешнем продольном магнитном поле равен $V = 2\pi r_0 N_c I_z Z_{ox}(f, H)$, т.е прямо пропорционален радиусу металлического кора микропровода r_0 , количеству витков приемной катушки N_c , амплитуде переменного возбуждающего компоненте тока I_{ac} И магнитного импеданса микропровода $Z_{ax}(f, H)$. В свою очередь компонента импеданса сложным образом зависит от основных параметров микропровода, именно, намагниченности насыщения M_s, распределения амплитуды остаточных закалочных напряжений по сечению микропровода $\Delta \sigma$, константы магнитострикции λ_s , эффективного магнитного затухания κ , амплитуды постоянного тока смещения I_{dc} , и т.д. Поэтому анализ зависимости $Z_{ox}(f,H)$ от приложенного поля Н₂ можно провести лишь с помощью численного моделирования [4], на основе микромагнитного расчета распределения намагниченности в АФМ и решения соответствующих уравнений Максвелла для высокочастотных компонент электромагнитного поля. В данной работе предложена упрощенная модель для случая возбуждения АФМ переменным током относительно невысокой частоты, без скинэффекта, когда плотность протекающего по АФМ тока, можно считать



Рис.1. (а) Схема возбуждения и регистрации сигнала ГМИ сенсора; (б) экспериментальная зависимость амплитуды ЭДС приемной катушки на частоте 4 МГц от приложенного магнитного поля H_z при токе смещения $I_{dc} = 0.7$ мА.

постоянной величиной (условие выполняется на частотах $f < 10 \text{ M}\Gamma$ ц). Кроме этого предполагается, что в каждой точке объема АФМ намагниченность достигает своего предельного значения M_s и изменяется только по направлению.

При указанных выше условиях, во внешнем продольном поле H_z , направление вектора намагниченности, в каждой точке A Φ M, соответствует минимуму энергии и определяется равенством:

$$h_1(\boldsymbol{\alpha},h) = \pm \frac{h-\boldsymbol{\alpha}}{\boldsymbol{\alpha}} \sqrt{1-\boldsymbol{\alpha}^2}, \qquad (1)$$

где: $h_1 = H_{a_1}/H_{a_2}$; $h = H_z/H_a$ - безразмерные циркулярное и продольное действующие магнитные поля, нормированные на поле анизотропии АФМ H_a , $\alpha = M_z/M_s$ - безразмерная компонента продольной намагниченности АФМ M_z , нормированная на намагниченность насыщения M_s ($\alpha = \cos \theta$, Рис. 1.а). Два знака В (1)соответствуют разным направлениям азимутальной намагниченности (знаку $\sin \theta$). Кривые равновесия $h_1(\alpha)$, равенства (1), для трех фиксированных значений h (04, 1.0, 1.6), приведены на Рис.2.а. Полный набор кривых, аналогичных представленным на Рис.2.а., позволяет определить эволюцию среднего значения намагниченности АФМ при воздействии циркулярного и продольного магнитных полей.

Если через АФМ протекает переменный ток I_{ac} , то порождаемое им азимутальное поле H_{φ} будет вызывать периодическое изменение средней продольной намагниченности и создавать в приемной катушке переменный магнитный поток $\Phi = \pi r_0 \mu_0 M_s \bar{\alpha}$. Здесь $\bar{\alpha}$ – это средняя по сечению АФМ намагниченность, которая связана с внешними полями и своим значением на поверхности АФМ выражением:

$$\bar{\alpha} = \begin{cases} \frac{2}{h_1^2} \left(-h - \frac{h^3}{6} + \frac{h}{2} \alpha^2 - \frac{\alpha^3}{3} - h \ln\left(\frac{h}{\alpha}\right) + \frac{h^2}{\alpha} \right), & h \le 1 \\ \frac{2}{h_1^2} \left(-h^2 - \frac{h}{2} + \frac{1}{3} + \frac{h}{2} \alpha^2 - \frac{\alpha^3}{3} - h \ln\left(\frac{h}{\alpha}\right) + \frac{h^2}{\alpha} \right), & h > 1 \end{cases}$$
(2)

Колебания поля h_1 вызывают колебания магнитного потока и ЭДС в приемной катушке, результат расчета которой на частоте f показан на рисунке 2.б.



Рис.2 (а) Кривые равновесия $h_1(\alpha)$ для трех фиксированных значений h (04, 1.0, 1.6); (б) расчетные зависимости ЭДС приемной катушки от продольного поля.

Предложенный подход позволяет моделировать температурное поведение АФМ, действие механических напряжений и может быть обобщен на случай геликоидальной анизотропии.

Литература.

1. V. Zhukova, A. Chizhik, A. Zhukov, A. Torcunov, V. Larin, J. Gonzalez, Optimization of giant magnetoimpedance in Co-rich amorphous microwires, IEEE trans. on magn., 38 (2002) 3090.

2. T. Uchiyama, S. Nakayama, K. Mohri, K. Bushida. Biomagnetic field detection using very high sensitivity magnetoimpedance sensors for medical applications, Phys. Status Solidi A, 206, N4, (2009) 639.

3. S. Gudoshnikov, N. Usov, A. Nozdrin, M. Ipatov, A. Zhukov, V. Zhukova, Highly sensitive magnetometer based on the off-diagonal GMI effect in Co-rich glass-coated microwire, Phys. Status Solidi, 211 (5) (2014) 980.

4. N.A. Usov, S.A. Gudoshnikov, Giant magneto-impedance effect in amorphous ferromagnetic wire with a weak helical anisotropy: theory and experiment, Journal of Applied Physics. 113 (2013) 243902.

РАЗВИТИЕ МАГНИТНЫХ БУРЬ, ИНИЦИИРОВАННЫХ РАЗНЫМИ ТИПАМИ ТЕЧЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Дремухина¹ Л.А., Ермолаев² Ю.И., Лодкина² И.Г.

¹ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия ²ИКИ, г.Москва, Россия dremukh@izmiran.ru

THE DEVELOPMENT OF MAGNETIC STORMS INITIATED BY DIFFERENT TYPES OF SOLAR WIND

Dremukhina¹ L.A., Yermolaev² Yu.I., Lodkina² I.G. *IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia*

²IKI, Moscow, Russia

The dynamics of geomagnetic indices Dst, PC, AE and ap and solar wind parameters during magnetic storms initiated by various interplanetary sources is studied. It is shown that the strongest storms are generated by compression regions Sheath ahead of coronal mass ejections (ICME). The dynamics of the PC index for Sheath-storms indicates an increase in the electric field and transpolar convection in the polar cap during almost the whole main phase in different from storms generated by other sources.

Установлено, что разнообразие в развитии магнитных бурь обусловлено различием их межпланетных источников с разными физическими характеристиками, размерами и распределением параметров плазмы солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) внутри них [1]. В работах [2,3] на базе данных ОМNI за 1976-2000 гг. с использованием двойного метода наложенных эпох (ДМНЭ) был получены усредненные распределения параметров СВ и ММП и некоторых индексов геомагнитной активности во время бурь, индуцированных разными источниками. Учитывая имеющиеся большие пропуски в данных OMNI до 1995 г. (до 50 %), которые могли повлиять на полученные результаты, представляется целесообразным провести аналогичное исследование с использованием новых, более полных и непрерывных, данных. В этой работе мы использовали среднечасовые значения параметров СВ и ММП и индексов *Dst*, *ар*, AE и PC базы OMNI2 (http://omniweb.gsfc.nasa.gov) за 1995-2017 гг. ДМНЭ был применен к данным за периоды изолированных бурь с $Dst_{min} \leq -50$ нТл с однозначно идентифицированными межпланетными источниками: областями взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра (СВ) CIR; областями компрессии Sheath перед ICME; магнитными облаками MC и «поршнями» Ejecta. Для идентификации источников магнитных бурь была использована классификация типов течений СВ [1] и каталог идентифицированных типов СВ, представленный на сайте

<u>ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/.</u> Из-за небольшой статистики не проводилось разделение на бури, инициированные событиями Sheath перед MC и Sheath перед Ejecta, а также не проводился учет наличия или отсутствия внезапного начала SSC бури. Двумя опорными моментами при применении ДМНЭ считались время начала главной фазы ($t_0=0$) и время Dst_{min} ($t=t_m$). За нормализованную длительность главной фазы бури была принята минимальная средняя длительность < ΔT > (см. Таблицу), то есть 8 ч. Преимуществом использования ДМНЭ является возможность сравнения общей (усредненной) динамики магнитосферных параметров для магнитных бурь, имеющих разные длительности.

В таблице представлены статистика распределения бурь по их источникам и средние для каждой группы характеристики: максимальное значение индекса $\langle Dst_{min} \rangle$, длительность главной фазы бури $\langle \Delta T \rangle$, скорость роста главной фазы $\langle \Delta Dst | / \Delta T \rangle$. Наибольшие значения $|Dst_{min}|$ и скорости его понижения на главной фазе $\langle |\Delta Dst| / \Delta T \rangle$ характерны для Sheath-бурь, а наименьшие для Еjecta-бурь.

Таблица.

Средние значения (со стандартными отклонениями) индекса $<|Dst_{min}|>$, длительности главной фазы бури $<\Delta T>$, скорости роста главной фазы $<|\Delta Dst|/\Delta T>$ для бурь, инициированных 4-мя разными межпланетными источниками, и для всех бурь

Тип СВ	Число	$< Dst_{\min} >,$	<∆Т>, ч	$< \Delta Dst /\Delta T>,$
	событий	нТл		нТл/ч
CIR	74	80.9 ± 37.7	9.2 ± 3.5	9.7 ± 5.4
Sheath	43	120.2 ± 82.8	8.3 ± 3.6	17.6 ± 14.5
MC	31	98.3 ± 29.7	11.1 ± 3.0	10.1 ± 8.3
Ejecta	33	76.7 ± 20.7	11.8 ± 5.4	6.9 ± 4.2
Bce	181	92.5 ± 52.2	9.8 ± 4.2	11.1 ± 9.6

На Рис. 1 представлены полученные усредненные временные профили индексов *PC*, *AE*, *ар* и *Dst* для групп бурь с разными источниками и для всех бурь, независимо от их источника. По осям абсцисс приведено время эпохи, которое начинается 3a12 ч до начала главной фазы бури и заканчивается через 24 часа после ее окончания, с нулевым моментом в начале нормализованной главной фазы. Вертикальные пунктирные линии показывают интервал главной фазы бури с момента $t_0=0$ до $t_m=7$. Из Рис.1 следует, что максимальный отклик в индексах геомагнитной активности имеет место при бурях, инициированных Sheath-событиями, а минимальные характерны для Ејесtа. При этом индекс *PC* при Sheath-бурях сохраняет высокие значения в течение всей главной фазы бури, что свидетельствует о длительном усилении трансполярного электрического поля и конвекции, в то время как для остальных трех групп бурь наблюдаются только кратковременные возрастания *PC*.


Рис. 1. Усредненные временные профили индексов *PC*, *AE*, *ap* и *Dst* для магнитных бурь, индуцированных событиями CIR, Sheath, MC и Ejecta (толстые линии) и для всех бурь (тонкие линии). Вертикальные линии показывают среднеквадратичную ошибку. Штриховые вертикальные линии показывают время начала и окончания главной фазы бури.

Значения и динамика индекса *ар* для Sheath-бурь отличается от остальных: его значения существенно выше (по сравнению с Ејесtа-бурями в два раза), а максимальные значения наблюдаются на несколько часов раньше наступления Dst_{min} , в отличие от остальных бурь, что свидетельствует о значительном вкладе авроральных токов, которые обычно усиливаются до наступления Dst_{min} .

На Рис. 2 представлена усредненная динамика скорости инжекции энергии в кольцевой ток Q для параметра распада $\tau=4$ ч (Q_1) и $\tau=8$ ч (Q_2) и интеграла за главную фазу электрического поля CB sumEy. Полученные для двух разных τ распределения Q имеют похожий двухступенчатый характер, наименее ярко выраженный для более интенсивных Sheath-бурь. Однако при $\tau=8$ ч значения Q на~ 25% ниже по модулю, чем для $\tau=4$ ч. С ростом τ становится более выраженным первый пик в распределении Q. Второй пик в распределении Q возрастает с ростом интенсивности бури и имеет максимальные значения для наиболее интенсивной усредненной Sheath-бури и минимальные для Ејесtа-бури. Наличие второго пика означает, что скорость поступления энергии в кольцевой ток возрастает перед моментом Dst_{min} . Это возрастание носит кратковременный характер для CIR-, MC- и Ејесtа-бурь и более растянуто во времени (~3 ч) для Sheathбурь, что свидетельствуют о более интенсивном и длительном поступлении энергии в кольцевой ток в конце главной фазы бурь, индуцированных Sheath-событиями в CB.



Рис. 2. То же, что на рис.1, для функции инжекции в кольцевой ток Q_1 ($\tau = 4 + 1$) и Q_2 ($\tau = 8 + 1$) и интеграла электрического поля за пери од главной фазы sumEy.

Выполненный с использованием ДМНЭ анализ усредненной динамики геомагнитных индексов, функции инжекции энергии в кольцевой ток и интеграла электрического поля sum*Ey* во время магнитных бурь, вызванных разными межпланетными источниками, показал, что (1) она отличается для разных групп бурь; (2) наиболее сильный отклик в индексах наблюдается для бурь, инициированных событиями Sheath; (3) области Sheath следует рассматривать как самостоятельные источники магнитных бурь независимо от ICME, которым они предшествуют. Анализ показал, что МНЭ может быть успешно использован для изучения магнитных бурь разных длительностей.

- 1. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976-2000 гг. // // Космические исследования. Т. 47. № 2. С. 99-113. 2009.
- 2. Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури // Космические Исследования. Т. 48. № 6. С. 499-515. 2010.
- Yermolaev Y. I., Nikolaeva N. S., Lodkina I. G., Yermolaev M. Y. Specific interplanetary conditions for CIR-induced, Sheath-induced, and ICME-induced geomagnetic storms obtained by double superposed epoch analysis // Ann. Geophys. V. 28. P. 2177-2186. 2010.

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В XXI ВЕКЕ: ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ

Ишков В.Н.

ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия ishkov@izmiran.ru

SOLAR ACTIVITY IN XXI CENTURY: THE BASIC CHARACTERISTICS AND EVOLUTION FORECAST

Ishkov V.N.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

According to reliable series of the relative sunspot number scenario of solar cyclisity, cycle 24 opens the second epoch of lowered solar activity. The main feature of this epoch (5 cycles) – a ban on the implementation of high solar cycles and certainly perform basic observational rules in the development of individual cycles. Reduction more than twice background values of the general magnetic field of the Sun by the end of the 23rd cycle led to a complete restructuring of the physical conditions both on the Sun and in the inner heliosphere. These conditions are likely to last until the last quarter of the 21st century. Then, after the transition period, there will come an epoch of increased solar activity, well known to us from the beginning of the space research era.

Достоверный ряд чисел Вольфа [1] показывает удивительное постоянство основных проявлений развития отдельных 11- и 22-летних солнечных циклов (СЦ) и структура его цикличности подразумевает периодическую смену эпох повышенной (СЦ *6*, *7*, 8–10; 18–22) и пониженной (СЦ 12–16; 24 – и 4 последующих) солнечной активности (СА) (рис. 1), каждая по пять циклов [2].



Рис. 1. Полный ряд наблюдений сглаженных (W*) относительных чисел солнечных пятен. Достоверный ряд (W1) с 1849 г. (черный) с границами структурных эпох пониженной (1) и повышенной (2) СА, с переходными СЦ ($_{T}$, $^{\perp}$) между ними. Первый период повышенной СА (2*) – СЦ 10–6. Последний справа – 25 СЦ, вероятный ход развития. Восстановленный ряд (W2) – серый, предполагаемый – крестики. Преобразованный рисунок из Википедии (http://en.wikipedia.org/wiki/Sunspot).

Принципиальные различия характеристик и основных свойств СЦ различных эпох СА определяются разным диапазоном изменений величин средних значений общего магнитного поля (МП) Солнца, что проявляется в соответственно, пятнообразовательной И, вспышечной характере деятельности и определяет общие характеристики СЦ внутри эпох СА. характерных признаков закономерностей Исследования И развития позволило сделать выводы: для всех достоверных СЦ, независимо от эпох, строго выполняются закономерности, связанные с магнитными свойствами Солнца, такими как 22-летний цикл смены полярности полюсов магнитного поля в фазе максимума 11-летнего СЦ (переполюсовка). Отсюда следует закон Хейла – магнитные полярности головного и хвостового пятен в каждом полушарии меняют знак противоположный на при последовательном переходе от одного СЦ к другому. Это же относится и к закону Джойса – изменение угла наклона биполярных структур (от ведущего пятна к хвостовому) в зависимости от их гелиошироты, причем ведущие пятна расположены ближе к экватору; к правилу Вальдмаера: чем больше скорость роста цикла, тем он выше. Внутри эпох несомненно выполняется и правило Гневышева – Оля: нечетный 11-летний цикл выше, чем предшествующий четный цикл. На данной статистике в эпохи повышенной СА не наблюдалось низких циклов, а в эпоху пониженной СА - высоких. Наиболее мощные (для данного цикла) вспышечные события, внутри эпох, обычно происходят на фазе спада СЦ, в начальной стадии фазы минимума и, более редко, на фазе роста. Между эпохами наблюдаются переходные периоды (циклы 11, 17 и 23), во время которых примерно за 15 лет (т.е. процессы перехода в новый режим захватывают и часть соседнего предыдущего последующего) CЦ. или меняется характер пятнообразовательной активности – режимов генерации магнитных полей в пятнообразовательной зоне, что и приводит к изменениям в общем МП Солнца. В переходные периоды могут нарушаться некоторые из наблюдательных правил развития циклов, что и произошло в СЦ 22 и 23 с правилом Гневышева – Оля, когда четный 22 цикл, единственный раз в истории достоверного ряда, стал выше нечетного 23.

Текущий 24-й СЦ стал циклом низкой величины, вспышечная активность которого существенно ниже всех предыдущих СЦ космической эры, и открывает вторую эпоху пониженной СА. Пока наши знания об этой эпохе ограничены наблюдательными данными о первой такой эпохе, которая длилась с 1878 по 1933 гг. (5 циклов): числами Вольфа, площадями групп солнечных пятен, внезапными импульсами (SI и SSC) и величиной возмущения геомагнитного поля (Аа-индекс). В настоящее время, согласно сценарию цикличности, можно ожидать что последующие четыре СЦ (~50 лет) будут составлять эпоху пониженной СА. Поэтому возникла необходимость полнее рассмотреть основные проявления данной

эпохи. В табл. 1 приводятся характеристики СЦ эпох пониженной СА, из которой следует, что все низкие циклы были четными.

	Таблица 1.											
Ν	T ₀	W* _m	T _M	T _e	W^*_M	T _Y ↑	$T_Y \downarrow$	T _Y	T1 _m	T2 _m	Spless	
12	1878XII	2.2	1883XII	1890II	74.6	5.0	6.3	11.3	65 ^m	59 ^m	732	
13	1890III	5.0	1894 I	1901II	87.9	4.5	8.2	12.1	59 ^m	77 ^m	937	
14	1902 I	2.6	1906 II	1913VII	64.2	4.1	7.6	11.7	77 ^m	59 ^m	1045	
15	1913VIII	1.5	1917VIII	1923VII	105.4	4.0	6.1	10.1	59 ^m	48 ^m	526	
16	1923VIII	5.6	1928 IV	1933VIII	78.1	4.7	5.6	10.3	48 ^m	54 ^m	666	
Σ		3.4			82.44	4.5	6.5	10.9	61 ^m		781	
24	2009 I	1.7	2014 IV	2020V-X	81.9	5.32	5.9	12,3	68m	59 ^m		

 T_0 – начало СЦ; W_m^* – начальное значение сглаженных чисел Вольфа; T_M – время максимума СЦ; W_M^* – максимальное значение сглаженных чисел Вольфа; T_Y^{\uparrow} – длительность ветви роста в годах; T_Y^{\downarrow} – длительность ветви спада в годах; T_Y – длительность сЦ в годах; T_{1m} , T_{2m} – длина фазы минимума перед и после данного СЦ в месяцах; Sp_{less} – количество беспятенных дней в соответствующих фазах минимумов; Σ – средние величины по эпохам. Курсивом приведены прогнозируемые значения.

СЦ эпох пониженной СА имеют следующие (в среднем) характеристики [2]:- более низкие начальные значения (3.38) и большую длительность (10.9 г.);- более продолжительные (4.5 г.) ветви роста и более короткие (6.5 г.) ветви спада;- более узкую зону пятнообразования по широте ≤ 35°;- большее количество беспятенных дней вокруг фазы минимума (763 дня);- значимо меньшее число групп пятен с площадями ≥1000 мдп (во всех циклах 1-ой эпохи – 147);- меньшее значение средней сглаженной за эпоху площади групп пятен ~1200 мдп (http://users.telenet.be/j.janssens/SC24web/SC24.html#Area);- затянутые фазы минимума между циклами (56–60 мес.) и, особенно, перед низкими циклами;- меньшее максимальное значение полярного МП ≤100 мкТл (по 24-му СЦ).

Процессы перестройки общего МП изменения магнитных полей всех структур на Солнце, уменьшив (на ~700 Гс) величину МП в тенях пятен. МП корональных дыр упало до ~3.0 Гс [3], по сравнению с предыдущими СЦ, в два раза уменьшилась величина полярного МП. Темп развития и уровень вспышечной активности в текущем СЦ существенно ниже предыдущих 5 СЦ: вспышечных событий с баллом $X \ge 1.0$ было всего 58 (4 – балла X > 5), а очень больших и экстремальных не осуществилось совсем. Угловая ширина корональных выбросов вещества заметно увеличилась для событий одинаковой скорости распространения [4].

Такие изменения магнитной ситуации в физических процессах на Солнце привело к значительным изменениям в характеристиках среды межпланетного пространства:– значительно уменьшились все средние параметров солнечного ветра по сравнению с показателями в эпоху повышенной СА: скорость солнечного ветра и отношение теплового и магнитного давлений (β) (~ 11%), температура (~ 40%), тепловое давление (~

55%), массовый поток (~ 34%), поток импульса или динамическое давление (~ 41%), поток энергии (~ 48%), величина межпланетного магнитного поля (~ 31%) и его радиальная составляющая (~ 38%), протонное динамическое давление остается вблизи самых низких значений, наблюдаемых в космическом веке: ~ 1,4 нПа, по сравнению с ~ 2,4 нПа середины 1970-х до середины 1990-х годов [5]; на расстоянии 2.5 радиуса Солнца средняя радиальная компонента межпланетного поля (Br) стала меньше на ~33% в минимуме 2007–2009 г. по сравнению с минимумом 1995–1997 в полярных областях, ~36% на средних широтах и на ~11% на экваторе. Относительно большое МП на экваторе при движении с солнечным ветром, может расширять гелиосферный токовый слой, что при дальнейшем распространении становится причиной низкой плотности солнечного ветра в период 2007-2009 г. и на протяжении всего 24 цикла СА. – напряжённость |BrIMF| измеренная у Земли составила только 67% от её величины в 1996 г. (от 2.0 до 1.3 nT); падение величины межпланетного МП привело к значительному росту (20%) [6] фоновых значений галактических космических лучей что хорошо отразилось в данных на нейтронных мониторах.

Согласно сценарию цикличности вторая эпоха «пониженной» СА перекроет две трети XXI века. Основной особенностью этой эпохи (5 циклов) – запрет на осуществление высоких СЦ и непременное выполнение основных наблюдательных правил, в том числе правила Гневышева-Оля, по которому следующий 25 СЦ должен быть средней величины, которую можно будет оценить уже через 2.5 года, после минимума, согласно правилам Вальдмайера и гладкости ветвей роста СЦ.

- 1. Ишков В.Н., Шибаев И.Г. Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования // Изв. РАН. сер. физ. Т. 70. № 10. С.1439–1442.
- Ишков В.Н., Периоды пониженной и повышенной солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты // Тр. Конф. "Солнечная и солнечно-земная физика – 2013". Санкт-Петербург. Пулково. 25–27.10.2013. Ред. Ю.А. Наговицин. Изд. ВВМ. С. 111–114. 2013
- Hofmeister S.J., Veronig A., Reiss M.A., Temmer M., Vennerstrom S., Vrsnak B., Heber B. / Characteristics of low-latitude coronal holes near the Maximum of Solar Cycle 24 // Astrophys. J. V. 835.2. P. 17. 2017. doi 10.3847/1538–4357/835/2/268.2017.
- Selvakumaran, R., Veenadhari, B., Akiyama, S., Pandya, M., Gopalswamy, N., Yashiro, S., Kumar, Mäkelä, P., Xie, H. On the reduced geoeffectiveness of solar cycle 24: a moderate storm perspective // JGR. Space physics, V. 121,. 9, 2017, P.8188-8202, doi: 10.1002/2016JA022885
- McComas, D. J., Angold, N., Elliott, H. A., Livadiotis, G., Schwadron, N. A., Skoug, R. M., Smith, C. W., Weakest Solar Wind of the Space Age and the Current "Mini" Solar Maximum, The Astroph. J. V. 779. № 2. PP. 10 (2013).
- 6. Ebert, R. W.; McComas, D. J.; Elliott, H. A.; Forsyth, R. J.; Gosling, J. T. // Journal of Geophysical Research, Volume 114, Issue A1, 2009, CiteID A01109

АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКТИВНОСТИ ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОЙ МАССЫ В МОЛОДЫХ СКОПЛЕНИЯХ ПО ДАННЫМ ТЕЛЕСКОПА «КЕПЛЕР»

Калиничева¹ Е.С., Саванов¹ И.С., Дмитриенко² Е.С.

¹ИНАСАН, г.Москва, Россия ²ГАИШ МГУ, г.Москва, Россия <u>kalinicheva@inasan.ru</u>

ANALYSIS OF SURFACE ACTIVITY OF «KEPLER» SUNS IN YOUNG CLUSTERS

Kalinicheva¹ E.S., Savanov¹ I.S., Dmitrienko² E.S.

¹INASAN, Moscow, Russia ²SAI MSU, Moscow, Russia

We present estimations of spottedness parameter S (the fraction of the visible surface of the star occupied by spots) of stars in two clusters of different age (Beehive cluster, 650 Myr and Praesepe cluster, 125 Myr). We reveal surface activity evolution and differential rotation of stars with different masses. Estimations of spottedness and rotation periods for dozens of young solar type stars were done.

Солнечные пятна являются областями выхода в фотосферу сильных (до нескольких тысяч гаусс) магнитных полей. Потемнение фотосферы в пятнах обусловлено подавлением магнитным полем конвективных движений вещества и снижением потока переноса тепловой энергии в этих областях.

Пятна на поверхности Солнца наблюдались еще до нашей эры. Более 400 лет ведется регулярный подсчет пятен, были открыты циклы активности продолжительностью 11 лет (цикл Швабе-Вольфа), 22 года (цикл Хойла), а также вековой и тысячелетний. Наблюдаются такие проявления солнечной активности, как дифференциальное вращение, наличие ярких факелов, вспышек, атипичное снижение количества пятен (минимум Маундера).

Темные пятна на поверхности других звезд помимо Солнца были открыты в середине прошлого века. Наблюдение их эволюции также показывает цикличность активности и дифференциальное вращение. Подобные явления говорят в пользу присутствия сильного магнитного поля у этих звезд. Перечисленные характеристики важны для понимания механизма звездного и солнечного динамо, а также для разработки новых теоретических моделей.

Продолжение основной миссии космического телескопа Кеплер, – К2, предоставило высокоточную фотометрию звезд скоплений различного возраста. В работах [1-3] рассмотрена пятенная активность звезд скопле-

ний Плеяды, Гиады и Ясли. Выполненные оценки площади пятен позволяют судить об уровне активности звезд разных возрастов, о зависимости запятненности от периода вращения и массы звезд. В работе [1] была впервые получена зависимость пятенно-образовательной активности (параметр S) от массы для большого числа (более восьми сотен) звезд одинакового возраста (скопление Плеяды).

Важным для понимания эволюции Солнца является изучение звезд солнечных масс разных возрастов. Нами рассмотрена выборка звезд из молодых скоплений, отличающихся от Солнца по массе не более, чем на 0.05*M*_{sun}. Сравнение характеристик таких звезд дает возможность заглянуть в прошлое нашей звезды, и проливает свет на эволюцию Солнца в активности и вращении со временем. Отобранное число звезд (30 из скопления Плеяды и 45 из скопления Ясли) статистически значимо. Можно надеяться, что данное обстоятельство частично устраняет неточности, связанные с незнанием угла наклонения, текущей фазы цикла активности и, более всего, отсутствием информации о блеске звезды при отсутствии пятен на поверхности.

Для звезд, отличающихся от Солнца по массе не более, чем на 10%, рассмотрена возможность наличия их дифференциального вращения. Для отобранного числа звезд (20 из скопления Плеяды и 17 из скопления Ясли) посчитаны параметры, характеризующие дифференциальное вращение, - $\Delta \Omega$ и α . Установлено изменение этих параметров с возрастом и периодом вращения для звезд солнечного типа.

На рис. 1 показан пример кривой блеска звезды с несколькими пятнами на поверхности и дифференциальным вращением. На рис. 2 изображена периодограмма, которая показывает наличие двух устойчивых периодов вращения. На рис. 3 приведена фазовая кривая, демонстрирующая наличие диаметрально противоположных активных долгот.



Рис. 1. Кривая блеска звезды ЕРІС 211059325.



Рис. 3. Фазовая кривая блеска звезды ЕРІС 211059325.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-52-45048.

- 1. Savanov I. S., Dmitrienko E. S. Spots and activity of Pleiades stars from observations with the Kepler Space Telescope (K2) // Astronomy Reports. 2017. Vol. 61. P. 996–1002.
- Savanov I. S., Dmitrienko E. S. Spots and the Activity of Stars in the Hyades Cluster from Observations with the Kepler Space Telescope (K2) // Astronomy Reports. — 2018. — Vol. 61. — P. 238–242.
- Savanov I. S., Kalinicheva E. S., Dmitrienko E. S. The Spots and Activity of Stars in the Beehive Cluster Observed by the Kepler Space Telescope (K2) // Astronomy Reports. — 2018. — Vol. 62. — P. 352–358.
- 4. Douglas S. T., Agueros M. A., Covey K. R., Kraus A. Poking the Beehive from Space: K2 Rotation Periods for Praesepe // Astrophys. J. 2017. Vol. 842. 1704.04507.

СТРУКТУРА ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АНОМАЛИИ В ЛЕТНИХ УСЛОВИЯХ ПО ДАННЫМ «ИНТЕРКОСМОС-19»

Карпачев А.Т. ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия <u>karp@izmiran.ru</u>

STRUCTURE OF THE EQUATORIAL ANOMALY UNDER SUMMER CONDITIONS ACCORDING TO INTERKOSMOS-19

Karpachev A.T.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

According to topside sounding onboard the Intercosmos-19 for high solar activity under summer conditions the changes in the EA structure depending on time and longitude, including variations in the development intensity (EAI) and position of the EA crests are studied. A pronounced anomaly exists from 08 to 24 LT and is absent in the period of 05-07 LT. The northern crest is located farther from the equator than the southern one. The foF2 value above the equator and EAI vary with the longitude in accordance with variations in the velocity of the vertical plasma drift W. EAI provides the maximum value of 1.5-2.0 h after the evening W burst.

Экваториальная аномалия (ЭА) исследовалась неоднократно, результаты описаны в обзорах [1-5]. В данной работе исследуется структура ЭА в *foF2* по данным внешнего зондирования на спутнике ИК-19, усредненным для северного лета, т.е. для мая-августа. Всего за этот период было получено 87 000 пар значений *foF2* для спокойных условий $Kp \leq 3$.

Развитие ЭА. На рис.1 представлено распределение foF2 в период развития ЭА, с 08 до 14LT, а на рис.2 приведены широтные профили foF2 в наиболее характерных долготных секторах 90E и 300E. Из обоих рисунков видно, что сначала, с 08LT, появляется зимний, т.е. южный гребень. Северный гребень начинает формироваться только с 10LT на фоне низкоширотного максимума foF2 – рис.2. Летом ЭА с двумя хорошо развитыми гребнями формируется только к полудню. По мере развития ЭА оба гребня постепенно удаляются от экватора, максимальная широта в 14LT находится в диапазоне 23-33° в северном полушарии и на 1-2° ниже в южном.

Долготные вариации ЭА. На рис.3 приведены долготные вариации foF2 над экватором, усредненные для 12-14LT, и степени развития ЭА как отношение foF2 в гребнях к foF2 в экваториальной впадине, т.е. EAI= $foF2_{\Gamma}/foF2_{\Im}$. Вариации скорости вертикального дрейфа плазмы W над экватором приведены для 10-12LT, т.е. в период развития ЭА [6]. Из рис.3 видно, что, вариации foF2 и степени развития ЭА следуют за вариациями

W. Все величины показывают наличие 4-х гармоник по долготе с близкими максимумами и минимумами. Этот факт нашел отражение в интенсивно исследуемой в последнее время концепции "4 wave".



Рис. 1. Распределение foF2 в период развития ЭА для 08, 10, 12 и 14 LT.



Рис. 2. Широтные вариации foF2 для 08, 10, 12 и 14 LT в наиболее характерных долготных секторах 90° и 300°.

Распад ЭА. На рисунке 4 приведены распределения foF2 для 00, 02 и 04 LT. После вечернего всплеска вертикального дрейфа и, связанной с ним интенсификации ЭА, она начинает распадаться, сначала медленно, так что даже в полночь аномалия еще довольно хорошо развита. Это резко контрастирует с поведением ЭА при низкой активности, когда она

практически исчезает уже к 18–19LT. После полуночи южный гребень распадается гораздо быстрее северного, т.е. наблюдается асимметрия ЭА обратная той, которая наблюдалась при развитии ЭА. В 04LT южный гребень очень небольшой по величине, гораздо меньше северного.



Рис. 3. Долготные вариации *foF*2 для 12-14 LT и скорости вертикального дрейфа *W* для 10-12 LT [6] (вверху), степени развития аномалии EAI и *W* (в середине) и положения гребней для разных часов местного времени (внизу).



Рис. 4. Распределение *foF2* в период распада ЭА для 00, 02 и 04 LT.

Суточные вариации ЭА. На рис.5 (вверху) приведены суточные вариации степени развития ЭА для долгот 90–120° и 270–300°, а также вариации вертикального дрейфа плазмы [6]. ЭА начинает формироваться с 08LT с появлением южного гребня. Величина ЕАІ показывает локальный максимум в 14 LT, более заметный на долготах восточного полушария (90-120°E). Вариации положения гребней ЭА (внизу) были получены усреднением данных для всех долгот. Видно, что северный гребень находится дальше от экватора, чем южный. ЕАІ достигает максимума 1.58 в 20 LT, т.е. с задержкой 1.5–2.0 ч после вечернего всплеска W. Затем ЕАІ падает, после чего достигает абсолютного максимума 1.65 в 22LT. Этот максимум связан с действием дрейфа вниз. Гребни ЭА наиболее далеко уходят от экватора в 20-22LT, общая ширина ЭА достигает 56°I.



Рис. 5. Сверху вниз: суточные вариации степени развития ЭА (EAI) в долготных секторах 90-120°E и 270-300°E, скорости вертикального дрейфа W [6], величины *foF*2 в гребнях и над экватором, положения гребней.

Итак, впервые построена полная картина вариаций *foF2* в области ЭА для летних условий. Она описывает все проявления ЭА. Работа выполнена в рамках Программы Президиума РАН №28.

- 1. Rajaram G. Structure of the equatorial F-region, topside and bottomside a review // J. Atmos. Terr. Phys. V.39. No 9. P.1125–1144. 1977.
- 2. Moffet, R. The equatorial anomaly in the electron distribution of the terrestrial R-region // Fundamentals of Cosmic Physics. V.4. P.313–391. 1979.
- 3. Walker G.O. Longitudinal structure of the F-region equatorial anomaly a review // J. Atmos. Terr. Phys. V.43. No 8. P.763–774. 1981.
- 4. Sastri J.H. Equatorial anomaly in F-region a review // Indian J. Radio Space Phys. V.19. No 4. P.225–240. 1990.
- 5. Rishbeth H. The equatorial F-layer: progress and puzzles // Ann. Geophys. V.18. P.730–739. 2000.
- Fejer B.G., Jensen J.W., Su S.-Y. Quiet time equatorial F region vertical plasma drift model derived from ROCSAT-1 // J. Geophys. Res. V.113.. doi:10.1029/2007JA012801. 2008.

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С УЧЕТОМ ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЖЕСТКОСТЕЙ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ

Кобелев П.Г., Янке В.Г. ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия <u>kobelev@izmiran.ru</u>

LONG-PERIOD VARIATIONS OF COSMIC RAYS WITH TAKING INTO ACCOUNT OF TEMPORARY CHANGES OF GEOMAGNETIC CUT-OFF RIGIDITIES

Kobelev P.G., Yanke V.G.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The values for two-parametric variations spectra are determined for the whole period of observations in 1957-2017 years. A long-period changes of spectra with taking account of cut-off rigidity changes were received.

При исследовании физических процессов в межпланетной среде и при определении структуры гелиосферы в целом уже шесть десятилетий используется такой мощный наземный инструмент как Мировая сеть нейтронных мониторов, мюонных телескопов и детекторов стратосферного зондирования.

Непосредственно измерению подлежат относительные вариации скорости счета детекторов, которые в приближении нулевой гармоники связаны с искомым спектром первичных вариаций космических лучей системой интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода:

$$\nu^{i} = \int_{R^{i}}^{\infty} W^{i} \left(R_{c}^{i}, h_{0}^{i}, R \right) \frac{\partial J}{J}(R), \qquad (1)$$

где в качестве ядра интегрального уравнения выступает функция связи W', а в качестве неизвестной функции – спектр вариаций dJ/J.

В нашем случае важным обстоятельством является то, что искомое решение можно искать в виде аналитической функции спектра вариаций dJ/J с некоторым числом параметров. Важным преимуществом этого подхода является то, что практически никогда нельзя получить абсурдное решение, если аналитическая модель выбрана в соответствии с исследуемым процессом.

Спектр вариаций космических лучей может быть представлен в двухпараметрическом виде

$$\partial J/J(R) = a_1 R^{-\gamma},\tag{2}$$

где a_1 представляет собой вариации потока частиц с жесткостью 1 GV, а $\gamma > 0$ – параметр степенного спектра. Предпочтительнее использовать приведенный к 10 GV спектр вариаций вида

$$\partial J/J(R) = a_{10} \left(\frac{R}{10}\right)^{-\gamma},$$
(3)

где $a_{10}=a_1 \ 10^{-\gamma}$ представляет собой амплитуду частиц с жесткостью 10 GV, что близко к эффективной жесткости для нейтронных мониторов.

Систему уравнений (1) можно линеаризовать разложением в ряд Тейлора в окрестности нулевого приближения, получив уравнения вида

$$\nu^{i} \approx \nu^{i}|_{0} + A_{1}^{i}|_{0}(a - a^{0}) + A_{2}^{i}|_{0}(\gamma - \gamma^{0}),$$
(4)

и решить методом последовательных приближений. Коэффициенты разложения A₁ и A₂ для приведенного к 10 GV спектра определяются как

$$A_{1}^{i} = C_{00}^{i}(\gamma, b), A_{2}^{i} = a_{10} \int_{R_{c}}^{\infty} ln\left(\frac{R}{10}\right) \Psi^{i}(\gamma, R) dR,$$
где $\Psi^{i}(\gamma, R) = W^{i}\left(R_{c}^{i}, h_{0}, R\right) \left(\frac{R}{10}\right)^{-\gamma}$ (5)

Для решения системы уравнений (4) требуется выполнить несколько итерационных шагов из точки нулевого приближения.



Для определения приемных коэффициентов нулевой гармоники нейтронной, мюонной и заряженной компонент на стратосферных высотах привлекались функции связи из работ [1-3]. Для учета долговременных изменений жесткостей геомагнитного обрезания для исследуемого периода привлекались результаты работы [4]. Для каждого месяца формируется графический результат, пример которого приведен на рис. 1.

На рис. 1 на второй панели сверху приведена невязка между наблюдаемыми вариациями всех детекторов и моделью в рассматриваемый момент времени, который отмечен в виде вертикальной линии на верхней панели на кривой чисел Вольфа. На панели невязок приведены также найденные параметры спектра вариаций *a*₁₀ и *у* для данного момента времени.



Рис.2. Долговременные изменения параметров спектра вариаций и характеристики системы уравнений для всего рассматриваемого периода.

На левой нижней панели показана зависимость нормированных на a_{10} вариаций космических лучей от приемных коэффициентов C_0 для всех детекторов. Первая точка в области малых C_0 относится к вертикальной компоненте мюонного телескопа Nagoya, последняя точка в области больших C_0 – к детектору стратосферного зондирования, а остальные точки – к нейтронным мониторам. Конечно, хорошая корреляция (>0.9) наблюдается только для периода максимума солнечной активности, когда наблюдаются большие вариации относительно базового периода. Искомый жесткостной спектр dJ/J вариаций космических лучей в двойном логарифмическом масштабе приведен на правой нижней панели рисунка.

На рис. 2 для всего рассматриваемого периода показаны долговременные изменения параметров спектра вариаций и некоторых характеристик системы линейных уравнений. На первой и второй панели приведены временные зависимости амплитуды спектра вариаций и показателя степенного спектра γ с ошибками их определения ($\pm 1\sigma$). Сравнение показывает хорошее их согласие с результатами работы [5]. На

89

третьей панели приведена временная зависимость среднеквадратичной ошибки распределения невязок уравнений системы.

На четвертой панели приведены числа обусловленности системы уравнений, которые указывают на хорошую сходимость решения систем уравнений для всех периодов, кроме базового.

На последней панели показаны числа итераций для каждого момента времени. Как показывает детальный анализ, сходимость по линейному параметру а₁₀- одна-три итерации, сходимость по нелинейному параметру существенно более медленная. Для ускорения процесса сходимости в качестве начального приближения использовалось предыдущее решение, что позволило уменьшить время решения вдвое.

В заключение отметим, что предложенная методика решения системы уравнений методом линеаризации показала высокую эффективность с возможностью количественной оценки значений параметров, их корреляций и ошибок. Хотя чисто степенной спектр вариаций является достаточно простым приближением, полученные результаты находятся в хорошем согласии с выводами других работ [5].

Все полученные численные и графические результаты можно найти в архиве [6].

Дальнейшую работу следует проводить в направлении увеличении числа параметров спектра для более точного его описания в нижней области жесткостей, например, третьего параметра R_0 .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-02-00508а. Работа базируется на экспериментальных данных УНУ "Российская национальная сеть станций космических лучей" (<u>http://cr0.izmiran.ru/common</u>) и Мировой сети станций космических лучей (<u>http://www.nmdb.eu</u>)

- 1. Алексаньян Т.М., Белов А.В., Янке В.Г. и др., Экспериментальные исследования геомагнитных эффектов в космических лучах и спектр эффекта возрастания перед магнитными бурями // Изв. РАН. Сер. физ., vol. 46, №9, p.1689-1691, 1982.
- 2. Fujimoto K., Murakami k., Kondo I., Nagashima K., Approximate formula for response function of cosmic ray hard component at various depths of the atmospheres and underground // Proc 15-th ICRC, Plovdiv, Bulgaria., V.4, 321-325, 1977.
- 3. SvirzhevskyN.S., Thesis, FIAN, 2002
- Gvozdevsky B.B., Belov A.V., Gushchina R.T., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Planetary long term changes of the cosmic ray geomagnetic cut off rigidities // J. Phys.: Conf. Ser. 1181 012008, 2019.doi: 10.1088/1742-6596/1181/1/012008
- Yanke V.G., Belov A.V., Gushchina R.T., Zirakashvili V.N. The rigidity spectrum of the long-term cosmic ray variations during solar activity cycles 19–24 // J. Phys.: Conf. Ser. 1181 012007, <u>2019</u>. doi:10.1088/1742-6596/1181/1/012007
- 6. LongTimeVariation <u>ftp://crsb.izmiran.ru/LTV/2019</u>

МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ ЛИТОСФЕРЫ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Латышева О.В. СПбФ ИЗМИРАН, г.Санкт-Петербург, Россия office@izmiran.spb.ru

MAGNETIC ANOMALIES OF THE LITHOSPHERE IN NEAR-EARTH SPACE

Kopytenko Yu.A., Petrova A.A., Latysheva O.V.

SPbF IZMIRAN, St. Petersburg, Russia

This article presents the results of the study of the lithosphere using magnetic field anomalies, gravitational and seismic data. According to a study in the Early Precambrian basement, a magnetically active "magnetite zone" horizon was found at a depth of 10-13 km near the lower boundary of the upper crust and a model of heterogeneity of the lower crust was obtained.

С целью изучения глубинного строения литосферы проведен совместный анализ глубинных разрезов, полученных по аномалиям магнитного поля и силы тяжести и сейсмологическим данным.

При исследовании аномалий магнитного поля Земли (МПЗ) в околоземном пространстве использована трехмерная компонентная модель, полученная на основе измеренных и расчетных данных полных значений компонент вектора МПЗ [1-2]. Модель позволяет построить магнитные карты в диапазоне высот от 0 до 400 км. Мировые карты магнитного склонения, наклонения, вертикальной и горизонтальной компонент используются для целей морской и воздушной магнитной навигации, изучения глубинного строения земной коры, прогнозирования месторождений углеводородов, выявления геотермальных областей и поиска рудных полезных ископаемых. В качестве уровня относимости для аномалий элементов МПЗ В компонентной модели использован глобальный уровень в виде главного магнитного поля модели IGRF [3].

В процессе исследования магнитных, плотностных и скоростных свойств литосферы определено местоположение наиболее плотных и магнитных неоднородностей. К границам этих образований приурочены очаги землетрясений, которые фиксируют направление перемещения границ неоднородностей, осей сжатия и растяжения [4].

На базе комплексных исследований древних континентов вблизи подошвы верхней коры выделена магнетитовая зона [5]. Она возникла в результате процессов регионального метаморфизма раннего докембрия при гранитизации метабазитов с замещением фемических минералов

салическими с выделением магнетита. Магма докембрия сильно обогащена минералами железа, поэтому магнетитовая зона является источником железа при формировании месторождений железа в железистых кварцитах.

Изучение горных пород геологических разрезов показало, что плотности и скорости горных пород связаны между собой прямолинейной зависимостью от состава пород и степени метаморфизма [5]. Эти свойства пород определяют значения глубинных геофизических параметров. Анализ вещественного состава пород глубинных разрезов позволил установить геологическую и вещественную природу магнетитовых зон. Физические низах верхней коры благоприятны ДЛЯ образования условия В термоостаточной и вязкой намагниченности. Магнетитовые зоны древних блоков земной коры создают высокие значения магнитных аномалий Н- и Z-компонент в околоземном пространстве (рис. 1).



Рис. 1. Магнитные аномалии Н-компоненты МПЗ на высоте 60 км [1, 2].

В настоящей работе особенности распределения магнетизма пород в низах коры исследованы по магнитным аномалиям, получаемым на разных высотных уровнях околоземного пространства:

-по результатам измерений низколетящих спутников миссии СНАМР, наблюдения которых позволили построить карты магнитных аномалий МПЗ для высот 100 и 400 км [6];

-по компонентной модели, в которой присутствуют региональные аномалии [1-2].

Глобальная тепловая модель для континентальной литосферы (TC1), построенная по измерениям теплового потока в скважинах и на основе электромагнитных исследований, указывает на существование архейских кратонов с характерными толщинами литосферы до 200-250 км [7]. Модель TC1 показывает значительную тепловую неоднородность в пределах верхней мантии континентов. Карта глубин изотермы Кюри для магнетита (~550°С) дает представление о возможной толщине магнитоактивного слоя древних кратонов.

глубинных Намагниченность пород нижних горизонтов земной определяется, раннедокембрийской коры В основном. концентрацией магнетита и индуктивной намагниченностью вплоть до изотермы Кюри магнетита. Условия в низах континентальной коры могут благоприятны образования современной быть для вязкой намагниченности, что отражается в аномалиях вертикальной (Z) и горизонтальной (Н) компонент. В областях развития раннедокембрийской коры наблюдаются региональные магнитные аномалии, прослеживающиеся до высот ≥100 км (рис. 2).



Рис. 2. Магнитные аномалии Z-компоненты МПЗ на высоте 100 км [1, 2].

По данным аэромагнитной и спутниковой съемки сделана оценка средней намагниченности нижней коры для центральной Канады - 5 А/м, северо-западной Германии - 2 А/м, Украинского щита - 2-4 А/м, США - 3,5 1 А/м [5]. Полученные оценки не противоречат данным непосредственных измерений намагниченности глубинных пород коры [8].

Результаты интерпретации магнитных аномалий позволяют выявить особенности строения разных магнитоактивных слоев земной коры [1-2, 5, 9]. Глубинные плотностные разрезы и разрезы по сейсмологическим данным дают представление о распределении плотностных неоднородностей, положении их поверхностей и направлений смещения контактных границ, что позволяет уточнить внутреннее строение литосферы.

Компонентная модель МПЗ околоземного пространства содержит информацию о свойствах магнитных неоднородностей глубинного строения литосферы [1-2]. Она позволяет подойти к решению вопроса о характере намагниченности источников региональных и крупных региональных аномалий, несущих информацию о физическом состоянии древнейших блоков континентальной и молодой океанической коры. Расчеты показали, что магнитные аномалии модуля, Z- и H-компонент МПЗ в околоземном пространстве определяют местоположение, простирание и характер намагничивания магнитоактивных слоев низов древних блоков земной коры [1-2, 9].

Комплексное исследование магнитных, плотностных И сейсмологических характеристик раннедокембрийской земной коры, слагающей фундамент континентов, позволяет подойти к оценке ее уровне глубинного строения на вещественном И показать, что региональные геомагнитные отражают аномалии влияние магнетитсодержащих слоев, существующих на глубинах более 10-15 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственным заданием 0037 2014 0005.

- 1. Петрова А.А. Цифровые карты компонент вектора индукции магнитного поля // Сб. трудов ИЗМИРАН. С. 412-423. 2015.
- 2. Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Компоненты морских линейных магнитных аномалий Мирового океана. Ч. 1. Северная Атлантика // Журнал «Фундаментальная и прикладная гидрофизика». Т. 11. №4. С. 34-41. 2018. doi: 10.7868/S2073667318040056
- 3. Thébault E., Finlay C., Beggan C., Alken P. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. Springer. 2015. DOI:10.1186/s40623-015-0228-9
- 4. International Seismological Centre. On-line Bulletin, http://www.isc.ac.uk. Internatl. Seismol. Cent. Thatcham. United Kingdom. 2016. <u>http://doi.org/10.31905/D808B830</u>
- 5. Наливкина Э.Б., Петрова А.А. Магнетитовая зона земной коры континентов. СПб.: Изд. ВСЕГЕИ. 40 с. 2018.
- 6. Thebault E. et al. The magnetic field of the Earth's lithosphere. // Space Science Reviews. 155. P. 95-127. 2010.
- Artemieva I.M. Global 1 x 1 thermal model TC1 for the continental lithosphere: Implications for lithosphere secular evolution // Tectonophysics. V. 416. P. 245-277. 2006.
- 8. Печерский Д. М., Геншафт Ю. С. Петромагнетизм континентальной литосферы и природа региональных магнитных аномалий: обзор // Российский журнал наук о Земле. V. 3. No. 2. C. 201. 2001.
- Petrova A.A., Kopytenko Yu.A. and Petrishchev M.S. Deep Fluid Systems of Fennoscandia Greenstone Belts // Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. C. 239-247. 2019. doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_28

ПАРАМЕТРЫ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НАД ТРОПИЧЕСКИМИ ЦИКЛОНАМИ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ СТРАТОСФЕРНОГО ВЕТРА ПОСЛЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ПИНАТУБО

Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия <u>kostin@izmiran.ru</u>

PARAMETERS OF THE UPPER IONOSPHERE OVER TROPICAL CYCLONES DURING CHANGES IN THE STRATOSPHERE WIND AFTER THE ERUPTION OF MOUNT PINATUBO

Kostin V.M., Belyaev G.G., Ovcharenko O.Ya., Trushkina E.P. IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The influence of the stratospheric wind change on the development of tropical cyclones after the eruption of the Mount Pinatubo is considered. Experimental data of the upper ionosphere parameters at the autumn equinox 1992 according to the Cosmos-1809 satellite are presented. It is shown that on September 24, there was a simultaneous development of ten tropical cyclones, which were influenced by the acoustic impact of an underground nuclear explosion and four earthquakes.

Природа квазидвухлетнего цикла (КДЦ) стратосферного ветра - одна из нерешенных проблем современной физики [1]. В настоящее время установлена сезонная закономерность и вытекающая из нее дискретность периода КДЦ [2]. В работе [2] проанализировано 24 полных цикла с 1953 по 2008. Развитие КДЦ №17 происходило с января 1991 по июнь 1993 [2]. В этот период произошло возмущение стратосферы вследствие извержения вулкана Пинатубо (в июне 1991).

Со спутника Космос-1809 с июля по октябрь 1991 наблюдалось изменение параметров верхней ионосферы при развитии аномальной последовательности взаимодействующих тропических циклонов (ТЦ) [3,4]. В стратосфере в июле началось опускание восточного ветра (Е-фаза) с высоты ~40 гПа (~22 км). В нижней стратосфере наблюдался западный ветер (W-фаза).

При дальнейшем развитии КДЦ в период осеннего равноденствия 1992, когда в нижней стратосфере была Е-фаза, а W-фаза опустилась до ~20 гПа, сформировалось десять ТЦ. Резкое изменение параметров КДЦ вблизи равноденствия обычно приводит к возбуждению планетарных волн Россби. Теоретически показано, что нелинейная эволюция планетарных замагниченных волн Россби в присутствии неоднородного зонального ветра может заканчиваться самоорганизацией вихревой цепочки [5,6].

В докладе обсуждаются ионосферные возмущения в сентябре 1992.

Динамика интенсивности (скорость поверхностного ветра) в узлах, как принято в метеорологии (1 knot = 1,852 км/ч), ураганов Тихого и Атлантического океанов приведена на Рис. 1.



Рис. 1. Динамика интенсивности ураганов Тихого и Атлантического океанов с 11 по 30 сентября 1992.

В это время были произведены подземные ядерные взрывы (ПЯВ) Divider, Hunters Trophy и произошло несколько землетрясений [7], параметры некоторых за 24.09.92 приведены в таблице 1.

Таблица 1.

N⁰	День	UT	Эпицентр	Μ	Глубина	Место			
	09.92	h:m	N / W		КМ				
1	23	15:04	37.0 / 116.0	4.2	0.0	Nevada Test Site			
2	24	00:52	- 59.5 / 26	5.5	21.2	South Sandwich Islands region			
3	24	06:10	14.3 / 91.4	4.6	33.0	Guatemala			
4	24	07:48	13.7 / 91.1	4.6	33.0	offshore Guatemala			
5	24	13:22	- 31 / 67.8	4.9	9.5	San Juan, Argentina			

Землетрясения 24 сентября 1992.

Акустическое воздействие ПЯВ на ураганы в Атлантическом и Тихом океанах резко изменило траектории их движения [7]. На Рис. 2 показаны эти изменения, а также приведена плотность плазмы на 10 нисходящих витках спутника Космос-1809. Начало первого интервала отвечает 0:45:32 UT, длительность 26.2 мин. Остальные интервалы повторяются через период спутника Т=104.2 мин. Магнитная активность слабая Кр=1. Из *F*-области 24.09.92 _ над ураганом Seymour, развивавшимся вблизи плоскости Divider, магнитного меридиана отмечается значительное поступление плазмы вдоль магнитного поля в верхнюю ионосферу.



Рис. 2. Плотность электронов на 10 пролетах спутника после проведения ПЯВ Divider. Точками на траекториях 11 ТЦ показаны центры циклонов в момент пролета спутника. Звездочками с цифрой – землетрясения 24 сентября с номером из табл. 1.

В данных ОНЧ-комплекса спутника Космос-1809 отмечаются более слабые эффекты воздействия 4-х землетрясений и ПЯВ на области взаимодействия длинноволновых радиопередатчиков с ионосферой. Такие эффекты ранее изучались с помощью спутника Космос-1809 [8].



Рис. 3. Кривые аппроксимаций второго порядка координат центров ТЦ. Волна Rossby – Aburjania.

В цикле работ Абурджаниа было показано, что воздействие акустических волн на ионосферу при неоднородном зональном ветре в стратосфере может приводить к генерации замагниченной волны Россби. На Рис. 3 приведены огибающие центров ТЦ: 18.09 – после проведения ПЯВ Hunters Trophy [7]; 22.09 – после афтершока землетрясения Landers,

M=4.1; 24.09 – после ПЯВ Divider; 25.09 – в течение полутора дней вблизи разлома Сан – Андреас не было землетрясений с М > 3.2.

Область волновых структур на Рис.3 смещена на запад, что отвечает проекции магнитного поля от разлома Сан - Андреас с учетом склонения на *E* - область ионосферы. Другая существенная особенность – они перемещаются в любом направлении, что характерно для волновых структур [5], но не для чисто атмосферных вихрей типа Россби. Поэтому, данную структуру будем называть волной Rossby – Aburjania.

В заключение отметим, что дальнейшее сжатие Е-фазы ветра нижней стратосферы создало условия для развития сильнейшего с 1979 по 2015 тайфуна Gay, который синхронно развивался с 16 по 21 ноября 1992 с тайфуном Hunt и Forrest [4]. Причем, Forrest был западнее Gay на 7500 км. В работах [3,4] предложен механизм развития взаимодействующих ТЦ на больших расстояниях.

- 1. Гинзбург И.Ф. Нерешенные проблемы фундаментальной физики // Успехи физ. наук. Т. 179. № 5. С. 525-529. 2009.
- 2. Габис И.П., Трошичев О.А. Квазидвухлетние осцилляции в экваториальной стратосфере: сезонные закономерности изменения ветра, дискретность периода цикла и прогноз его длительности // Геомагн. и аэрономия. Т. 51. № 4. С. 508. 2011.
- 3. Boychev B., Belyaev G., Kostin V., Ovcharenko O., Trushkina E. Ionosphere parameters changing by interactive tropical cyclones according to Cosmos-1809 and Intercosmos Bulgaria-1300 satellite date // Sun and Geosphere. V. 13. No. 1. P. 31-39. 2018.
- 4. Kostin V.M., Belyaev G.G., Ovcharenko O. Ya., Trushkina E.P. Influence of cyclones on the plasma parameters of the upper ionosphere in the two-year period after the mounts Pinatubo and Hudson eruptions // Astronomy-2018. Solar-Terrestrial physics the current state and prospects. M.: Trovant. V. 2. P. 110-113. 2018.
- 5. Абурджаниа Г.Д., Харшиладзе О.А., Чаргазиа Х.З. Самоорганизация ВГВ структур в неоднородной ионосфере 2. Нелинейные вихревые структуры // Геомагн. и аэрономия. Т. 53. № 6. С. 797-808. 2013.
- 6. Абурджаниа Г.Д. Самоорганизация нелинейных вихревых структур и вихревой турбулентности в диспергирующих средах. М.: КомКнига. URSS. 325 с. 2006.
- Belyaev G., Hotinov B., Kostin V., Trushkina E, Ovcharenko O. On the possibility of powerful underground explosions impact to release of the earth's crust stresses and on the development of hurricanes. // Fourteenth International Scientific Conference Space, Ecology, Safety- SES2018. Sofia. Bulgaria. Proceedings. P. 403-409. 2018.
- 8. Беляев Г.Г., Костин В.М. Проявление мощных естественных и антропогенных процессов в ионосфере и на Земле // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75. С. 170-184. 2015.

DOI: 10.31361/pushkov2019.023

ДИНАМИКА РЕГУЛЯРНЫХ И ЭПИЗОДИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА: МАТЕРИАЛЫ ПРОЕКТА «ШУМАН»

Кукса¹ Ю.И., Теодосиев² Д., Шибаев³ И.Г.

¹ ЦГЭМИ ИФЗ РАН, г.Москва, г.Троицк, Россия ² ИКИТ БАН, г.София, Болгария ³ ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия ishib@izmiran.ru

DYNAMICS OF REGULAR AND INCIDENTAL EVENTS ACCORDING TO THE MAGNETOMETRIC COMPLEX: MATERIALS OF THE «SCHUMAN» PROJECT

Kuksa¹ Yu.I., Teodosiev² D., Shibaev³ I.G.

¹GEMRC IPE RAS, Moscow, Troitsk, Russia ²SRTI BAS, Sofia, Bulgaria ³IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia²

In work the review of results of the analysis of data of the monitoring which is carried out within the Schuman project is submitted. The experimental part of the Schuman project is based on two hardware complexes. The first complex - the magnetometric station registers three magnetic components (f < 2 Hz). The second complex is designed for registration in the Schuman range. The offered work shows possibilitis and quality of the first complex data.

Работа опирается на данные, полученные в рамках проекта «Шуман» [1], закончившийся в 2017 году. Эти исследования опирались на магнитометрический комплекс, основой которого был трехкомпонентный блок кварцевых датчиков магнитного поля. Динамический диапазон по всем каналам 22 разряда с периодом квантования 0.5 сек. Возможности комплекса и качество полученных данных показано на примерах регистрации как эпизодических событий, так и регулярных наблюдений (проявление влияния длительности светового дня и Луны на динамику суточных компонент при анализе протяженных массивов).

Типичным примером эпизодического события является солнечная вспышка. Вызванная ею дополнительная ионизация ионосферы приводит к токовой перестройке и возмущению В-компонент до (1÷10) нТл при сильных вспышках. Поэтому для ряда вспышек класса X возможно прямое сопоставление наблюдаемых возмущений Вх,у,z – компонент и всплеска потока рентгеновского излучения, характеризующего вспышку. Такое сопоставление для двух событий демонстрирует Рис. 1, где минутные данные потока рентгеновского излучения (X-rays в произвольных единицах) в диапазонах 0.5-4.0 и 1.0-8.0 ангстрем спутников серии GOES [2] сопоставлены с вариациями магнитных компонент в нТл по данным ИЗМИРАН (проект «Шуман»). По оси ОХ время в минутах, начало временной оси соответствует Т0, момент максимума вспышки – Тт.

Естественно, что четкость проявления отклика зависит, кроме класса вспышки, от сезона и местного времени. Различную степень его зашумленности демонстрирует Рис. 2, где сопоставлены данные Алматы (проект «Intermagnet») [3]. и ИЗМИРАН для сильной вспышки класса X 6.9.

В ряде случаев возможна идентификация отклика и от вспышек класса М. Временная динамика корреляционных связей между компонентами магнитных вариаций (Рис. 3, нижний рисунок) четко выделила момент вспышки класса М 6.9 (Рис. 3, средний рисунок). Во временной динамике самих Bx,y,z – компонент отклик, на фоне значительных вариаций, не просматривается (Рис. 3, верхний рисунок).



Рис. 1. Прямые отклики на вспышки классов X3.9 (a) и X3.6 (b) по данным ИЗМИРАН.



Рис. 2. Отклик на вспышку класса Х 6.9 по данным Алматы и ИЗМИРАН



Эпизодические события, имеющие случайный характер, проявляются на фоне достаточно регулярных процессов, связанных с длительными ин-

тервалами наблюдений. Поэтому важна оценка фоновых состояний измеряемых характеристик и их динамика на временных интервалах разного масштаба. Далее приводится анализ Вх-компоненты за 54 дня (с 6 марта по 28 апреля 2003 г.). При спектральном анализе вариаций компонент геомагнитного поля проявляются частоты колебаний тепловых приливных атмосферных волн. Полный их набор периодов содержит T = 24, 12, 8, 4 часа, выделяются и другие гармоники. Применение преобразования Гильберта [4] позволяет получить временную зависимость амплитуды выделенной гармоники. Огибающие (амплитуды) суточной и двадцатиминутной гармоник Вх-компоненты демонстрирует Рис. 4. Растущий тренд амплитуды суточной гармоники (верхняя часть рисунка) отражает увеличение световой части суток. Выделяется влияние фаз Луны на неё. Суммарное воздействие гравитационных сил Солнца и Луны происходит вблизи новолуния, когда следует ожидать максимального эффекта. На нижней части рисунка представлена амплитуда компоненты с периодом ~20 минут. Хорошо видна её связь с выделенными моментами суточной гармоники. Отметим, что 17 марта и 26 апреля были солнечные вспышки классов X 1.5 и М 7.0 (вечером и утром), что могло «усилить» выбросы на 17 и 57 сутки.



Рис. 4. Огибающие суточной и 20-минутной гармоник Вх компоненты за 54 дня.

- Ишков В.Н., Кукса Ю.И., Теодосиев Д., Шибаев И.Г. Непосредственный отклик на солнечные вспышки по данным магнитометрического комплекса: проект «Шуман» // Солнечная и солнечно-земная физика 2010, Пулково, Санкт-Петербург, 3 - 9 октября 2010 г., с. 179-182.
- 2. http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/.
- 3. www.intermagnet.org
- 4. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ В СУТОЧНОМ ХОДЕ МЕСЯЧНЫХ МЕДИАН *foF2* В ЗИМНИЙ ПЕРИОД ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЯПОНСКОГО РЕГИОНА

Легенька А.Д., Корсунова Л.П., Хегай В.В. ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия <u>leg@izmiran.ru</u>

SOME PECULIARITIES IN THE DAY TURN OF THE MONTHLY MEDIAN foF2 DURING THE WINTER UNDER DATA OF THE GROUND-BASED STATIONS OF THE VERTICAL SOUNDING OF THE IONOSPHERE IN THE JAPAN REGION

Legenka A.D., Korsunova L.P., Hegai V.V. IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

A study of monthly quiet day critical frequency medians $foF2_{medQ}$ in the winter period of 2007–2008 at low solar activity according to the ground-based stations of the vertical sounding of the ionosphere Wakkanai and Okinawa (Japan) was made. It was found that the February median is systematically significantly different from the December and January.

При изучении ионосферы одним из наиболее важных параметров является критическая частота регулярного слоя F2 (foF2). С самого начала ионосферных исследований радиофизическими методами медианные значения foF2 для каждого часа суток выбранного месяца обычно определяют тот «фоновый» уровень, относительно которого рассматриваются вариации этого параметра [1]. Такой выбор «фонового» уровня в значительной мере связан с тем фактом, что медиана является РОБАСТНОЙ (ВЫБРОСОУСТОЙЧИВОЙ) ОЦЕНКОЙ СРЕДНЕГО [2] и является, как правило, более репрезентативной для средних условий, чем среднее арифметическое [1]. При этом под выбросоустойчивостью (робастностью) в статистике понимают низкую *чувствительность* к различным резким отклонениям и неоднородностям в выборке, связанным с теми или иными, в общем случае неизвестными, причинами.

В настоящей работе проведено исследование поведения суточных изменений месячных медиан критических частот $foF2_{medQ}$ по геомагнитноспокойным (Q, "quiet") дням при низкой солнечной активности в зимний период 2007-2008 г.г. (F_{10.7} \leq 80 sfu) по данным наземных станций вертикального зондирования ионосферы (HCB3И) японского региона WAKKANAI и OKINAWA с целью определения степени их различия в пределах одного (зимнего) сезона. Геомагнитно-спокойным при этом считался такой день, когда в течение суток значения планетарного индекса геомагнитной активности *Кр* не превышают уровня 2₊ (17, 10 и 8 таких дней для декабря, января и февраля соответственно).

На Рис. 1 ниже показано поведение критических частот $foF2_{medQ}$ (а) и соответствующих им зенитных углов Солнца Z_{medQ} (б) в течение суток по мировому времени UT для декабря (сплошные линии), января (штриховые линии) и февраля (штрих-пунктирные линии) месяцев для HCB3И WAKKANAI



Рис. 1. Поведение критических частот $foF2_{medQ}$ (а) и соответствующих им зенитных углов Солнца Z_{medQ} (б) в течение суток по мировому времени UT для декабря (сплошные линии), января (штриховые линии) и февраля (штрих-пунктирные линии) месяцев для НСВЗИ WAKKANAI (географические координаты станции указаны сверху на рисунке рядом с названием станции). Затемненный прямоугольник под шкалой абсцисс панели «а» отмечает неосвещенные часы суток, а кружок с точкой и черный кружок указывают моменты местного полудня и полуночи соответственно.

Хорошо видно, что февральская медиана Z_{medQ} лежит существенно ниже близких друг к другу декабрьской и январской медиан, при этом, после местного полудня, февральская медиана $foF2_{medQ}$ лежит систематически выше своих декабрьского и январского аналогов. Максимальное относительное различие по абсолютной величине февральской медианы с январской медианой достигает 40% в 8 ч UT и 15% в среднем. Для Z_{medQ} эти величины будут равны -16% в 3 ч UT (местный полдень) и -9% соответственно.

Максимальное отличие декабрьской медианы $foF2_{medQ}$ от январской составляет -15% в 8 ч UT, а в среднем 4.3%, т. е. существенно меньше по сравнению с отличиями между февральскими и январскими значениями,

что также отчетливо видно из рисунка. Максимальные различия значений зенитных углов Z_{medQ} в последнем случае составляют по абсолютной величине 3.5%, а средние всего лишь 1.74%. Таким образом, можно сделать вывод, что «фоновые» уровни ($foF2_{medQ}$) декабря и января действительно близки и существенно отличаются от февральского, что в значительной мере может быть связано с меньшей величиной зенитного угла Солнца в течение суток над указанной НСВЗИ и большей по абсолютной величине скоростью его изменения в феврале по сравнению с декабрём и январём. Действительно, в период с 1.12.2007 по 1.02.2008 для местной полуночи средняя скорость изменения dZ/dt \cong -0.06°/сут, а с 1.02.2008 по 28.02.2008 ее величина составляет -0.33°/сут, что в 5.5 раз быстрее (для местного полудня это только 3.7 раз).

Рис. 2 полностью аналогичен рис. 1, но иллюстрирует описанную выше картину изменений $foF2_{medQ}$ и Z_{medQ} для НСВЗИ ОКІNAWA, лежащей на примерно час долготы (54 мин) к западу от НСВЗИ WAKKANAI и на 18° южнее.



Рис. 2. То же, что и на Рис. 1, но для НСВЗИ OKINAWA.

Здесь, как видно из рисунка, февральская медиана $foF2_{medQ}$ лежит всюду выше своих декабрьского и январского аналогов, но различия максимальны в освещенный период суток (февральская и январская медианы отличаются на 40% в местный полдень, среднее различие составляет 17%), а максимальные различия Z_{medQ} наблюдаются в 13 ч LT и составляют примерно -23% при средних различиях -8%.

Известно, что в отличие от области *E* ионосферы, очень сильно привязанной к изменениям зенитного угла Солнца ($foE \propto \cos(Z)$), динамические факторы, определяющие поведение области F2, делают связь foF2 с Z значительно более сложной [3]. Однако, существенная разница в значениях Z и скорости его изменения в разные месяцы сезона оказывается в рассмотренной ситуации, по-видимому, доминирующим фактором в геомагнитно-спокойных условиях.

Итак, краткие выводы проведенного исследования поведения суточных изменений месячных медиан критических частот $foF2_{medQ}$ по геомагнитно-спокойным дням при низкой солнечной активности в зимний период 2007-2008 г.г. по данным наземных станций вертикального зондирования ионосферы (НСВЗИ) японского региона WAKKANAI и OKINAWA можно сформулировать следующим образом:

1. Получено, что февральская медиана систематически существенно отличается от декабрьской и январской, а максимальное относительное различие по абсолютной величине с январской медианой достигает 40% в некоторые часы суток (и 15-17% в среднем). При этом относительное различие декабрьской и январской медиан по абсолютной величине не превосходит 20%, оставаясь, в среднем, в пределах 8%. В целом, описанные различия нарастают с уменьшением широты.

2. Анализ показал, что эти различия в поведении месячных медиан в значительной мере могут быть объяснены меньшей величиной зенитного угла Солнца в течение суток над указанными НСВЗИ и большей скоростью его изменения в феврале по сравнению с декабрём и январём. Этот факт необходимо учитывать при сезонном (зима) усреднении *foF2*, т. к. средние величины будут изменяться более заметно.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 01201361524 по теме "Исследование солнечной активности и физических процессов в системе «Солнце-Земля»".

- 1. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. М.: Наука, 1977. 343 с.
- 2. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. М.: Мир, 1982. 428 с.
- 3. Ришбет Г., Гарриот О. К. Введение в физику ионосферы. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1975. 304 с.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПИСАНИЯ МОДЕЛЬЮ SM-MIT СТРУКТУРЫ ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА В ЕВРОПЕЙСКОМ ДОЛГОТНОМ СЕКТОРЕ

Лещинская Т.Ю., Пустовалова Л.В.

ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия pustoval@izmiran.ru

ACCURACY ESTIMATION OF THE MAIN IONOSPHERIC TROUGH STRUCTURE DESCRIPTION IN EUROPEAN LONGITUDES USING THE SM-MIT MODEL

Leschinskaya T.Yu., Pustovalova L.V.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The global empirical model of the main ionospheric trough (SM-MIT) is tested with the data from ground-based ionospheric observations in the European longitudinal sector. The model describes the foF2 values in the MIT minimum with higher accuracy than the foF2 monthly median or the global median IRI model. At the same time, the accuracy of the considered local models of the ionosphere is comparable or better than the SM-MIT.

Оценка точности описания структуры и параметров главного ионосферного провала (ГИП) глобальной эмпирической моделью SM-MIT [Karpachev et al., 2016] проведена по данным наземных ионосферных наблюдений в европейском долготном секторе. Использовались также результаты расчетов по другим ранее разработанным моделям: международной справочной модели ионосферы IRI [Bilitza et al., 2014], а также локальными по станциям моделями месячных медиан [Mikhailov and Mikhailov, 1999].

Модель SM-MIT создана в ИЗМИРАН на основе данных спутниковых измерений (внешнее зондирование со спутника Интеркосмос-19 для высокой и in situ измерения электронной концентрации со спутника СНАМР для низкой солнечной активности) и описывает форму и положение ГИП в северном и южном полушариях в спокойных геомагнитных условиях (Кр=2). Интернет-версия модели представлена на официальном сайте ИЗМИРАН в свободном доступе (http://izmiran.ru/ionosphere/sm-mit/).

Для апробации модели в данной работе использовались ионограммы наземного вертикального зондирования трех станций европейского региона за несколько циклов солнечной активности - Соданкула (67.4° N; 26.6° E; Ф=63.7°), Лукселе (64.7° N; 18.8° E; Ф=62.7°) и Санкт-Петербург (60.0° N; 30.7° E; Ф=56.2°). Выбор станций определялся их географическим положением и наличием достаточного количества наблюдений, относящихся к условиям существования ГИП. Соданкула и Лукселе регулярно находят-

ся в области ГИП, тогда как Санкт-Петербург в ночное время суток оказывается на экваториальной стенке ГИП. В соответствии принципами, заложенными при построении модели SM-MIT, сравнение проведено для всех имеющихся наблюдений для 22 - 6 час местного времени периода зимнего солнцестояния (декабрь – январь) в спокойных геомагнитных условиях (kp = 2).



Рис. 1. Среднее относительное отклонение (MRD, %), стандартное отклонение (SD, МГц) и средний сдвиг (Shift, МГц) при сопоставлении наблюдаемых на ст. Санкт-Петербург в декабре и январе foF2 с моделью SM-MIT, месячной медианой foF2, локальной для данной станции моделью медиан foF2 и моделью IRI [Leshchinskaya and Pustovalova, 2018].

Апробация модели включает две ветви: сопоставление модельных foF2 в минимуме ГИП с наблюдаемыми значениями (когда таковые имеются) в Соданкуле и Лукселе и оценка точности модели при описании экваториальной стенки ГИП, используя данные наблюдений foF2 в Санкт-Петербурге. В качестве статистических характеристик были использованы: среднее относительное отклонение (MRD, %), стандартное отклонение (SD, МГц) и средний сдвиг (Shift, МГц) модельных foF2 относительно наблюдаемых значений.

При описании экваториальной стенки провала (станция Санкт-Петербург) разработанная модель SM-MIT в среднем лучше воспроизводит наблюдаемые foF2 по сравнению с медианной моделью IRI (Puc.1). При
этом, месячная медиана foF2 демонстрирует гораздо более высокую точность описания foF2: среднее относительное отклонение не превосходит 15%, тогда как анализируемая модель SM-MIT дает отклонения от 17% до 37%.

Сравнение со специально отобранными периодами с kp = 2 ± 0.1 (модель была разработана для kp = 2) не показывают какого-либо улучшение точности – месячная медиана демонстрирует более высокую точность описания. Так медиана дает среднее относительное отклонение для декабря (8.7 – 19.7)% и для января (8.3 – 19.1)%, тогда как модель SM-MIT дает (13.2 – 36.4)% для декабря и (13.1 – 31.1)% для января.

При описании foF2 в минимуме ГИП на станции Соданкула модель SM-MIT демонстрирует лучшие результаты по сравнению с месячной медианой и моделью IRI, хотя относительные отклонения модельных значений foF2 от наблюдаемых достаточно велики ~ (20 - 30)%. Модельные результаты по станции Лукселе уступают по точности месячной медиане при средних относительных отклонениях (35 - 54)%.

Модель SM-MIT показывает статистически значимое уменьшение foF2 в минимуме провала по отношению к месячной медиане на станции Соданкула, однако в абсолютном выражении это уменьшение невелико, в среднем около 10%, что сильно меньше наблюдаемого уменьшения foF2 в вечернем LT секторе. По данным наблюдений на станции Лукселе такое уменьшение модельных foF2 относительно медианных значений вообще отсутствует.

Таким образом, анализ результатов тестирования модели для зимних месяцев показывает, что разработанная модель SM-MIT в среднем лучше воспроизводит наблюдаемые foF2 по сравнению с медианной моделью IRI при описании как экваториальной стенки провала (станция Санкт-Петербург), так и минимума ГИП (станция Соданкула). Вместе с тем, точность рассмотренных локальных моделей ионосферы [Mikhailov and Mikhailov, 1999] сопоставима или лучше SM-MIT.

Литература

- 1. Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Pustovalova L.V. Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V.146. P.149-159. 2016. [doi: 10.1016/j.jastp.2016.05.008].
- Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.-A., Reinisch B. The International Reference Ionosphere 2012 - a model of international collaboration // J. Space Weather Space Clim. V.4. Art. A07. 2014. [doi: 10.1051/swsc/2014004].
- Mikhailov A.V., Mikhailov V.V. Indices for monthly median foF2 and M(3000)F2 modelling and long-term prediction. Ionospheric index MF2 // Int. J. Geomagn. Aeronomy. V.1. N.2. P.141-151. 1999.
- 4. Leshchinskaya T.Yu., Pustovalova L.V. Description of the Main Ionospheric Trough by the SM-MIT model. European longitudinal sector // Geomagn. Aeronomy. V.58. N.3. P.373-382. 2018. [doi: 10.1134/S0016793218030118].

О РЯДЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОНЧ ВОЛН В ПРИЗЕМНОЙ ПЛАЗМЕ

Лундин Б.В.

ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия lundin.bv@gmail.com

ON SOME VLF WAVE PECULIARITIES IN THE NEAR EARTH PLASMA

Lundin B.V.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The typical features of VLF phenomena are essentially connected with the dipole structure of near Earth plasma geomagnetic field. Some numerical parameters of the registered spectra and ray propagation maps can be reconstructed quantitatively by application of dipole part of geomagnetic field only.

Внимание к необычным звуковым помехам при работе телефонистов было привлечено еще со времен начала 20 века. Пассивные и активные эксперименты с помощью электромагнитных волн ОНЧ (3 - 20 кГц) и смежных по частотам диапазонов на Земле и в космосе прояснили детали их происхождения и обширные диагностические возможности волн электронного свистового мода (ЭСМ) для изучения приземной плазмы [1]. Обратим внимание лишь на особенности регистрируемых спектров, в которых напрямую выявляется роль основной - дипольной структуры геомагнитного поля приземной плазмы. К примеру, при распространении в квазирезонансном (КР) режиме карты лучей волн ЭСМ в плотной плазме демонстрируют свойство подобия. В этом случае лучевые траектории определяются только структурой геомагнитного поля и карты КР лучевых траекторий для частоты F могут быть получены, в основном, просто увеличением земного радиуса R на карте лучей частоты F0 (Рис. 1) в (F/F0)*(1/3) раз (показатель степени 1/3 - «от дипольности»). Распространение КР волновых пакетов (ВП) при этом не традиционно «дактовое» - вдоль магнитных силовых трубок, а под определенными локальными углами к силовым линиям магнитного поля. Распределение же плотности плазмы в пространстве обеспечивает стабильность распространения в КР режиме (или выход из него) [2]. Свою лепту в «КР стабильность» вносят кривизна и сходимость к полюсам силовых линий дипольного геомагнитного поля, особенно для КР ВП движущихся к полюсам с волновым вектором ориентированным в сторону больших L оболочек (L- параметр МакИллвейна).

Наконец, отметим необычную эволюцию частотного диапазона прозрачности (ДП) для волн ЭСМ в плазме умеренной плотности с уменьшением доли свободных электронов. При появлении в фоновой плазме за-



Рис. 1. Карта нисходящих «предельных» КР лучей ЭСМ (20 кГц) в плоскости дипольного меридиана; старт на локальных электронных частотах: в зонах 2 и 4 - на гирочастоте, в зоне 3 - на плазменной, F - зона финиша, пунктирные линии - L оболочки, плазмопауза на L=3.

грязнений с высоким сродством к электронам, приводящему к образованию ионов и других отрицательно заряженных конгломератов, частота нижней границы ДП для ЭСМ растет от ионных гирочастот в сторону значения ионной плазменной частоты [3]. Для высокочастотных же волн - наоборот: локальное «обеднение электронами» ионосферы приводит к расширению диапазона прозрачности в сторону низких частот.

Перейдем к параметрам приземной плазмы. В масштабах плазмосферы до экваториальных высот порядка четырех радиусов Земли на рис. 2 (а, b) показано распределение вдоль магнитных силовых трубок двух параметров: (а) отношения гирочастоты электронов к электронной плазменной частоте (Gyro/Pl), и (b) - нижнегибридной (LHR) частоты в кГц.



Рис. 2. Здесь вдоль магнитной силовой трубки меняется Lat/|Lat0| - отношение магнитной широты Lat вдоль трубки к широте |Lat0| ее основания на высоте 200 км. Отношение Gyro/Pl заметно растет в зоне экватора выше плазмопаузы (|Lat0| = 60).

Высотный ход отношения Gyro/Pl (а) демонстрирует зону максимума на малых L оболочках, если на этих высотах происходит смена шкалы Hp высотного хода плотности приземной плазмы Hp ~ (Ti/Mi)/0.65 (Ti температура в эВ, Mi - эффективная масса «преобладающего иона» в а.е.м.) в сравнении со шкалой Hg в интервале ~ [0.03; 0.05] для квадрата гирочастоты электронов. Для приземных условий с Ti ~ 0.1 эВ и скачком Mi в 4 - 10 раз на высотах порядка 1000-1500 км такое вполне реализуемо; те же факторы определяют наличие и глубину приземного LHR волновода (b).

С ростом L вдоль восходящего ('1') луча возможно достичь зоны его отражения с переходом в КР режим ('2') для частот ниже локальной полугирочастоты электронов как на рис. 3 [4]. Отражение с переходом в КР режим показано на примере, когда градиент электронной плотности (или градиент (Pl/Gyro)*2) ортогонален постоянному внешнему магнитному полю.



Рис. 3. Здесь индекс ветки '2' использован для КР режима, когда волновые числа могут достигать больших значений. В плотной плазме плазмосферы значение параметра q=1, при котором возможно отражение плоских волн с переходом в КР режим, достижимо лишь для частот ЭСМ ниже половины локальной гирочастоты электронов (при q>1 нет плоских волн ЭСМ).

Схема отражения на рис. 3 может иллюстрировать также необычный эффект появления поляризации «по ионам» на частотах ЭСМ, когда для плоских волн обязательна поляризация «по электронам». Как обнаружено в [4] такой эффект может быть зарегистрирован в электрической компоненте ЭСМ в «затененной» зоне рис. 3 («справа») при интерференции достаточно широкого падающего и отраженного волновых пучков. Нетривиальность явления еще и в том, что в этой схеме нельзя зарегистрировать поляризацию «по ионам» в магнитной компоненте того же интерференционного волнового поля. Подобное возможно и в «волноводе разряжения».

Что касается КР режимов распространения ЭСМ, то в приземной плазме оказалось плодотворным вычислять отношение частоты регистрируемых на космических аппаратах (КА) эмиссий ЭСМ (ОЧРЭ) к экваториальной гирочастоте электронов на L оболочках КА. В частности, для магнитосферно отраженных (MR) свистов удается рассчитать ожидаемые стабильные соотношения между частотами КР МR свистов в последовательных регистрациях их на дипольном магнитном экваторе и для низколетящих КА [5]. Как было обнаружено в [6] переход в КР режим происходит на восходящих (с ростом L) траекториях до магнитного экватора, где частота становится близкой к половине локальной электронной гирочастоты, причем далее волновые пакеты ЭСМ движутся, зачастую [2,5], в устойчивых КР режимах с понижением в среднем L оболочек как на схеме рис. 4.



Рис. 4. «Справа» выписаны частоты ОЧРЭ («сверху-вниз»), вычисленные для пунктов регистрации на КА, пронумерованных «слева» на схеме КР лухевой траектории типа MR свистов ЭСМ.

Вычисленные относительные частоты регистрации ОЧРЭ объясняют появление подобных в дискретных плазмосферных эмиссиях на низколетящих КА. Чаще всего лишь верхние два значения ОЧРЭ идентифицируются в регистрируемых спектрах [7]; следы меньших - предмет поиска.

Литература

- Storey L.R.O. An Investigation of Whistling Atmospherics // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. V. 246. P. 113-141. 1953.
- 2. Lundin B.V., Krafft C. On the focusing of whistler wave field intensity in the quasiresonant propagation regime // J. Geophys. Res. V. 102. № Al. P. 141-150. 1997.
- 3. Lundin B.V., Krafft C. On the dispersion law of low-frequency electron whistler waves in a multi-ion plasma // Ann. Geophys. V. 26. P. 1605-1615. 2008.
- 4. Lundin B., Krafft C. Ion sense of polarization of the electromagnetic wave field in the electron whistler frequency band // Ann. Geophys. V. 20. P. 1153-1165. 2002.
- Lundin B., Krafft C. On the similarity features of normalized frequency spectrograms of magnetospherically reflected whistlers // J. Geophys. Res. V. 106. № All. P. 25643-25654. 2001.
- 6. Алехин Ю.К., Шкляр Д.Р. Некоторые вопросы распространения электромагнитных волн в магнитосфере // Геомагн. и аэрономия. Т. 20. № 3. С. 501-507. 1980.
- Boskova J., Jiricek F., Lundin B.V., Shklyar D.R., Triska P. A possible common nature of equatorial half gyrofrequency VLF emissions and discrete plasmaspheric emissions // Ann. Geophys., V. 8. P. 755-763. 1990.

СЕЗОННЫЕ И ЦИКЛИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНО-ВОЗМУЩЕННЫХ ДНЕЙ СО СРЕДНЕСУТОЧНЫМ ЗНАЧЕНИЕМ ГЕОМАГНИТНОГО ИНДЕКСА Dst < -100 нТл

Макаров Г.А.

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия gmakarov@ikfia.ysn.ru

SEASONAL AND CYCLICAL DISTRIBUTIONS OF MAGNETICALLY PERTURBED DAYS WITH AN AVERAGE DAILY VALUE OF GEO-MAGNETIC INDEX Dst < -100 nT

Makarov G.A.

Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, Russia

Seasonal and cyclical distributions of strong perturbed days are considered. It is shown that, similarly to the previously obtained average daily Dst data, the seasonal distribution of strongly disturbed days has equinoctial maxima and noticeable increases in July and November. The distribution of days has a well pronounced cyclicality in accordance with solar activity, but its time series is shifted by 1-2 years relative to solar data at a later time.

Статистические исследования закономерностей геомагнитной активности часто основываются на среднесуточных данных наземных, межпланетных и солнечных параметров. В связи с этим представляет интерес рассмотреть сезонные и циклические распределения среднесуточных значений *Dst*-индекса.

Анализируются случаи, когда среднесуточные значения геомагнитного индекса *Dst* были ниже -100 нТл. Рассматривается период 1966–2015 гг. Всего выделено 114 дней, удовлетворяющих такому критерию.

Сезонное распределение числа дней n со среднесуточным значением Dst < -100 нТл представлено на рис. 1. Хорошо видны весеннее и осеннее возрастания числа дней, кроме того, заметно возрастание в июле. Сильный рост n наблюдается в ноябре. Такое распределение числа сильно возмущенных дней совпадает с аналогичными вариациями интенсивности сильных геомагнитных бурь [1], полученными по среднечасовым данным Dst, и в то же время отличается от выводов [2] об одном равноденственном пике. Весеннее возрастание n приходится на март-апрель, осеннее – на октябрьноябрь, причем в ноябре возрастание особенно велико, об этом отмечено в [3]. По результатам гармонического анализа амплитуда второй гармоники сезонного хода n составляет (6.0 ± 0.7) нТл, фаза максимума приходится на 12 апреля и 12 октября (ошибка фазы ±7 дней). О возрастании n в июле для интенсивных бурь говорится в работах [1, 4].



Рис. 1. Сезонное распределение числа дней n со среднесуточным значением индекса Dst < -100 нТл

На рис. 2 приведено распределение числа дней *n* со среднесуточным значением *Dst* < -100 нТл и числа солнечных пятен *W* по годам в рассматриваемый период. Видно, что число *n* имеет циклическую закономерность и его временной ряд сдвинут по фазе относительно солнечных данных. Максимумы числа дней *п* приходятся на начало фазы спада солнечной активности. Для выявления сдвига между рядами *n* и *W* был применен метод наложенных эпох. За точку отсчета был выбран год первого максимума числа солнечных пятен W в конкретном цикле. Данные ряда W были осреднены с учетом их наличия в цикле, тогда как данные ряда *n* были суммированы. Результаты представлены на рис. 3. Полученное распределение *п* по критерию Пирсона при уровне значимости $\alpha = 0.05$ и числе степеней свободы 8 соответствует нормальному распределению ($\chi^2_{\mu a \delta \pi} = 9.777$). Относительный сдвиг рядов хорошо заметен – он составляет около двух лет. Распределение *п* получилось с одним пиком, в отличие от распределения с двумя пиками в [4], по-видимому, по двум причинам: во-первых, мы имеем дело со среднесуточными значениями, во-вторых, в работе [4] рассматриваются экстремальные геомагнитные бури. В отдельные солнечные циклы – например, в 20 и 23 циклах – двойные пики можно увидеть (рис. 2).

Далее, для определения сдвига между рядами была проведена кросскорреляция *n* и *W*. При прямом сравнении обоих рядов (рис. 3) коэффициент корреляции *R* оказался равным 0.53 ± 0.07 . Если сместить временной ряд *n* относительно ряда *W* на 1 год назад, то $R = 0.62\pm0.06$, при смещении на 2 года $R = 0.60\pm0.06$, на 3 года $R = 0.32\pm0.08$. То есть максимальное число дней со среднесуточным значением *Dst* < -100 нТл имеет место на фазе спада солнечного цикла со сдвигом 1-2 года.



Рис. 2. Годовое распределение дней *n* со среднесуточным значением индекса *Dst* < -100 нТл и числа солнечных пятен *W* в период 1966 – 2015 гг.



Рис. 3. Распределения суммарного за 5 солнечных циклов ($\mathbb{N} \mathbb{N} \mathbb{O} 20-24$) числа *n* дней с *Dst*<-100 нТл и осредненного за 5 циклов числа *W* солнечных пятен. Данные рассчитаны относительно первого максимума *W* в данном цикле. Для *W* приведены стандартные отклонения среднего.

Для выяснения межпланетных условий, приведших к сильно магнитно-возмущенным дням, были взяты данные из Базы OMNI. Для нашей выборки значения скорости V солнечного ветра преимущественно лежат в интервале 450÷700 км/с, при этом средняя по всей выборке $\langle V \rangle =$ 602.7±12.8 км/с; значения модуля B межпланетного магнитного поля (ММП) – в интервале 9÷18 нТл, $\langle B \rangle = 14.9\pm0.6$ нТл; значения североюжной компоненты *Bn* ММП – в интервале -6÷3 нТл, $\langle Bn \rangle = -2.6\pm0.6$ нТл. Большая часть событий (около 70%) имела место при южной ориентации ММП. Эти количественные значения межпланетных параметров значительно отличаются от типичных значений [5] в большую сторону. Они практически совпадают с оценками, полученными в работе [6] при анализе интенсивных геомагнитных бурь. Действительно, критерий, использованный в настоящей работе, когда выбирались дни со среднесуточным значением индекса *Dst* ниже -100 нТл, способствовал тому, что они содержат главную или восстановительную фазу интенсивных геомагнитных бурь.

Рассмотренные сезонные и циклические изменения в распределении магнитно-возмущенных дней со среднесуточным значением геомагнитного индекса Dst < -100 нТл в период 1966 – 2015 гг. оказались ожидаемыми. Ранее подобные результаты были получены другими авторами по среднечасовым значениям Dst.

Сезонное распределение сильно возмущенных дней имеет равноденственные максимумы и, кроме того, заметные возрастания в июле и ноябре.

Распределение числа дней со среднесуточным значением Dst < -100 н Тл имеет хорошо выраженную цикличность в соответствии с солнечной активностью, но его временной ряд сдвинут на 1-2 года относительно солнечных данных на более позднее время.

Литература

- 1. Echer E., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Statistic studies of geomagnetic storms with peak Dst≤-50 nT from 1957 to 2008 // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. V. 73. Iss. 11-12. P. 1454-1459. 2011.
- Mursula K., Tanskanen E., Love J. J. Spring- fall asymmetry of substorm strength, geomagnetic activity and solar wind: Implications for semiannual variation and solar hemispheric asymmetry // Geophys. Res. Lett. V. 38. L06104. 2011.
- Clúa de Gonzalez A.L, Silbergleit V.M., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Irregularities in the semiannual variation of the geomagnetic activity // Advances in Space Research, V. 30. Iss. 10. P. 2215-2218. 2002.
- Gonzalez W.D., Echer E., Tsurutani B.T., Clúa de Gonzalez A.L., Lago A.D. Interplanetary Origin of Intense, Superintense and Extreme Geomagnetic Storms // Space Sci Rev. V. 158. P. 69–89. 2011.
- 5. Коваленко В.А. Солнечный ветер. М.: Наука, 271 с. 1983.
- 6. Uwamahoro J. and McKinnell L.-A. Solar and interplanetary precursors of geomagnetic storms in solar cycle 23 // Advances in Space Research. V. 51. Iss. 3. P. 395-410. 2013.

DOI: 10.31361/pushkov2019.028

ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПЕРИОДЫ ПОВЫШЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И МАГНИТНЫХ БУРЬ (ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СЕТИ СТАНЦИЙ INTERMAGNET)

Мандрикова^{1,2} О.В.,Родоманская² А.И., Зайцев³А.Н.

¹Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край, Россия ²Камчатский государственный технический университет Петропавловск-Камчатский, Россия ³Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,, г. Москваг. Троицк, Россия pantina anastasia@mail.ru

PARTICULARS OF BEGINNINGS AND PROPAGATION OF GEOMAGNETIC DISTURBANCESIN PERIODS OF HIGH SOLAR ACTIVITY AND MAGNETIC STORMS (OVER MEASUREMENTS OF STATIONS NETWORK INTERMAGNET)

Mandrikova^{1,2} O.V., Rodomanskay²A.I., Zaitsev ³A.N.

¹Federal State Budget Research Institution Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Kamchatka region, Russian ²Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

³Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Waves Propagation of the Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russian

We present and describe an automated method for analysis of magnetic data and the detection of geomagnetic disturbances based on wavelet transformation. The parameters of the computational algorithms allow us to estimate the characteristics of non-uniformly scaled peculiar properties in the variations of the geomagnetic field that arise during periods of increasing geomagnetic activity. The analysis of geomagnetic data on the eve and during periods of magnetic storms was carried out on the basis of the method according to the network of ground stations. Periods of increasing geomagnetic activity are highlighted which precede and accompany magnetic storms. The dynamic of variation of the geomagnetic field in the auroral zone is considered in detail.

Задача исследования. Анализ геомагнитных данных и изучение процессов в магнитосфере позволяет получать ценную информацию о состояния электромагнитных полей в околоземном пространстве в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь [1]. Сложность процесса обработки и анализа геомагнитных данных связана с их сложной нерегулярной структурой и наличием локальных особенностей различной амплитуды и длительности. Эти особенности содержат важную

информацию о протекающих процессах в магнитосфере. Традиционные методы анализа геомагнитных данных не позволяют детально исследовать быстро-изменчивую структуру вариаций геомагнитного поля и приводят к потере значимой информации. Одним из наиболее эффективных современных методов анализа данных сложной структуры является вейвлет-преобразование [2]. Данный математический аппарат лежит в основе метода исследования.

В работе выполнена обработка геомагнитных данных минутного разрешения станций «Якутск» ҮАК, «Паратунка» РЕТ, экваториальной станции «Гуам» GUA, США, и станций авроральной зоны «Абиско» ABK, Швеция, «Барроу» BRW, США, «Колледж» СМО, США, «Форт Черчилл» FCC, Канада, «Нарсарсуак» NAQ, Гренладндия, «Йеллоунайф» ҮКС, Канада, «Саникилуак» SNK, Канада, и «Леервогер» LVR, Исландия (данные получены в обсерваториях в соответствии со стандартами INTERMAGNET(www.inrtermagnet.org)). Результаты анализа сравнивались с данными межпланетного магнитного поля и параметрами солнечного ветра (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html). Для анализа возмущений в авроральной зоне использовались индексы геомагнитной активности АЕ, AU, AO и AL (http://isgi.unistra.fr/index.php). Анализ экваториальной токовой системы основывался на часовых значениях Dst-индекса (http://isgi.unistra.fr).

Метод анализа и результаты исследования. В работе использовалась модель вариации геомагнитного поля вида [3]:

$$f(t) = f_{mpend}(t) + f_{go3Myu}(t) + e(t) = \sum_{n} c_{m,n} \phi_{m,n}(t) + \sum_{j \in I} g_j(t) + e(t), \quad (1)$$

где компонента $f_{mpend}(t) = \sum_{n} c_{m,n} \phi_{m,n}(t)$ описывает вариации геомагнитного поля в спокойные периоды; $\phi_m = \{\phi_{m,n}\}_{n \in \mathbb{Z}}$ – базис сглаживающей скэйлингфункции; $f_{go3Myu_i}(t) = \sum_{j \in I} g_j(t) = \sum_{j \in I} \sum_{n} d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$ – описывает геомагнитные возмущения, возникающие в периоды возрастания геомагнитной активности; коэффициенты $c_{m,n} = \langle f, \phi_{m,n} \rangle$ и $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$; *m* - масштабный уровень вейвлет-разложения; $\Psi_j = \{\Psi_{j,n}\}_{n \in \mathbb{Z}}$ – вейвлет-базис; *l* - набор индексов; *j* – параметр масштаба; компонента *e*(*t*) является шумом.

Учитывая эквивалентность дискретных и непрерывных вейвлетразложений, для получения детальной информации о свойствах функции *f* применялось непрерывное вейвлет-преобразование:

$$\left(W_{\psi}f\right)(b,a) \coloneqq \left|a\right|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f\left(t\right) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \Psi - \text{вейвлет}, f \in L^{2}\left(R\right), a, b \in R, a \neq 0.$$
(2)

Следуя работе [4] в качестве меры интенсивности геомагнитных $v_{b,a} = \left| \left(W_{\psi} f \right) (b,a) \right|.$ возмущений использовалась величина: Тогда интенсивности возмущений может быть оценена на основе величины:

$$I_{b} = \sum_{a} \left| \left(W_{\psi} f \right) (b, a) \right|$$
(3)

Учитывая существенно нестационарную структуру геомагнитных данных для выделения положительных и отрицательных возмущений поля использовались адаптивные пороги, впервые предложенные в работе [4]:

$$P_{T_{a}}\left[\left(W_{\psi}f\right)(b,a)\right] = \begin{cases} \left(W_{\psi}f\right)(b,a), e c \pi u \left(W_{\psi}f\right)(b,a) \ge T_{a} \\ 0, e c \pi u \left|\left(W_{\psi}f\right)(b,a)\right| < T_{a} \\ -\left(W_{\psi}f\right)(b,a), e c \pi u \left(W_{\psi}f\right)(b,a) < -T_{a} \end{cases}$$

$$T = U \bowtie St \text{ appropriate properties of the p$$

где $T_a = U \times St_a$ является пороговой функцией, $St_a^l = \sqrt{\frac{1}{l-1}\sum_{k=1}^l \left((W_{\psi}f)(b,a) - \overline{(W_{\psi}f)(b,a)} \right)^2} \overline{(W_{\psi}f)(b,a)} -$ среднее значение,

вычисляемое в скользящем временном окне длины l, U – пороговый коэффициент. Длина окна *l* определяет размеры скользящего временного окна, в рамках которого оцениваем возмущения. Коэффициент Uопределяет интенсивность выделяемых геомагнитных возмущений.

Интенсивность короткопериодных положительных и отрицательных возмущений оценивалась на основе величины:

$$E_b^{\pm} = \sum_{a} P_{T_a} \left[\left(W_{\psi} f \right) (b, a)^{\pm} \right].$$
⁽⁵⁾

Анализируемое событие, произошедшее 27 сентября 2017 г. (рисунки 1-2) вызвано высокоскоростным потоком (http://spaceweather.com). Накануне магнитной бури флуктуации южной компоненты ММП Вг менялась в пределах +/-2нТл. Видно (см. рис.1), что незначительное увеличение индексов авроральной активности сопровождалось слабыми возмущениями геомагнитного поля на анализируемых станциях (рис. 1еи). Совпадение периодов повышенной геомагнитной активности на станциях с периодами повышения индексов авроральной активности, наблюдаемых на фоне возрастания флуктуаций Вz-компоненты (рис. 1в), позволяет предположить связь выделенных геомагнитных возмущения с нестационарными изменениями параметров межпланетной среды и усилением авроральной активности. В начале суток 27 сентября Вzкомпонента повернулся на юг (примерно в 00:40 UT) и снизилась до значения -6,7 нТл. На всех анализируемых станциях в этот период возросли геомагнитные возмущения (см. рис. 1е-и). Начальная фаза бури сопровождалась существенным повышением геомагнитной активности на станциях средних и высоких широт (ҮАК, РЕТ), и одновременным возрастание авроральной активности. Детальный анализ данных авроральной зоны (рис. 2) показывает корреляцию возрастаний индексов авроральной активности (рисунок 2б,д) и флуктуаций южной компоненты ММП (рисунок 3в,е) с возрастаниями геомагнитных возмущений на станциях в ночное время (рисунок 2а,г). Вероятно, это связано с возрастанием интенсивности токов полярного электроджета в авроральной области [1].



Рис.1.Результаты обработки данных за период с 26.09.2017 по 28.09.2017 а) авроральные индексы AE, AO, AL и AU; б) скорость солнечного ветра; в) Вz-компонента ММП, красным цветом показаны положительные значение, синим – отрицательные; г) Dst-индекс; д) Н-компоненты геомагнитного поля станций PET, YAK и GUA; е) вейвлет-спектр геомагнитного возмущений в районах станций PET, YAK и GUA(операция (2)); ж) абсолютные значения

интенсивностивозмущенийв районах станций РЕТ, ҮАК и GUA (операция (3)). ж) положительные (красным) и отрицательные (синим) возмущения на станциях РЕТ, ҮАК и GUA(операция (4)); з) интенсивность положительных (красным) и отрицательных (синим) возмущений на станциях РЕТ, ҮАК и GUA (операция (5)).Вертикальная пунктирная линия указывает на начало магнитной бури.





Полученные экспериментальные результаты указывают на высокую чувствительность предлагаемой методики анализа и возможность ее применения для детального изучения динамики и пространственновременного распределения геомагнитных возмущений.

Литература

- 1. Зайцев, А.Н. Планетарные особенности развития авроральных электроструй по МЛТ-УТ диаграммам АЕ-индекса / А.Н. Зайцев, В.О. Папиташвили, В.А. Попов // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. № 26(1). С. 156 158.
- Mandrikova, O. Analysis of the Earth's magnetic field variations on the basis of a wavelet-based approach / O. Mandrikova, I. Solovjev, V. Geppener, R. Taha Al-Kasasbehd, D. Klionskiy // Digital Signal Processing. – 2013. – Vol. 23(1). – P. 329 -339.1
- Mandrikova, O.V. Multiscale variation model and activity level estimation algorithmof the Earth's magnetic field based on wavelet packets / O.V. Mandrikova, I.S. Solovev, S.Yu Khomutov, V.V. Geppener, D.M. Klionskiy, M.I. Bogachev// Ann. Geophys. – 2018. – Vol. 36. – P. 1207 - 1225. DOI: 10.5194/angeo-36-1207-2018. 3

ОПТИМИЗАЦИЯ ИМПЕДАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ АМОРФНЫХ МИКРОПРОВОДОВ

Меньшов¹ С.А., Одинцов¹ В.И., Попова¹ А.В., Гудошников^{1,2} С.А.

1-ИЗМИРАН г. Москва, г. Троицк, Россия. 2-МИСиС, г. Москва, г. Троицк, Россия. <u>menshov-s-a@yandex.ru</u>

OPTIMIZATION OF THE MAGNETOIMPEDANCE CHARACTERISTICS OF MAGNETIC SENSORS BASED ON AMORPHOUS FERROMAGNETIC MICROWIRES

Menshov¹ S.A., Odintsov¹ V.I., Popova¹ A.V., Gudoshnikov^{1,2} S.A.

1-IZMIRAN, Moscow, Russia. 2-MISiS, Moscow, Russia.

The amorphous glass coated ferromagnetic microwires (AFM) with small metallic core diameters are promising for development of small sizes highly sensitive sensors of a weak magnetic field. Such AFM magnetic sensors operate based on giant magnetoimpedance effect. It is experimentally demonstrated, that this effect can be improved using heat treatment based on Joule heating technique.

Разработка и создание миниатюрных, высокочувствительных магнитных датчиков наземного и спутникового базирования является одним из приоритетных направлений для решения задач геофизики. Возможным подходов при разработке таких датчиков может быть использование эффекта гигантского магнитного импеданса (ГМИ). Эффект ГМИ заключается в увеличении на 100% и более комплексного электрического сопротивления аморфных ферромагнитных материалов под действием приложенного магнитного поля. Типичным материалом, в котором ГМИ, являются аморфные ферромагнитные наблюдается эффект микропровода (АФМ) в стеклянной оболочке на основе кобальта с циркулярной магнитной анизотропией [1]. На основе АФМ возможно малогабаритных ГМИ магнитометров и градиометров с создание чувствительностью по магнитному полю порядка сотых долей наноТесла [2-5]. В данной работе рассмотрен способ улучшения свойств АФМ за счет дополнительного отжига постоянным током.

Для улучшения магнитных свойств АФМ после их изготовления, часто применяется дополнительная термическая обработка (отжиг) путем пропускания по внутренней жиле микропровода постоянного тока (Джоулев нагрев) [6-8]. При этом величина тока и время воздействия должны быть подобраны таким образом, чтобы в процессе отжига АФМ его ГМИ характеристики достигали максимальных значений по сравнению с исходными. Для выбора оптимальных режимов отжига было предложено проводить непрерывный контроль состояния АФМ в ходе отжига путем измерения его электрического сопротивления [9-10] и последующим измерением магнитных свойств отожженных образцов.

В наших экспериментах использовались АФМ с металлической жилой состава $Co_{69}Fe_4Cr_4Si_{12}B_{11}$, диаметром 14,5 мкм и диаметром стеклянной оболочки 29.3 мкм. В исходном состоянии данные АФМ характеризовались малой коэрцитивной силой ($H_c < 0.05$ Э), небольшим полем анизотропии ($H_a \sim 2$ Э), отрицательным, близким к нулевому, значением коэффициента магнитострикции ($\lambda_s \sim -4*10^{-7}$) и величиной $Z_{\phi\phi}$ компоненты тензора импеданса порядка 107 %.

Ha Рис. 1 приведен график зависимости относительного сопротивления АФМ от приложенной тепловой мощности, при нагреве АФМ выше температуры его кристаллизации. Видно, что в области значений тепловой мощности до ~0.7 Вт относительное сопротивление уменьшается и при значении ~ 0,8 Вт наблюдается минимум в зависимости сопротивления от мощности. Затем следует участок роста сопротивления с уменьшением скорости роста при мощности ~2,3 Вт, а после достижения мощности ~3,3 Вт наблюдается резкое падение сопротивления. В ходе исследований было установлено, что при воздействии мощностью в пределах до 0.8 Вт в АФМ протекают процессы структурной релаксации, которые могут сопровождаться уменьшением величины константы магнитострикции, уменьшением закалочных напряжений и небольшим увеличением ГМИ-характеристик. При воздействии мощностью ~3,3 Вт и более в АФМ начинается процесс кристаллизации аморфной фазы, который сопровождается резким падением относительного сопротивления АФМ. Магнитные характеристики таких АФМ после охлаждения резко ухудшались. У них существенно возрастала величина коэрцитивной силы $(H_c > 200 \text{ })$ и поля анизотропии $(H_a > 300 \text{ })$, а ГМИ-характеристики наибольшего увеличения полностью исчезали. Эффект ГМИхарактеристик АФМ после отжига наблюдался при воздействии тепловой мощности в пределах от 1.0 Вт до 2.5 Вт в течение 30 - 40 минут.

Измерения ГМИ характеристик АФМ проводились на частоте возбуждения 4 МГц. Исследовались индуктивная $Z_{\phi\phi}$ компонента тензора импеданса и недиагональная Z_{\phiz} компонента [11]. Полевые зависимости индуктивной ГМИ-компоненты исследуемых АФМ, отожженных при разных значениях мощности, приведены на Рис. 2.а. Если изначально ГМИ-отношение составляло примерно 107%, то при увеличении мощности нагрева до ~0.8 Вт величина ГМИ-отношения увеличивалась и достигала максимальных значений ~ 145%. При увеличении мощности нагрева амплитуда ГМИ отношения уменьшалась. Дальнейшее увеличение мощности нагрева приводило снова к увеличению ГМИ отношения при отжигах мощностью ~3.3 Вт и затем его уменьшению. Полевые

зависимости недиагональной $Z_{\varphi z}$ компоненты, для AФM с максимальным значением ГМИ-отношения $Z_{\varphi \varphi}$ компоненты, приведены на Рис.2.б. Приведенные здесь кривые измерены при трех значениях постоянного тока смещения (Iсм = 0 мА, 1 мА и 1.5 мА), протекающего через AФM. Максимальная крутизна преобразования амплитуды измеряемого сигнала от внешнего магнитного поля достигается при токе смещения 1 мА и составляет ~ 1 мкB/нT.



Рис. 1. Изменение относительного сопротивления AФM в зависимости от приложенной мощности отжига.



Рис. 2. (а) Полевые зависимости индуктивной $Z_{\varphi\varphi}$ компоненты тензора импеданса АФМ, отожженных при разных значениях тепловой мощности; (б) Полевые зависимости недиагональной $Z_{\varphi\varphi}$ компоненты, для АФМ с максимальным значением ГМИ-отношения $Z_{\varphi\varphi}$ компоненты, измеренные при трех значениях постоянного тока смещения.

Полученные результаты показывают, что в процессе Джоулева нагрева в АФМ происходят значительные изменения электрических и магнитных свойств. При этом, ГМИ характеристики, наиболее важные для технических приложений, улучшаются и могут достигать своего максимального значения при оптимальном выборе воздействующей тепловой мощности. Индуктивная компонента ГМИ-отношения в таких микропроводах может увеличиваться в 1.5 - 2 раза по отношению к исходной, а крутизна недиагональной ГМИ-компоненты может достигать значений ~ 1 мкВ/нТ, близких к значениям высококачественных феррозондовых датчиков.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Министерства образования и науки (соглашение № 3.7477.2017/ВҮ).

Литература:

- 1. Hauser, H.; Kraus, L.; Ripka, P. Giant magnetoimpedance sensors. IEEE Instrum. Meas. Mag. 2001, 4, 28–32.
- Horia Chiriac, Mihai Tibu, Anca-Eugenia Moga, Dumitru D. HereaConference: 2012 International Conference on Medical Physics and Biomedical Engineering Advances in Biomedical Engineering, At Qingdao Journal of Magnetism and Magnetic Materials 293 (2005) 671–676
- 3. Alves, F.; Moutoussamy, J.; Coillot, C.; Rached, L.A.; Kaviraj, B. Performances of a high sensitive trilayer F/Cu/F GMI sensor. Sens. Actuators A Phys. 2008, 145, 241–244.
- 4. Aktham Asfour, Jean-Paul Yonnet, Manel Zidi, A High Dynamic Range GMI Current Sensor Journal of Sensor Technology, 2012, 2, 165-171.
- 5. S. Gudoshnikov, N. Usov, A. Nozdrin, M. Ipatov, A. Zhukov, V. Zhukova, Highly sensitive magnetometer based on the off-diagonal GMI effect in Co-rich glass-coated microwire, Phys. Status Solidi 211 (5) (2014) 980.
- 6. L. Kraus, M. Knobel, S. N. Kane, and H. Chiriac, Influence of Joule heating on magnetostriction and giant magnetoimpedance effect in a glass covered CoFeSiB microwire, Journal of Applied Physics 85, 5435 (1999); doi: 10.1063/1.369967.
- K.R. Pirota, L. Kraus, H. Chiriac, M. Knobel, Magnetostriction and GMI in Joule-heated CoFeSiB glass-covered microwires, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 226-230 (2001) 730-732.
- 8. Zhang S, Sun J, and Xing D, Improvement of giant magneto impedance of Co-rich melt extraction wires by stress-current annealing, Rare metals, Vol. 30, No. 4, Aug 2011, p. 327, DOI: 10.1007/s12598-011-0392-4.
- 9. Shailendra Singh Khinchi, In-situ resistance measurement and Joule heating set-up for Structural transformation, International Journal of Pure and Applied Physics, ISSN 0973-1776 Volume 13, Number 1 (2017), pp. 29-33.
- A.V. Popova, V.I. Odintsov, S.A. Menshov, E.V. Kostitsyna, V.P. Tarasov, V. Zhukova, A. Zhukov, S.A. Gudoshnikov, Continuous control of a resistance in Co-rich amorphous ferromagnetic microwires during DC Joule heating, Intermetallics, 99 (2018) 39-43.
- 11. A. Zhukov, M. Ipatov, V. Zhukova, C. García, J. Gonzalez, and J. M. Blanco, Development of ultra-thin glass-coated amorphous microwires for HF magnetic sensor applications, Phys. Stat. Sol. (a) 205 (2008) 1367–1372.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ 3-Х КОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ КОЛЕЦ ГЕЛЬМГОЛЬЦА КВАДРАТНОЙ ФОРМЫ

Одинцов¹ В.И., Петров¹ В.Г., Гудошников^{1,2} С.А.

 Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН «ИЗМИРАН», Калужское шоссе д.4, г. Москва, г. Троицк, 108840, Россия
 Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия vodin@izmiran.ru

NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDIES OF MAGNETIC FIELDS OF THE SQUARE TRI-AXIAL HELMHOLTZ COILS SYSTEM

Odintsov¹ V.I., Petrov¹ V.G., Gudoshnikov^{1,2} S.A.

1Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, IZMIRAN, 142190, Troitsk, Moscow, Russia 2National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia

The paper presents analysis and validation of a square tri-axial Helmholtz coils system, used to generate highly uniform magnetic field on a specific volume. The simulation results show a homogeneous distribution of the magnetic field on an approximate area of 5 cm x 5 cm in each symmetry plane of the system, obtaining a uniform magnetic field volume around the center. These results are verified with experimental results.

В работе приводятся алгоритмы расчета и результаты теоретических и экспериментальных исследований 3-х компонентной системы Гельмгольца с кольцами квадратной формы. Такая система разработана и используется для калибровки 3-х компонентных магнитных датчиков в лаборатории ИЗМИРАН. Получены модели распределения магнитного поля в объеме колец. Параметры изготовленных колец, измеренные экспериментально, находятся в хорошем соответствии с расчетными данными.

Основным требованием к конструкциям систем колец, генерирующих магнитное поле, является обеспечение максимальной пространственной однородности поля в области центральной части колец. Наиболее часто для получения однородного магнитного поля используется система, состоящая из двух соосных колец с током круглой или квадратной формы кольца Гельмгольца. В случае круглых колец максимальная однородность магнитного поля достигается если расстояние между кольцами приблизительно равно радиусу кольца. Сравнение колец круглой и квадратной форм показывает, что квадратные кольца являются более технологичными, и, в то же время, дают близкие характеристики по объему однородного магнитного поля в их центральной части [1].

На Рис.1 показано взаимное расположение системы координат квадратных колец со сторонами 2a, 2b (a = b) и произвольной точки P(x,y,z), для которой приведены формулы расчета магнитного поля [2].



$$c1 = x + a, \ d1 = y + b, \ r1 = \sqrt{(x + a)^{2} + (y + b)^{2} + z^{2}},$$

$$c2 = x - a, \ d2 = y + b, \ r2 = \sqrt{(x - a)^{2} + (y + b)^{2} + z^{2}},$$

$$c3 = x - a, \ d3 = y - b, \ r3 = \sqrt{(x - a)^{2} + (y - b)^{2} + z^{2}},$$

$$c4 = x + a, \ d4 = y - b, \ r4 = \sqrt{(x + a)^{2} + (y - b)^{2} + z^{2}}.$$

Выражения для нескольких колец могут быть получены с использованием теоремы суперпозиции и замены z на $(z-z_i)$, определяющей положение i-ого кольца.

Оптимальную величину поля (Тесла) в центре квадратной системы колец Гельмгольца размером L = 2a (в метрах) при x=0, y=0, z=0 и расстоянии между кольцами 2d = 0.5445L можно определить по формуле:

$$B=1628.7\cdot I\cdot n/L,$$

где I – ток в A, d – расстояние от одного из колец до центра системы, n – число витков катушки.

На Рис. 2, показан общий вид изготовленной 3-х компонентной системы. Основу системы составляют три взаимно ортогональные системы колец Гельмгольца, собранные в единую конструкцию. В Таблице 1 приведены конструктивные параметры каждой из 3-х систем колец

Гельмгольца. Для каждой пары колец даны значения коэффициента преобразования тока в магнитное поле, рассчитанные для 60 витков провода в каждой паре колец *Кр* и измеренные непосредственно в центре каждой пары колец *К*.



гаолица			

Таблица 1

	Ζ	Y	X
<i>L</i> , мм	688	738	788
<i>2d</i> , мм	375	402	429
<i>К</i> , <u>н</u> Т/мА	124.9	134.2	144.4
<i>Кр</i> , <u>н</u> Т/мА	124.03	132.39	141.96

Рис. 2. Общий вид 3-х компонентной системы и конструктивные и расчетные параметры каждой из 3-х систем колец Гельмгольца.

Для расчета распределения магнитных полей в каждой точке внутри системы колец Гельмгольца с использованием формул, приведенных на Puc.1, были разработаны программы расчета на языках MATLAB и Python. Pesyльтаты моделирования распределения магнитного поля в объеме колец Гельмгольца приведены на Puc. 3, где показаны изолинии отклонений поля от установленного значения по отношению к центральной точке системы колец (в процентах). По ним можно оценить погрешность воспроизведения магнитного поля, возникающую при смещении от центра колец.

Магнитное поле колец падает при удалении от центра системы вдоль оси (h) и при удалении от центра перпендикулярно оси колец (y) – расстояния показаны в процентах от размера стороны кольца. Из Рис. 3 следует, что для достижения относительной погрешности установки поля в 10⁻⁵, что соответствует 0.5 нТл в поле величиной 50 000 нТл, датчик необходимо центрировать с погрешностью не более 3 см при размере колец 1х1 м.

Оценка значений коэффициентов преобразования *К* системы колец Гельмгольца осуществлялась с использованием специализированного блока электроники БЭ-3К, предназначенного для формирования и подачи стабильных токов в каждую из трёх пар колец подключаемой калибровочной системы Гельмгольца. Основу блока составляют цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи, плата стабилизации токов и блоки питания. При работе совместно с системой колец Гельмгольца блок обеспечивает создание однородного магнитного поля заданной величины и ориентации внутри рабочей зоны колец, компенсацию магнитного поля Земли и может использоваться, в частности, при калибровке коэффициентов преобразования датчиков магнитного поля.



Рис. 3. Изолинии погрешностей воспроизведения установленных значений поля по отношению к центральной точке системы колец (в процентах).

Литература

- 1. Restrepo, A., Franco, E., Cadavid, H. and Pinedo, C., A comparative study of the magnetic field homogeneity for circular, square and equilateral triangular Helmholtz coils, Conference Paper, (2017), DOI: 10.1109/ICEECCOT.2017.8284514
- 2. M. Misakian, Equations for the Magnetic Field Produced by One or More Rectangular Loops of Wire in the Same Plane, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 105, 557 (2000)

МАГНИТОКОНВЕКЦИЯ В ПЛОСКОМ СЛОЕ

Рани^а Х.П., Рамешвар^b Я., Старченко^с С.В.

^аФакультет математики, Национальный институт технологий, Варангай, Индия. ^bФакультет математики, Инженерный колледж, Османский университет, Хайдарабад, Индия.

^сИнститут земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН ИЗМИРАН, Калужское шоссе 4, Троицк, Москва, 108840 E-mail: rameshwar@osmania.ac.in

MAGNETOCONVECTION IN PLANE LAYER

H. P. Rani^a, Y. Rameshwar^b, S. V. Starchenko^c

^aDepartment of Mathematics, National Institute of Technology, Warangal, India. ^bDepartment of Mathematics, College of Engineering, Osmania University, Hyderabad, India. ^cPushkov Institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation (IZMIRAN), Kaluzhskoe Hwy 4, Troitsk, Moscow, 108840 Russia.

The simulations carried in a rectangular box filled with liquid gallium. The results are validated with Chandrasekhar (1961) and topologically. When the magnetically influenced rectangular box rotates about vertical axis at low rotation rates, the onset of convection is further delayed by magnetic field. The critical Rayleigh number increases linearly with magnetic field intensity. Coherent thermal oscillations are detected near the onset of convection.

1. Introduction.

The magnetoconvection dynamo, which is not the self-consistent dynamo, possibly operates in the dynamo regions of Io and Ganymedes with Jovian magnetic field immersed from outside in the metallic cores of these moons. At the onset of stationary convection, [1] studied the effect of a vertical magnetic field on the heat transfer of Rayleigh-Bénard convection for an electrically conducting fluid. From the vast literature, it can be observed that the natural dynamos are analyzed, through theory, numerical simulations, experiments and observations, which complement each other. When the ratio of the viscosity to the magnetic diffusivity, is small the magnetoconvection exhibits a great variety of flow behavior. Thus, the computational simulations / experiments using liquid metals are of great value in assessing the effects of high electrical and thermal conductivity. The magnetic fields are generated by turbulent, rotating convection in liquid metal present in Earth and other planets. In the present study an attempt is made to analyse the flow filed arising in the rotating rectangular box with liquid gallium (Pr = 0.025) under the influence of magnetic field.

2. Physical setup and mathematical modeling.

In the present study, a horizontally stratified fluid layer consisting of liquid gallium confined in a rectangular box of characteristic depth, d, is considered as shown in Fig.1. Initially the liquid gallium is assumed to be in a quiescent state i.e., velocity, V, of the fluid, V = 0 with respect to the rotating frame of reference with ambient temperature. Along with the externally applied constant vertical magnetic field, $B_0 = B_0 \hat{e}$, this system is assumed to rotate about its vertical axis, with rotation vector $\boldsymbol{\Omega} = \Omega \hat{\boldsymbol{e}}$, where $\hat{\boldsymbol{e}}$ is the unit vector along the vertical axis. The bottom wall is assumed to be kept at a higher temperature than the top wall with the temperature difference of ΔT . Hence, in the convective flow, density variations arise, and they mutually interact mainly due to buoyancy related to the gravitational vector g = $-g\hat{e}$ and induce the convective velocity. The Cartesian coordinate system is assumed such that Y-axis is vertically pointing upward (so $\hat{e} = \hat{y}$) and (X, Z)-is the horizontal plane. The top and bottom walls are assumed to be electrically and thermally perfectly conducting. The other walls are considered as insulators with horizontal periodic boundary conditions. The physical setup and the considered properties of the liquid metal are similar to those considered by Aurnou and Olson [2].



Fig. 1(a) Schematic of the physical model along with boundary conditions (b) The heat transfer rate, Nu, as a function of temperature difference, ΔT (K), across the fluid layer and Ra for a sequence of thermal convection simulations in liquid gallium.

Under the Oberbeck-Boussinesq approximation with the fluid density ρ , the considered system governed by the following non-dimensional equations [1]:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{V} = 0 \qquad \nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \tag{1-2}$$

$$\frac{1}{Pr}\left[\frac{\partial V}{\partial t} + (V,\nabla)V\right] - Q\frac{Pm}{Pr}(\boldsymbol{B},\nabla)\boldsymbol{B} = -\nabla\left(\frac{P}{Pr} + \frac{Q}{2}\frac{Pm}{Pr}|\boldsymbol{B}|^2\right) + \sqrt{Ta}(V\times\hat{\mathbf{e}}) + \nabla^2 V + RaT$$
(3)

$$\partial T/\partial t + (\mathbf{V}. \ \nabla)T = \frac{1}{Pr} \nabla^2 T$$
 (4)

$$\partial \boldsymbol{B} / \partial t = \nabla \times (\boldsymbol{V} \times \boldsymbol{B}) + \frac{1}{a} \nabla^2 \boldsymbol{B}$$
⁽⁵⁾

where spatial coordinates are non-dimensionalized with the depth of the layer, d, velocity vector, V, by κ/d , time, t, by thermal diffusion time, d^2/κ , modified pressure, P, by $\frac{\rho\kappa^2}{d^2}$, magnetic field vector, B, by $\kappa B_0/\eta$ and temperature, T, by ΔT . The notations used in the above are κ for the thermal diffusivity, ρ for the density, and η for the magnetic diffusivity. The control parameters arising in the present model are: Rayleigh number $Ra = \beta \Delta T g d^3/\kappa \nu$, β for the thermal expansion coefficient, ν for the kinematic viscosity; Taylor number $Ta = 4\Omega^2 d^4/\nu^2$ and Chandrasekhar number $Q = \mu_m B_0^2 d^2/\rho \nu \eta$, μ_m is the magnetic permeability. The other considered control parameters are the thermal Prandtl number $Pr = \nu/\kappa$ with the value 0.025 for liquid gallium, the magnetic Prandtl number $Pm = \nu/\eta$ with 1.5 × 10⁻⁶ and the Roberts number, q = Pm/Pr = 0.0006. The ANSYS Fluent was used to simulate the fluid flow inside the rectangular cavity with the aid of above mathematical model given in Eqs.(1)-(5). The geometry consists of uniform mesh of 80864 nodes. Grid independent test carried to ensure that the employed nodes produce the real physics.

3. Results and discussion

Across the gallium layer, Fig. 2 shows the *Nu* as a function of temperature difference ΔT and *Ra*. For purely conductive heat transfer (with no fluid flow) *Nu* = 1. The critical Rayleigh number for the onset of convection is $Ra_C = 1708$ and it is close to that predicted by linear stability theory [1] and by experiments [2].



Fig. 3. Isotherms with subcritical (Ra = 800, 1275) and supercritical (Ra = 2260, 3475) values along with their Nu and ΔT values

The numerical simulations corresponding to Ra = 800 and 1215 give Nu < 1 shows these flows are subcritical in "conductive mode". The present non-dimensional measures of buoyancy forcing, rotation and magnetic field, are considered as Ra =

25500, Ta = 970 and Q = 1210. The Nu, for these values is obtained as Nu = 1.12, which coincides with that of [2].



Fig. 4. Plane layer RMC with Ta = 970, Q = 1210 and Ra = 25500 (a) 3D rotating flow

The magnetic field causes a strong damping effect on flow velocities and heat transfer at low rotation rates, though at higher rotation rates the Coriolis forces become comparable to the Lorentz forces thus generating conditions conducive for the onset of the dynamo. In the present study of RMC the strong damping effect of magnetic field is clearly visible in the Fig. 4. When the fluid is in rotation, the vertical-component of the vorticity does not vanish and contributes to the horizontal components of the velocity. The resulting increase in the mean kinetic energy in the horizontal motions compensates for the reduction in it.

4. Conclusions

In the present research work, an attempt is made to reproduce the theoretical and experimental observations of [1], in thermal rotating magnetoconvection in the 3D rectangular cavity. In RBC it is observed that when Ra < 1708 we get Nu < 1, i.e., the existence of the subcritical flow. This result implies that heat can propagate in the system due to a "conductive mode". When Ra > 1708 symmetric rolls perpendicular to vertical axis are observed. Simulations show the oscillatory nature of thermal convection with the formation of thin Hartmann layers close to boundaries due to strong damping effect of the magnetic field on flow velocities and heat transfer.

References:

- 1. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. Oxford University Press. 1961.
- Aurnou J. M., Olson P. L. Experiments on Rayleigh-Bénard convection, magnetoconvection and rotating magnetoconvection in liquid gallium // J. Fluid Mech. V. 430. P. 283-307. 2001.
- 3. Rameshwar Y., Rawoof Sayeed M.A., Rani H. P., Laroze D. Finite amplitude cellular convection under the influence of a vertical magnetic field // International Journal of Heat and Mass Transfer. 114. P. 559-577. 2017.

ИСТОРИЯ И НОВЫЕ ЦЕЛИ АБСОЛЮТНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В АРКТИКЕ

Семаков^{1,2} Н.Н., Ковалев¹ А.А., Павлов^{1,2} А.Ф., Федотова¹ О.И.

¹ИНГГ СО РАН, г.Новосибирск, Россия ²НГУ , г.Новосибирск, Россия SemakovNN@ipgg.sbras.ru

HISTORY AND NEW OBJECTIVES OF ABSOLUTE GEOMAGNETIC OBSERVATIONS IN THE ARCTIC

Semakov^{1,2} N.N., Kovalev¹ A.A., Pavlov^{1,2} A.F., Fedotova¹ O.I. ¹IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russia ²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

The current situation with absolute geomagnetic measurements in the Arctic requires significant improvement. The termination of systematic work on the Russian «repeat stations» and the closure of a number of magnetic observatories reduces the quality of world magnetic models and the prediction of the motion of the Earth's true magnetic poles. It is necessary to strengthen the cooperation of Russian magnetologists, both within Russia and internationally.

История геомагнитных наблюдений в Арктике насчитывает не одно столетие. Каталог, изданный в 1929 году в Ленинграде под редакцией сибирского магнитолога Вейнберга [1] включает измерения магнитного склонения, произведенные в высоких широтах в 1556 года. Такие наблюдения производились не только во льдах, но и на суше (в устье Печоры, в Холмогорах, на Новой Земле). Но наиболее ценный вклад в изучение пространственной морфологии магнитного поля Арктики вносили специально организованные площадные и маршрутные магнитные съемки. Это было особенно важно для восточного сектора Арктики, плохо обеспеченного не только магнитными обсерваториями, но и пунктами векового хода (ПВХ). Последняя систематическая работа на ПВХ Сибири проводилась в 1984 -1985 годы. Результаты магнитных измерений отражались в отчетах и регулярно издаваемых ИЗМИРАН каталогах [2,3]. Существенную часть этой работы, в том числе на арктическом побережье и островах, выполняли сотрудники магнитной обсерватории «Новосибирск».

Сеть пунктов векового хода ("repeat stations") в западной Арктике не только сохранилась, но и развивается. Отчасти это было связано с наблюдением за перемещением истинного северного магнитного полюса в канадском секторе Арктики и проведением периодически организуемых работ по определению его координат [4,5]. Поиски истинного северного магнитного полюса осложняются тем, что область его предполагаемого нахождения существенно вытянута вдоль дуги большого круга, соединяющего Канадскую и Сибирскую мировые магнитные аномалии [6]. По мере своего перемещения к берегам Сибири истинный магнитный полюс привлекает все больший интерес [7]. Влечение к различным полюсам присуще людям путешествующим, а полярным исследователям в особенности. Южный магнитный полюс (точку с магнитным наклонением, максимально близким к -90 градусам) «открыли» 16 января 1909 года во льдах Антарктиды трое участников экспедиции Шеклтона: Дэвид, Моусон и Маккей. Координаты южного магнитного полюса на эту дату составили 72 градуса 25 минут южной широты и 155 градусов 16 минут восточной долготы [8].



Рис. 1. Движение южного магнитного полюса (ЮМП) и южного геомагнитного полюса (ЮГМП) с 1900 года. Зеленый квадрат в центре рисунка – прогнозное положение ЮГМП на 2030 год. Оранжевый круг – прогнозное положение ЮМП в 2030 году.

На Рис. 1 видно, что за прошедшее с тех пор столетие этот полюс сместился на 8 градусов ближе к экватору. В перемещении северного истинного магнитного полюса наблюдается другое стремление: он пока еще приближается к географическому полюсу. При этом на Рис. 2 можно отметить сходство в направлениях перемещений истинного и геомагнитного, то есть «среднего» для всей Земли магнитного полюса (полюсов единого на данную эпоху центрального диполя). Но на Рис. 1 такое сходство не прослеживается: южный геомагнитный, в отличии от южного магнитного полюса, движется не к экватору, а к южному географическому полюсу.



Рис. 2. В нижней его части - пункты магнитных измерений во время дрейфа Нансена на «Фраме» (зеленые кружки в котловине Нансена) и Амудсена на судне «Мод» (серые кружки в Восточно – Сибирском море). В центральной части рисунка – положение соответствующих расчетных магнитных полюсов. В верхней части рисунка – положение северного геомагнитного полюса (короткая красная кривая) и северного магнитного полюса (желтые кружки) с 1900 до 2030 года.

Положение северных магнитных полюсов в прошлые эпохи можно вычислить по значениям склонения и наклонения, измеренных в различных точках Арктики. Это так называемые «виртуальные» (т.е. «фактические», «расчетные» или «предполагаемые») магнитные полюсы. Истинными они становятся только в том случае, когда координаты магнитного полюса совпадают с координатами точки наблюдения. И чем ближе точка наблюдения находится к району «блужданий» истинного магнитного полюса, тем более точные сведения о его положении и движении можно получить. Поэтому магнитные измерения являлись важной частью многих арктических экспедиций.

На нижней части Рис. 2 показаны те точки дрейфа судов «Фрам» и «Мод», в которых были проведены магнитные измерения. Экспедиция Нансена в 1893-1895 году совершила в высоких широтах дрейф на запад более чем на 100 градусов долготы. А тридцатью годами позже, в 1922-

1924 году, в более низких широтах дрейфовал на судне «Мод» Амудсен. За эти годы судно переместилось по долготе на 50 градусов: от Берингова пролива до Новосибирских островов. В центральной части Рис. 2 показано положение магнитных полюсов, вычисленных для всех точек дрейфа обоих судов. Координаты этих точек, а также измеренные в них значения магнитного склонения и наклонения взяты из каталога Вейнберга [1].

При сопоставлении траекторий дрейфа с соответствующими «траекториями» расчетных магнитных полюсов между ними прослеживаются вполне определенные зависимости. В среднем на эпоху 1923 года можно отметить, что при перемещении судна «Мод» к острову Котельному с востока расчетный магнитный полюс «приближался» к этому же острову с севера (вдоль хребта Ломоносова). А при перемещении «Фрама» параллельно хребту Гаккеля соответствующие магнитные полюсы эпохи 1894 года постепенно «удалялись» от траектории дрейфа судна. Это является наглядным проявлением существенной недипольности магнитного поля Арктики и его пространственной неоднородности.

К сожалению, в центральной части Арктики не так много случаев, когда магнитные наблюдения проводились в одних и тех же точках в разное время. А такие наблюдения дают наиболее ценную информацию о вековом ходе магнитного поля и о том движении магнитных полюсов, которое связано с глубинными процессами. Среднегодовые значения элементов земного магнетизма, получаемые в магнитных обсерваториях, дают наиболее достоверную информацию о различных вариациях (от секундных до годовых). Но существующая в настоящее время «сеть» магнитных обсерваторий не очень подходит для «ловли» истинного магнитного полюса. Ей в помощь нужно организовывать дополнительные пункты повторных геомагнитных наблюдений в Арктике.

Литература

- 1. Вейнберг Б.П. Каталог магнитных определений в СССР и сопредельных странах с 1556 по 1926 год // Часть 1, Ленинград, 1929.
- 2. Головков В.П., Коломийцева Г.И., Конященко Л.П., Семенова Г.М. Каталог среднегодовых значений элементов геомагнитного поля мировой сети магнитных обсерваторий // Вып.16, 343 р. Москва, 1983.
- 3. Каталог пунктов векового хода // ИЗМИРАН, Москва, 1966.
- 4. Newitt L.R. Magnetic repeat station field manual // Geophysics Division Geological Survey of Canada, Ottawa, 1986.
- 5. Newitt L.R., Niblett E.R. Relocation of the north magnetic dip pole //Can. J. Earth Sci. V.23. P. 1062-1067. 1986.
- 6. Физика Земли (новый взгляд на некоторые проблемы) // 128 с. «Наука», Новосибирск, 1989.
- 7. Семаков Н.Н., Ковалев А.А., Павлов А.Ф., Федотова О.И. Куда бежит магнитный полюс? // Наука из первых рук, №2, Р. 96 107, 2016.
- 8. Шеклтон Э.Г. В сердце Антарктики // М.: Paulsen, 528 с., 2016.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ГЛУБИН ЗАЛЕГАНИЯ МАГНИТНЫХ ИСТОЧНИКОВ В АРКТИКЕ И ИХ СВЯЗЬ С ПАРАМЕТРАМИ ЛИТОСФЕРЫ

Середкина^{1,2} А.И., Филиппов² С.В.

⁻¹ИЗК СО РАН, г. Иркутск, Россия ²ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия ale@crust.irk.ru

PRELIMINARY ESTIMATES OF THE MAGNETIC SOURCE DEPTHS IN THE ARCTIC AND THEIR RELATHION TO LITHODPHERIC PARAMETERS

Seredkina^{1,2} A.I., Filippov² S.V.

¹IEC SB RAS, Irkutsk, Russia ²IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The depths to the bottom of the lithospheric magnetic sources are calculated from the WDMAM 2.0 data using the centroid method for ten different regions in the Arctic. The obtained values are compared with the magnetic intensity anomalies at 350 km attitude mapped according to the MF6 lithospheric geomagnetic field model, thicknesses of the crust and the lithosphere and average lithospheric temperatures. The obtained relations between considered parameters are discussed.

Целью работы ланной является установление возможных взаимосвязей между глубиной нижней границы магнитоактивного слоя (MAC) литосферы Арктики, длинноволновыми аномалиями литосферного геомагнитного поля, мощностью земной коры и литосферы, а также ее термическим режимом. Для решения поставленной задачи параметры МАС были рассчитаны методом [1] для 10 различных тектонических провинций, включая стабильные щиты и платформы, складчатые области, шельфы окраинных морей и океанический бассейн (Рисунок). В качестве исходных данных использовалась глобальная модель литосферного магнитного поля Земли WDMAM 2.0 [2]. Азимутально-усредненные Фурье-спектры мощности аномалий геомагнитного поля вычислялись с помощью пакета Fourpot 1.3b [3] в окне 200 х 200 км с координатами центральных точек, приведенными на Рисунке. Погрешность вычисления параметров МАС оценивались согласно [4], ее среднее значение составило ~1.5 км.

В результате проведенных расчетов было получено, что глубина нижней границы МАС изменяется от 23–27 км под складчатыми поясами Аляски и Чукотки до ~38 км под северной Гренландией (Рисунок). Для окраинных морей, существенно различающихся по своему глубинному



строению, степени тектонической и сейсмической активности, эта граница варьирует в узком диапазоне 35–37 км.

Рис. 1. Зависимости глубины нижней границы МАС от различных параметров литосферы Арктики: (а) – модуля полного вектора литосферного геомагнитного поля на высоте 350 км (Та) согласно модели МF6 [5]; (б) – мощности литосферы [6]; (в) – средней температуры литосферы [7]; (г) – мощности земной коры [6]. Сплошными линиями показаны линейные зависимости между рассматриваемыми параметрами, рассчитанные методом наименьших квадратов. Пунктиром обозначена глубина нижней границы МАС, совпадающая с Мохо.

Полученные результаты были сопоставлены co следующими параметрами литосферы исследуемой территории: длинноволновыми аномалиями литосферного геомагнитного поля, мощностью земной коры и литосферы, распределением температуры в верхней мантии. Значения модуля полного вектора литосферного геомагнитного поля на высоте 350 км задавались согласно модели MF6, построенной по данным спутника СНАМР [5]. Данная модель представляет литосферное магнитное поле гармониками степени, сферическими ДО 120 что соответствует пространственному разрешению на поверхности Земли равному 333 км. Мощность земной коры и литосферы оценивалась по 3D распределению скоростей S-волн в коре и верхней мантии, рассчитанному методом поверхностно-волновой томографии [6]. Средние значения температуры в диапазоне глубин 80–150 км были получены с помощью петрофизического моделирования в работе [7].

В результате было установлено, что глубина нижней границы МАС прямо пропорциональна значениям модуля полного вектора литосферного магнитного поля и мощности литосферы и обратно пропорциональна средней температуре верхней мантии. Для складчатых поясов Чукотки и Аляски существенные отклонения от выявленного линейного соотношения (Рисунок а), вероятно, являются следствием того, что наблюденные длинноволновые аномалии геомагнитного поля обусловлены не только вариациями мощности МАС, но и изменением его вещественного состава [8]. Наиболее ярко выраженная зависимость была получена для глубины нижней границы магнитных источников и мощности литосферы (Рисунок б), что также подтверждается результатами наших исследований в Прибайкалье [9]. При этом для Евразийского бассейна завышенное по сравнению с ожидаемым значение глубины нижней границы МАС может быть объяснено погрешностями модели WDMAM 2.0 в высоких северных широтах [2]. С учетом того, что возраст океанического дна рассматриваемой части бассейна составляет 54-57 млн. лет [10], согласно корреляционному соотношению из [11], глубина нижней границы МАС должна составлять ~26 км. Следует отметить, что выбранное для анализа температурное распределение [7] может рассматриваться лишь в качестве грубого приближения из-за многочисленных довольно допущений. принятых при его расчете, что в итоге могло послужить причиной сильного разброса значений глубин (Рисунок в).

Глубина нижней границы МАС явным образом не зависит от мощности земной коры (Рисунок г). Интересным результатом в полученном распределении является ненулевая намагниченность верхней мантии под Евразийским бассейном, морем Лаптевых и Восточно-Сибирского морем. Во всех случаях разница между исследуемыми параметрами существенно превышает погрешности их определения. Для рассматриваемой части Евразийского бассейна с учетом ее возраста, несмотря на возможное завышение значения глубины нижней границы МАС, обсуждаемое ранее, полученный результат хорошо согласуется с современными представлениями о магнитных свойствах верхней мантии [12]. В случае с морем Лаптевых независимым подтверждением полученного результата являются последние данные о глубинах очагов землетрясений, достигающих 38 км [13].

Работа выполнена при частичной поддержке РНФ, грант 17-77-10037.

Литература

- Tanaka A., Okubo Y., Matsubayashi O. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia // Tectonophysics. V. 306. P. 461– 470. 1999.
- Lesur V., Hamoudi M., Choi Y., Dyment J., Thébault, E. Building the second version of the World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM) // Earth Planets Space. V. 68. N 1. P.1–13. 2016.
- 3. Pirttijärvi M. 2D Fourier domain operations, FOURPOT program. https://wiki.oulu.fi/x/0oU7AQ/. 2015.
- 4. Okubo Y., Matsunaga T. Curie point depth in northeast Japan and its correlation with regional thermal structure and seismicity // J. Geophys. Res. V. 99. N B11. P. 22363–22371. 1994.
- Maus S., Yin F., Lühr H., Manoj C., Rother M., Rauberg J., Michaelis I., Stolle C., Müller R. D. Resolution of direction of oceanic magnetic lineations by the sixth-generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite magnetic measurements // Geochem. Geophys. Geosyst. 9. Q07021. 2008.
- 6. Seredkina A. S-wave velocity structure of the upper mantle beneath the Arctic region from Rayleigh wave dispersion data // Phys. Earth Planet. Inter. 2019. (In Press, Accepted Manuscript.) https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.03.007.
- Lebedev S., Schaeffer A.J., Fullea J., Pease V., Seismic tomography of the Arctic region: inferences for the thermal structure and evolution of the lithosphere/ Circum-Arctic lithosphere evolution / London, UK: Geological Society, Special Publications, V. 460. P. 419–440. 2017.
- 8. Trifonova P., Zhelev Zh., Petrova T., Bojadgieva K. Curie point depths of Bulgarian territory inferred from geomagnetic observations and its correlation with regional thermal structure and seismicity // Tectonophysics. V. 473. P. 362–374. 2009.
- 9. Середкина А.И., Филиппов С.В. Параметры магнитоактивного слоя литосферы для профиля Сибирская платформа Забайкалье по данным модели WDMAM 2.0 // Геомагнетизм и Аэрономия. 2019. (отправлено в редакцию)
- 10. Ogg J.G. Geomagnetic polarity timescale / The geologic time scale/ Amsterdam, Netherlands: Elsevier. P. 85–113. 2012.
- 11. Li C.-F., Lu Y., Wang J. A global reference model of Curie-point depths based on EMAG2 // Sci. Rep.V. 7. 45129. 2017.
- 12. Ferré, E.C., Friedman S.A., Martín-Hernández F., Feinberg J.M., Till J.L., Ionov D.A., Conder J.A. Eight good reasons why the uppermost mantle could be magnetic // Tectonophysics. V. 624–625. P. 3–14. 2014.
- 13. Seredkina A.I., Melnikova V.I. New data on earthquake focal mechanisms in the Laptev Sea region of the Arctic-Asian seismic belt // J. Seismol. V. 22. № 5. P. 1–14. 2018.

ПАРАМЕТРЫ МАГНИТОАКТИВНОГО СЛОЯ ЛИТОСФЕРЫ ПРИБАЙКАЛЬЯ ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ WDMAM

Середкина^{1,2} А.И., Филиппов² С.В.

⁻¹ИЗК СО РАН, г.Иркутск, Россия ²ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия <u>ale@crust.irk.ru</u>

PARAMETERS OF THE LITHOSPHERIC MAGNETIC LAYER OF THE BAIKAL REGION FROM THE DATA OF THE GLOBAL WDMAM MODEL

Seredkina^{1,2} A.I., Filippov² S.V.

¹IEC SB RAS, Irkutsk, Russia ²IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

We study the parameters of the lithospheric magnetic layer (the depths to the top and bottom of the layer and its centroid depth) along the profile with the endpoints at 60° N, 113° E and 50° N, 113° E using the high-resolution global lithospheric field model WDMAM version 2.0. Azimuthally averaged Fourier spectra of magnetic anomalies are calculated and the study parameters are estimated from the slopes of the obtained spectra. The average depth to the top of the magnetic layer is about 2.0 km along the whole profile, while the centroid and the basal depth of the magnetic sources reduce southward from 16.6 and 37.4 km to 13.6 and 25.0 km, respectively. Comparison of the estimated values with available information on the crust and uppermost mantle structure of the study region allows us to determine the correlations between different lithospheric parameters and confirm the 'passive' hypothesis of the Baikal rift formation.

Одним из геофизических полей, широко используемых для изучения глубинного строения Земли и построения геофизически обоснованных моделей эволюции ее литосферы, является аномальное или литосферное геомагнитное поле. Так называют ту часть геомагнитного поля, источники которого расположены в коре и верхней мантии до глубин, где температура достигает температуры точки Кюри. С увеличением глубины и температуры ферромагнитные горные породы переходят в парамагнитное состояние [1].

В последние десятилетия был накоплен большой объем данных разновысотных геомагнитных съемок и созданы достаточно подробные глобальные модели литосферного магнитного поля [2, 3]. В свою очередь разработка новых методов их обработки и интерпретации [4–7], позволила провести определение параметров магнитоактивного слоя (MAC) – его верхней границы, центра масс и мощности – как для отдельных регионов [8–10], так и для всей Земли в целом [7, 11]. Однако следует отметить, что на территории Сибири подобные исследования в региональном масштабе

ранее не проводились. Таким образом, задачей данной работы является определение параметров МАС для меридионального профиля, начинающегося на Сибирской платформе (60° N, 113° E), пересекающего северо-восточный фланг высокоактивного в сейсмическом отношении Байкальского рифта и заканчивающегося в Забайкалье (50° N, 113° E).

В качестве исходного материала для исследования использовалась глобальная модель литосферного магнитного поля Земли WDMAM версии 2.0 [2]. Распределение аномалий геомагнитного поля в модели WDMAM приведено для высоты 5 км над уровнем моря и имеет горизонтальное разрешение 3 угловые минуты. Модель включает в себя данные морских, аэромагнитных, наземных и спутниковых геомагнитных съемок.

В настоящее время существует несколько различных подходов для MAC спектральным параметров по характеристикам оценки геомагнитного поля как с учетом случайного [4-6], так и фрактального распределения намагниченности [4, 7, 8]. В данной работе расчеты предположении проводились случайного распределения В намагниченности в МАС методом [6]. Азимутально-усредненный Фурьеспектр мощности аномалий геомагнитного поля вычислялся с помощью пакета Fourpot 1.3b [12] в окне 2° х 2° с центральной точкой, лежащей на выбранном для анализа профиле. Для улучшения горизонтального разрешения результатов окно сдвигалось вдоль профиля на 50% от своего размера, т. е. на 1°. Погрешности вычисления параметров МАС оценивались согласно [9, 10]

В результате проведенных расчетов было получено, что глубина верхней границы МАС (Zt) вдоль выбранного профиля меняется мало и в среднем составляет около 2.0 км, при средней погрешности определения данного параметра равной 0.5 км. Глубина центра масс MAC (Z₀) для территории варьирует от 13.6 рассматриваемой ДО 19.6 KМ, С погрешностями в диапазоне 0.95-1.61 км (рисунок). Наибольший интерес представляет глубина нижней границы МАС (Z_b), изменяющаяся от 37.4 км под Сибирской платформой до 25.0 км в Забайкалье. Под исследуемой частью северо-восточного фланга Байкальского рифта Z_b составляет около 35.0 км, т. е. принимает средние по сравнению с окружающими областями значения. Полученные оценки глубин Z₀ и Z_b, как и следовало ожидать, демонстрируют те же общие тенденции (уменьшение глубины центроида и нижней границы в южном направлении), что и глобальные модели [7, 11], но при этом характеризуются лучшим горизонтальным разрешением.


Рисунок. Параметры МАС для рассматриваемого профиля (Z₀ – глубина центроида, Z_t и Z_b – глубины верхней и нижней границ, соответственно). Мощность земной коры приведена по [13], распределение гипоцентров землетрясений – согласно [14]. М_w – моментная магнитуда землетрясения.

Полученные результаты были сопоставлены с другими известными параметрами литосферы исследуемой территории (мощностью земной коры и литосферы [13], распределением температуры в верхней мантии [15]) и глубинами гипоцентров землетрясений [14]. В результате было установлено, что МАС вдоль всего профиля расположен в пределах земной коры, а для Северо-Муйского района Байкальского рифта его мощность приблизительно совпадает с мощностью сейсмоактивного слоя (рисунок). Утонение МАС в южном направлении сопровождается увеличением температур в подкоровом слое мантии с 600 до 800° С [15] и уменьшением мощности литосферы с 200 до 80 км [13]. Таким образом, мощность МАС прямо пропорциональна толщине литосферы и обратно пропорциональна температуре верхней мантии. Полученные данные свидетельствуют в пользу гипотез пассивного образования Байкальского рифта [16, 17] и представляют интерес для дальнейших работ по геолого-геофизическому изучению данного региона, в частности, для определения теплового потока и построения обоснованных моделей эволюции его литосферы.

Литература

- 1. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Ленинградский университет. 592 с. 1978.
- Lesur V., Hamoudi M., Choi Y., Dyment J., Thébault, E. Building the second version of the World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM) // Earth Planets Space. V. 68. N 1. P.1–13. 2016.
- Maus, S., Barckhausen U., Berkenbosch H. et al. EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic measurements // Geochem. Geophys. Geosyst. V. 10. Q08005. doi:10.1029/2009GC002471.2009.

- 4. Spector A., Grant S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data // Geophysics. V. 35. P. 293–302. 1970.
- Ravat D., Pignatelli A., Nicolosi I., Chiappini M. A study of spectral methods of estimating the depth to the bottom of magnetic sources from near-surface magnetic anomaly data // Geophys. J. Int. V. 169. P. 421–434. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03305.x. 2007.
- Tanaka A., Okubo Y., Matsubayashi O. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia // Tectonophysics. V. 306. P. 461– 470. 1999.
- 7. Li C.-F., Lu Y., Wang J. A global reference model of Curie-point depths based on EMAG2 // Sci. Rep.V. 7. 45129. doi:10.1038/srep45129. 2017.
- Bansal A.R., Anand S.P., Rajaram M., Rao V.K., Dimri V.P. Depth to the bottom of magnetic sources (DBMS) from aeromagnetic data of Central India using modified centroid method for fractal distribution of sources // Tectonophysics. V. 603. P. 155–161. http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.024. 2013.
- 9. Okubo Y., Matsunaga T. Curie point depth in northeast Japan and its correlation with regional thermal structure and seismicity // J. Geophys. Res. V. 99. N B11. P. 22363–22371. 1994.
- Salazar J. M., Vargas C.A., Leon H. Curie point depth in the SW Caribbean using the radially averaged spectra of magnetic anomalies // Tectonophysics. V. 694. P. 400–413. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.023. 2017.
- Tanaka A. Global centroid distribution of magnetized layer from World Digital Magnetic Anomaly Map // Tectonics. V. 36. P. 3248–3253. https://doi.org/10.1002/2017TC004770. 2017.
- 12. Pirttijärvi M. 2D Fourier domain operations, FOURPOT program. https://wiki.oulu.fi/x/0oU7AQ/. 2015.
- Seredkina A., Kozhevnikov V., Melnikova V., Solovey O. Seismicity and S-wave velocity structure of the crust and the upper mantle in the Baikal rift and adjacent regions // Phys. Earth Planet. Inter. V. 261. P. 152–160. http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2016.10.011. 2016.
- Seredkina A., Melnikova V. Seismotectonic crustal strains of the Mongol-Baikal seismic belt from seismological data / Moment Tensor Solutions – A useful tools for seismotectonics / Dordrecht, Netherlands: Springer Nature. P. 497–517. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9_22. 2018.
- 15. Artemieva I.M. Global 1° × 1° thermal model TC1 for the continental lithosphere: Implications for lithosphere secular evolution // Tectonophysics. V. 416. P. 245–277. doi:10.1016/j.tecto.2005.11.022. 2006.
- Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision // Science. V. 189. P. 419–426. http://dx.doi.org/10.1126/science.189.4201.419. 1975.
- 17. Кожевников В.М., Середкина А.И., Соловей О.А. Дисперсия групповых скоростей волн Рэлея и трехмерная модель строения мантии Центральной Азии // Геология и Геофизика. Т. 55. № 10. С. 1564–1575. 2014.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ДОЛГОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ "ПУЗЫРЕЙ" С ВЫСОТОЙ

Сидорова Л.Н., Филиппов С.В. ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия Isid@izmiran.ru

LONGITUDINAL DISTRIBUTION OF THE EQUATORIAL PLASMA BUBBLES: VARIABILITY WITH RESPECT TO ALTITUDE

Sidorova L.N., Filippov S. V.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The data from ISS-b, AE-E, ROCSAT-1 and Hinotori spacecrafts were used to study the influence of the zonal plasma drift and magnetic declination on the EPB longitudinal distributions in the different altitude regions. It was revealed that the plasma drift dominates in the altitude region of ~300-700 km. The longitudinal orientation of the EPBs above ~1000 km altitude and 20° DIPLAT exactly follows the behavior of the magnetic declination.

Экваториальные плазменные "пузыри" (ЕРВ), формирующиеся на при подъеме на большие высоты высотах основании *F*-области, испытывают влияние зонального плазменного дрейфа. Под влиянием дрейфа они перемещаются вдоль долготы на восток. Известно, что степень долготного сдвига ЕРВ зависит от высоты их подъема или длины магнитной силовой трубки, вдоль которой они вытянуты в момент регистрации. Чем меньше высота подъема ЕРВ, тем сильнее плазменный "пузырь" может сдвигаться вдоль долготы. В этом смысле говорят о дифференциальном влиянии зонального плазменного дрейфа, т.е. о влиянии, меняющемся в зависимости от высоты [1]. С другой стороны, ЕРВ, "растянутый" вдоль магнитной силовой трубки, повторяет ее пространственный ход. Например, изменение магнитного склонения силовой трубки будет отражаться на изменении долготной ориентации ЕРВ. Это означает, что в регионах с восточным магнитным склонением экваториальные плазменные "пузыри" будут испытывать СДВИГ В восточном направлении, а в регионах с западным магнитным склонением – в западном направлении. Иными словами, два этих фактора на одних высотах и в одних широтно-долготных регионах могут дополнять друг друга, усиливая эффект долготного сдвига ЕРВ на восток, а в других условиях, наоборот, конкурировать друг с другом.

Для исследования степени влияния зонального плазменного дрейфа и магнитного склонения на долготные распределения EPB, регистрируемые в разных высотных регионах, были использованы данные спутников ISS-b, AE-E, ROCSAT-1 и Hinotori. Эти спутники летали в годы высокой

солнечной активности, а их орбиты покрывали высоты от ~300 км до 1220 км. Параметры спутников, ссылки на долготные распределения плазменных неоднородностей и ЕРВ, полученные разными авторами по данным указанных спутников [2-6] приведены в таблице 1. Рассмотрены данные весеннего сезона (таблица 2).

Нами по данным спутника ISS-b [5] для широтного интервала $0-50^{\circ}$ DIPLAT (северное полушарие) было получено долготное распределение EPB (P_{EPB}) (рис.1*a*), которое в дальнейшем мы использовали для сравнительного анализа.

Таблица 1.

Публикация	Спутник,	LT-	Высоты,	Широты	Годы	<i>F</i> 10.7
	параметр	интервал	КМ			
Наше	ISS-b	20-04	~972-	0–50°	1978–	150-220
исследование	P_{EPB}		1220	DIPLAT	80	
Maruyama and	ISS-b,	18-06	~972-	±20°	1978–	150-220
Matuura, 1980	P_{RSF}		1220	DIPLAT	80	
McClure et al.,	AE-E	19–06	~300-	±20°	1978–	150-220
1998	$P_{\sigma > 0.5\%}$		475	DIPLAT	80	
Watanabe and	Hinotori	19-06	~650	±20°	1981	~200
Oya, 1986	P_{B650}			DIPLAT		
Kil et al., 2015	ROCSAT-1,	18-00	~600	±6°	2000-	160-190
	$P_{\sigma > 0.1\%}$			DIPLAT	02	

Материалы сравнительного анализа.

Таблица 2.

Сезонные интервалы наблюдений.

СЕЗОН	Наше	Maruyama	McClure	Watanabe	Kil et al.,
	исследова-	and Matuura,	et al.,	and Oya,	2015 [2]
BECHA	февраль- 13 мая	1980 [5] 9 февраля— 13 июня	1998 [4] февраль– апрель	1980 [0] февраль– апрель	март– апрель

Следует указать, что согласно [1] на высотах более ~1000 км влияние зонального дрейфа становится не столь значительным. Получается, что EPB, выявленные по данным ISS-b на высотах, превышающих ~1000 км, и на широтах более 20° DIPLAT, просто «отрабатывают» ход склонения силовой трубки, а не «чувствуют» влияния зонального дрейфа. Действительно, максимумы С и D максимально «разбегаются» друг от друга (рис. 1*a*), поскольку их силовые трубки оказываются в регионах с разными знаками магнитного склонения, т.е. с западным склонением для максимума C и восточным склонением для максимума D. На рис. 1(*б*, *в*) этот «разбег» лишь только намечается, однако отчетливо проявляется на рис. 1*а*. Это «разбегание» максимумов также хорошо видно и по графику P_{RSF} (Range Spread F, RSF), полученному также по данным спутника ISS-b [3]. Напомним, что параметр RSF – это «*F*-рассеяние радиосигнала по высоте», т.е. рассеяние на мелкомасштабных неоднородностях (до ~1 км), которые окружают ЕРВ и являются его индикатором.

С другой стороны, известно, что на высотах ~300-700 км влияние зонального плазменного дрейфа наиболее значительно. Казалось бы, ЕРВ и экваториальные плазменные неоднородности этих высот должны быть максимально смещены в восточном направлении. Действительно, как следует из рис. $1(\delta, s)$, максимум С явно смещен на восток. Однако другие максимумы (A, B, D) не столько смещены, а скорее «размыты» (менее выражены) либо почти слились друг с другом (максимумы С и D, рис. 1s).



Рис. 1. (*a*) Долготные распределения P_{EPB} и P_{RSF} (данные спутника ISS-b) показаны красной и розовой кривыми, соответственно. (б) Долготные распределения $P_{\sigma>0.1\%}$ (данные спутника ROCSAT-1) и P_{B650} (данные спутника Hinotori) показаны синей и зеленой кривыми. (*в*) Долготное распределение $P_{\sigma>0.5\%}$ (данные спутника AE-E) показано фиолетовой кривой.

Необходимо напомнить, что техника измерений, проводимых на спутниках Hinotori и ROCSAT-1, и последующая обработка сигналов, позволяла выявлять экваториальные неоднородности, в том числе и EPB, довольно малых размеров. Например, на спутнике ROCSAT-1 [2] могли выявляться неоднородности размером от ~7 км. Последнее, как известно, приводит к уширению пиков, но не влияет на долготный сдвиг. Что касается данных спутника AE-E (рис. 1*a*), то по ним определялись неоднородности более крупные (от ~50 км) [4]. Однако картина распределения EPB по-прежнему оставалась «размытой». Почему?

«Размытость» максимумов может быть объяснена изменчивостью скорости дрейфа ото дня ко дню. Напомним, что скорости зонального дрейфа на высотах АЕ-Е (~300–475 км) способны достигать таких значений как ~200 м/с, однако характеризуются крайней изменчивостью. Это отражается на вариативности долготного положения ЕРВ на этих высотах, что приводит к уширению максимумов распределений ЕРВ, их «размытости» либо слиянию.

Итак, на основе проведенного анализа следует заключить, что зональный плазменный дрейф доминирует на высотах (~300-700 км) и приводит к относительному сдвигу картины долготного распределения ЕРВ в восточном направлении. При этом вариативность скорости зонального плазменного дрейфа приводит к некоторой «размытости» максимумов. Что касается долготной ориентации ЕРВ, регистрируемых на высотах выше ~1000 км и широтах больших, чем 20° DIPLAT, то она в точности следует поведению магнитного склонения силовых трубок, «не чувствуя» влияния зонального плазменного дрейфа.

Литература

- Kil H., Heelis R.A., Paxton L.J. et al. Formation of a plasma depletion shell in the equatorial ionosphere // J. Geophys. Res. V. 114. A11302. doi: <u>10.1029/2009JA014369</u>. 2009.
- Kil H., Kwak Y.-S., Lee W.K. et al. Nonmigrating tidal signature in the distributions of equatorial plasma bubbles and prereversal enhancement // J. Geophys. Res. V. 120. N 4. P. 3254–3262. doi:10.1002/2014JA020908. 2015.
- 3. Maruyama T., Matuura N. Global distribution of occurrence probability of spread echoes based on ISS-b observation // RRL. V. 27. N 124. P. 201-216. 1980.
- McClure J.P., Singh S., Bamgboye D.K. et al. Occurrence of equatorial F region irregularities: Evidence for tropospheric seeding // J. Geophys. Res. V. 103. N A12. P. 29,119-29,135. 1998.
- RRL. Summary Plots of Ionospheric Parameters obtained from Ionosphere Sounding Satellite-b. Tokyo: Radio Research Laboratories Ministry of Posts and Telecommunications. V. 1–4. 1983, 1985.
- Watanabe S., Oya H. Occurrence characteristics of low latitude ionospheric irregularities observed by impedance probe on board the Hinotori satellite // J. Geomagn. Geoelectr. V. 38. P. 125-131. 1986.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯ УСКОРЕНИЙ ГЛАВНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Симонян А.О., Оганян М.В., Мецоян Т.А.

ИГИС НАН РА, г.Гюмри, Армения anahit.iges@gmail.com

IMPROVED SPATIO-TEMPORAL MODEL OF THE MAIN GEOMAGNETIC FIELD SECULAR ACCELERATIONS

Simonyan A.H., Ohanyan M.V., Metsoyan T.A.

IGES NAS RA, Gyumri, Armenia

The series of geomagnetic field strength components annual mean values provided by the 189 permanently operating worldwide observatories have been analysed according to the notion on the piecewise constant feature of the geomagnetic secular accelerations field. In result, more accurate central epochs of steady state geomagnetic regime (SSGR) were revealed. Improved spatial spherical harmonic global models of geomagnetic secular accelerations field have been gained, which were timed to these epochs and cover over the century period since the beginning of the 20^{th} up to past period of 21^{st} .

Выделение из спектра высоких частот сигналов главного магнитного поля Земли и построение усовершенствованных моделей поля геомагнитных вариаций, основанных на учете быстротечных вариаций внутриземного происхождения, является важной задачей фундаментальной науки, изучающей особенности гидродинамических процессов, протекающих во внешней жидкой части ядра Земли и ответственных за генерацию ее собственного магнитного поля. Оно важно и для развития прикладной науки, относящейся к задачам изучения строения и состава верхних слоев Земли, а также динамических процессов, происходящих в земной коре и литосфере, отражающихся в сериях геомагнитных наблюдений из-за намагниченности пород, залегающих в среде, где температура ниже точки Кюри. Региональные особенности проявления вариаций внутренней части поля, генерированного во внешнем жидком ядре Земли, ставят непростую задачу разделения по их пространственным признакам вариаций главного поля от вариаций поля источников, залегающих в верхних слоях Земли, в одном и том же частотном диапазоне. Полученные результаты по построению точных, непрерывных в пространстве и во времени моделей геомагнитных вариаций за более чем столетний период с начала 20-го века по настоящее время, представленных с точностью скачкообразных изменений во вторых временных производных главного магнитного поля Земли, определяют оригинальность, новизну и важность проводимых исследований.

Пространственные сферические гармонические модели глобального поля постоянных геомагнитных ускорений (Симонян, 2017) были пересмотрены для их усовершенствования так, чтобы они наиболее точно отражали пространственные и временные особенности изменяемости вековых геомагнитных вариаций, извлеченных из серий данных мировой сети магнитных обсерваторий. Имеющаяся база данных среднегодовых значений элементов земного магнитного поля была обновлена и дополнена сериями данных современных обсерваторий, которые начали действовать с 70-80-х годов прошлого столетия и таким образом длины предоставленных ими достигли продолжительности 30-40 лет (http://www.bgs.ac.uk/ рядов discoverymetadata/keywords/2180.html). Такая длина рядов необходима для выявления присущего вековым вариациям тренда с целью выявления резких изменений в их направлении, т.е. джерков и значений поля кусочнопостоянных ускорений, исходя из представления, что временные серии вековых вариаций с достаточной степенью точности можно представить линейной функцией. Поэтому, переносы ряда обсерваторий за период их действия приводит к искусственному укорачиванию рядов и ухудшению качества предоставляемых ими ценной и порою уникальной информации о геомагнитных вариациях. Для "сшивания" рядов значений были использованы поправки, связанные с переносами обсерваторий в случаях, когда они представлены в файлах исходных данных. В некоторых случаях такое "сшивание" рядов данных проведено в каталоге, сделанном Мировым центром сбора и обработки данных ИЗМИРАН (Головков и др., 1983). В наших исследованиях, с целью вовлечения в анализ наибольшего количества длинных, непрерывных рядов, были использованы как первый, так и второй источники.

При точном определении интервала линейной аппроксимации путем визуальной инспекции серии значений вековых вариаций и последующего применения метода наименьших квадратов в процессе определения линейной функции, дисперсия аппроксимации и, следовательно, определяемых значений поля постоянных ускорений, представленных углом наклона прямолинейных отрезков, зависит в основном от качества серий наблюдений. В случае обсерваторских данных качество серий вековых вариаций ухудшается в основном за счет влияния высокочастотных вариаций внешнего относительно земной поверхности происхождения, что сильно проявляется при анализе данных обсерваторий, находящихся в авроральных областях. Однако следует отметить, что ряды данных и среднеширотных обсерваторий, действующих в южном полушарии, не отличаются высокой точностью, а качество серий некоторых европейских обсерваторий, отличающихся высокой точностью в течение всего периода их действия, порою сильно ухудшается за период второй мировой войны. Это, равно как и факт неравномерного распределения обсерваторий на земной поверхности, их острая нехватка в южном полушарии и акваториях океанов предоставляется шу-

мом, свойственным моделям, основанным на них. При всем этом, построенные нами первичные сферические гармонические (СГ) модели глобального поля кусочно-постоянных геомагнитных ускорений отражали пятнистую структуру – знакопеременные фокусы крупно-региональных размеров, характерную для поля внутренних источников, и на картах, построенных на их основе, не появляются ложные океанические фокусы (Golovkov et al., 1987, Симонян, 2017). Это означает, что имеющиеся модели могли служить основой для их дополнения и усовершенствования путем анализа остаточного поля и введения небольших изменений в интервалах линейной аппроксимации с тем, чтобы довести девиации до наименьших значений, определяемых в основном точностью исходных рядов данных. Одновременно, метод сферического гармонического синтеза по дискретным точкам позволяет смоделировать поле во всех точках, выбранных для этих исследований 189 обсерваторий, отличающихся длительностью периода их непрерывного оперирования, за весь исследуемый более чем 100-летний период с начала 20-го по прошедший период 21-го веков. Совместный анализ исходных и модельных значений, полученных для всего периода исследований в точках всех обсерваторий, позволил экстраполировать значения поля постоянных ускорений на предыдущие, а порою и последующие эпохи в ряде случаев, когда исходные значения в данных точках отсутствовали из-за ограниченности периода действия отдельных обсерваторий. Период экстраполяции можно было продлить до тех пор, пока появлением нового джерка не ограничивался интервал постоянства ускорения по данной серии, и не появилось новое значение, резко отличающееся от имеющегося. Использование экстраполированных значений поля ускорений в числе исходных в процессе новой генерации набора коэффициентов Гаусса, позволило в некоторой степени устранить проблему неравномерности сети данных, присущей для эпох первой половины 20-го столетия, приводя к улучшению качества построенных СГ моделей для этого периода времени.

Глобальные пространственные СГ модели кусочно-постоянного поля вековых ускорений были приурочены к центральным эпохам периодов, характеризующихся стационарностью процесса эволюции магнитного поля земного ядра, которые были определены по минимальному количеству явлений скачкообразных изменений значений ускорений.

Результирующие модели поля постоянных геомагнитных ускорений были построены с точностью первых четырех пространственных гармоник ввиду того, что количество данных для первой центральной эпохи периода моделирования составляет чуть больше 100 при около тридцати пяти обсерваторий, действующих в конце 19-го, начале 20-го веков. Из них в южном полушарии расположены лишь несколько обсерватории. Если учитывать также, что обсерваторские данные за этот период не отличаются высокой точностью в основном из-за низкого качество применяемой магнитометрической аппаратуры, то становится очевидным, что даже при обрыве ряда

Гаусса на 5-ой гармонике, количество искомых коэффициентов составляет 24, т.е. переопределенность системы нормальных уравнений составляет чуть больше 4-х. Такая переопределенность при сферическом гармоническом анализе, выполняемом методом наименьших квадратов, оказывается необходимой для достижения удовлетворительной точности результирующих моделей. Со второй половины 20-го столетия, после МГГ-1957, сильно увеличивается количество действующих магнитных обсерваторий, сеть становится более равномерной, а качество предоставляемых ими данных существенно улучшается. Однако, для обеспечения однородности в представлении поля ускорений для всего периода исследований и на более поздние эпохи модели нами представлены первыми 4-мя пространственными гармониками.

Анализ достигнутых результатов показывает, что в построенных ныне моделях среднеквадратичное значение поля девиаций составляет менее чем 17% от среднеквадратичного значения поля исходных значений ускорений. Если также учесть, что анализируемое поле девиаций, при его представлении с точностью до второго знака после запятой, только в некоторых случаях, и в основном в южном полушарии, отличается от нуля, то можно оценить, что точность моделей нынешней генерации существенно выше. Обнаруживаемая в данном случае погрешность моделей, как показывает детальный анализ ее источников, вызвана шумом, вносимым высокочастотными вариациями внешнего происхождения, равно как и специфическим шумом, свойственным данным обсерваторий за некоторые периоды их действия. Относительно большой процент погрешности в последней модели, покрывающей период начала 21-го века, следует отнести к недостаточной длине анализируемых рядов наблюдений, ограниченной временем проведения настоящих исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ГКН МОН РА и РФФИ (РФ) в рамках совместной научной программы 18RF-096 и 18-55-05006 соответственно.

Литература

- 1. Головков В.П., Коломийцева Г.И., Конященко Л.П., Семенова Г.М. 1983. Каталог среднегодовых значений элементов геомагнитного поля мировой сети магнитных обсерваторий. Вып. XVI, Москва, 343 стр.
- Golovkov V.P., Zvereva T.I. & Simonyan A.O. 1989. Common Features and Differences Between "Jerks" 1947, 1958 and 1969. //Geophys. & Astrophys. Fluid Dyn. V. 49. Pp. 81-96.
- 3. Симонян А.О. 2017. Высокочастотные вариации главного магнитного поля Земли. Palmarium Acad. Publ., Project #3710, ISBN 978-3-659-72422-0, 390 стр.

ОБЪЕМНЫЕ ТОКИ СОВРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ В ЯДРЕ ЗЕМЛИ

Смирнов А.Ю., Старченко С.В. ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия sstarchenko@mail.ru

VOLUME CURRENTS OF MODERN MAGNETIC DIPOLE IN THE EARTH'S CORE

Smirnov A.Yu., Starchenko S.V.

IZMIRAN, Troitsk, Moscow, Russia.

Received physically adequate and, apparently, a most simple distributed volume electric currents, which determines by the observed geomagnetic dipole. For this aim from Maxwell's equations and well-established geodynamic estimates we showed that the RMS current density in the liquid core of the Earth significantly exceeds the density of the currents in the solid core.

1. ВВЕДЕНИЕ

В большом количестве работ [1,2,5,6,8,9, 11-14] предприняты попытки оценки токов в ядре Земли. Использовано моделирование с помощью локальных диполей (бесконечно тонких петель тока), протяженных бесконечно тонких петель, оба подхода нереалистичны. Мы предложим простое распределение плотности тока в жидком ядре, обеспечивающее наблюдаемое магнитное поле Земли.

2. ОЦЕНКИ ТОКОВ В ЖИДКОМ/ТВЕРДОМ ЯДРЕ

Классические уравнения Максвелла и Ампера [10] в верном для ядра Земли МГД приближении связывают векторы скорости течений U, плотности тока J, магнитного B и электрического E полей:

Здесь: σ – электрическая проводимость, μ – магнитная проницаемость, которая в ядре Земли практически совпадает с проницаемостью в вакууме $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \Gamma_{\text{H}/\text{M}}$.

Поскольку геодинамо-пороговое явление, и для его осуществления нужна достаточно большая типичная (или средняя) скорость U, то естественно из (1b,c) оценить типичную плотность тока в жидком ядре J_o пренебрегая электрическим полем:

$$J_o = \sigma U B_o. \tag{2}$$

Здесь *В*₀ – типичное магнитное поле в жидком ядре.

В твердом ядре U=0 и из (1a,b) получаем известное диффузионное уравнение

Это уравнение имеет точное решение, которое дает наиболее медленно затухающий и потому доминирующий диполь [3,10] со временем затухания

$$\tau_i = \mu \sigma (r_i / \pi)^2. \tag{4}$$

Здесь r_i – радиус твердого ядра Земли. Подставляя (4) в (3) и аппроксимируя производные отношениями величин, получим электромагнитный масштаб в твердом ядре r_i / π . Подставляя этот масштаб в (1с), оценим типичную плотность тока в твердом ядре

$$J_i = \pi B_i / (\mu r_i). \tag{5}$$

Соответственно отношение плотностей тока в жидком (2) и твердом (5) ядре очень велико

$$\frac{J_o}{J_i} = \mathcal{I}_i \frac{B}{\mathcal{B}} >> 1.$$
(6)

Для конкретной оценки отметим, что число магнитного Рейнольдса $\mu\sigma Ur_i$ от 10^2 до 10^3 в ядре Земли, а отношение полей B_o/B_i намного больше единицы во всех известных нам геодинамо моделях. Поэтому далее мы пренебрегаем токами в твердом ядре, которые пренебрежимо малы (в $10^2...10^5$ раз) по сравнению с токами в жидком ядре.

3. ОБЪЕМНЫЕ ТОКИ, ПОДДЕРЖИВАЮЩИЕ ГЕОМАГНИТНЫЙ ДИПОЛЬ

Исходя из симметрии задачи, направим полярную ось сферической системы координат (r, θ, φ) вдоль геомагнитного диполя **М**. При этом плотность тока **J** не зависит от угла φ и задается нами в наипростейшем виде:

Здесь G(t) – зависящий от времени t коэффициент, который нам предстоит определить, а «жирной» единицей обозначаются единичные вектора. Выбранное нами представление (7), см. Рис. 1, удовлетворяет следующему из (1с) условию $\nabla \cdot \mathbf{J} = \mathbf{0}$ и естественной для любого геодинамо слабой зависимости от высоты вдоль вектора угловой скорости вращения Ω [4,12,13].

Рассмотрим точку на оси диполя, удалённую от центра Земли на расстояние $x \, c^{|x|>r_i}$. Осевое магнитное поле, создаваемое в этой точке тонким слоем тока радиусом $r\sin\theta$ из жидкого ядра, согласно закону Био–Савара–Лапласа [Davidson, 2001], равно:



Здесь уже проведено интегрирование по углу φ . Для суммарного поля *B*, запишем



где $r_i = 1220$ км и $r_o = 3481$ км – радиусы твёрдого и жидкого ядер, соответственно. Разложим знаменатель подынтегрального выражения (9) в ряд Тейлора по малому (для удаленных от ядра точек) r/|x|. В главном порядке этого разложения, по определению [7], получим вклад чисто дипольной составляющей *D* в суммарное поле *B*:



Для получения единственной неизвестной *G* приравняем наиболее достоверно определяемое в полюсе диполя у поверхности Земли (x = R = 6371 км) дипольное поле к (10). И через стандартные коэффициенты Гаусса [10] получим:

Используя находящиеся в свободном доступе IGRF коэффициенты Гаусса (см. <u>http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html</u>), определим G из (11) и (7) с 1900 по 2020 годы. Исходя из этих G на Рис. 2 строим физически интересный суммарный ток I через меридиональное сечение и мощность W омической диссипации во всем объеме ядра:

При определении мощности для всюду постоянной электрической проводимости принято компромиссное значение $\sigma = 5 \cdot 10^5$ См/м [3,15].



годы

Рис. 1. Суммарный ток (левая ось) и мощность его омической диссипации (правая) для геомагнитного диполя с 1900 по 2020 гг.

Из рис. 1 видно, что огромный ток около 2.5 миллиарда Ампер сравнительно небольшой Омической сочетается мошностью co диссипации около 15-ти Мегаватт. Подобную мощность может обеспечить сравнительно небольшая электростанция обслуживающая промышленное поселение с несколькими тысячами жителей. Это обусловлено тем, что Земли ядра достаточно велика и рассматриваемый проводимость дипольный ток оперирует на максимально большом масштабе. При этом оба упомянутых фактора эффективно входят в знаменатель в выражениях для мощности.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Зидаров Д., Бочев А. Представление вековых вариаций магнитного поля Земли как изменение поля оптимальных геомагнитных диполей // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 9. № 2. С. 315–320. 1969.
- 2. Старченко С.В., Ботвиновский В.В. (2003) Азимутальные токи и палеомагнитные уровни // Физика Земли, № 5, С.85-93.
- 3. Старченко С.В. Гармонические источники главного геомагнитного поля // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 51, № 3, С. 412-418. 2011.
- 4. Alldredge L.R. Current loops fitting to geomagnetic model spherical harmonic coefficients // Geomag. Geoelectr. V. 39. № 5. P. 271–296. 1987.
- 5. Aubert J., Gastine T., Fournier A. Spherical convective dynamos in the rapidly rotating asymptotic regime // J. Fluid Mech. V. 813. P. 558-593. 2017.
- Christensen U.R. Dynamo Scaling Laws and Applications to the Planets // Space Sci Rev. V. 152. P. 565-590. 2010.
- 7. Davidson P.A. An Introduction to Magnetohydrodynamics, Cambridge University Press, 2001.
- 8. Demina I.M., Gorshkova N.V., Soldatov V.A. Field of volume current systems on the Earth's surface and near the core-mantle boundary // Proceedings of the 11th Intl School and Conference "Problems of Geocosmos" (Oct 03-07, 2016, St. Petersburg, Russia). P. 30-36. 2016.
- 9. McNish A.G. Physical representations of the geomagnetic field // Trans. Amer. Geophys. Union, V. 21. P. 287–291. 1940.
- 10. Parkinson U. Introduction to Geomagnetism, Edinburgh: Scottish Acad. Press, 1983.
- Peddie N.W. Current loop models of the earth's magnetic field // J. Geophys. Res. V. 84. P. 4517–4523. 1979.
- 12. Starchenko S.V., Analytic base of geodynamo-like scaling laws in the planets, geomagnetic periodicities and inversions // Geomagnetism and Aeronomy. 2014. V. 54, No 6. P. 694-701.
- 13. Starchenko S.V., Jones C.A. Typical velocities and magnetic field strengths in planetary interiors // Icarus. V. 157. P. 426–435. 2002.
- 14. Stum D.R., Pollack G.L. A current sheet model for the Earth's magnetic field // Am. J. Phys. V. 66. P. 802–810. 1998.
- 15. Williams Q. The Thermal Conductivity of Earth's Core: A Key Geophysical Parameter's Constraints and Uncertainties // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. V. 46. Publication date is May 2018.

ВЕРОЯТНОСТНО ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНЫХ МУЛЬТИПОЛЕЙ ГАУССА С 1900 ПО 2005 ГГ.

Старченко С.В., Яковлева С.В. ИЗМИРАН, Калужское шоссе 4, Троицк, Москва, 108840 sstarchenko@mail.ru, svyakov@izmiran.ru

PROBABILISTIC TIME ANALYSIS OF GEOMAGNETIC GAUSS MULTIPOLES FROM 1900 TILL 2005

Starchenko S.V. and Yakovleva S.V.

IZMIRAN, Kaluzhskoe Hwy 4, Troitsk, Moscow, 108840 Russia.

We investigated 1900-2005 logarithmic time derivatives or exponential rates of geomagnetic multipoles basing on IGRF and gufm1 models. Our investigation shows no harmonic periodicities with longer flat 'quiet' and shorter pick-shaped 'disturbed' fields. Developing our probabilistic time analysis we identify geomagnetic probabilities to grow/decay, expected values for grow/decay and median rates together with periodicity/aperiodicity estimates.

Поскольку геомагнитные наблюдения достаточно надежны лишь с 1900г., то стандартный спектральный Фурье анализ не в состоянии исследовать основные геодинамо вариации, которые намного продолжительней нескольких десятков лет. Также общепринятый анализ изначально линейный и поэтому представляется малопригодным для существенно нелинейного геодинамо. Чтобы преодолеть эти трудности, мы разработали в [1] вероятностно временной анализ, трактующий частотные свойства вариаций как отношение производной к самой величине. Эти отношения для коэффициентов Гаусса были здесь получены из gufm1 [2] и IGRF моделей с 1900 по 2005 г.

Предлагаемый анализ основан на вышеупомянутых отношениях или эквивалентно – скоростях экспоненциального роста R, которые могут быть от $-\infty$ до $+\infty$. Чтобы справиться со столь обширным диапазоном, мы проецируем R на интервал 0-1 посредством преобразования:

$$\rho = e^{-Ro/|R|} \,. \tag{1}$$

Где *Ro* определяется и выбирается так, чтобы

$$0.5 = \left(\prod_{k=1}^{K} e^{-Ro/|R_k|}\right)^{1/K} \implies Ro = K \ln 2 / \sum_{k=1}^{K} 1 / |R_k|.$$
(2)

Значения R_k взяты из всей или наиболее представительной части набора данных. Отдельно в положительных и отрицательных наборах данных мы ранжируем все *L* значений *R* от наименьшего значения до наибольшего. Теперь разделим интервал 0-1 на *l* частей (используем $l \approx \sqrt{L}$) и определим

плотность вероятности [3], [4] для положительных значений *Dp* и отрицательных значений *Dn* как:

$$Dp(i) = D_i^+ l/L, Dn(i) = D_i^- l/L.$$
 (3)

Здесь D_i^+ - число положительных *R*-s которые попадают в диапазон $(i-1)/l < \rho \le i/l$ где *i* от 1 до *l*, тогда как D_i^- такое же, но для отрицательных *R*-s. Следующие формулы из (4) определяют вероятность апериодичности *De* и вероятность *Pp/Pn* положительной/отрицательной скорости *R* или другими словами, - вероятность роста/затухания как

$$De = l^{-1} \sum_{i=1}^{l} |Dp(i) - Dn(i)|, \ Pp = l^{-1} \sum_{i=1}^{l} Dp(i), \ Pn = l^{-1} \sum_{i=1}^{l} Dn(i), \ Pp + Pn = 1.$$
(4)

Определим, следуя (1-4) и [3], [4], ожидаемые значения экспоненциальных скоростей средних *Rm* и роста/распада *Рр/Pn* как

$$Rm = \frac{Ro}{l} \sum_{i=1}^{l} \frac{Dn(i) - Dp(i)}{\ln \frac{i - 0.5}{l}}, \ Rp = \frac{-Ro}{lPp} \sum_{i=1}^{l} \frac{Dp(i)}{\ln \frac{i - 0.5}{l}}, \ Rn = \frac{-Ro}{lPn} \sum_{i=1}^{l} \frac{Dn(i)}{\ln \frac{i - 0.5}{l}}.$$
 (5)

Таким образом, этот вероятностный временной анализ предназначен для того, чтобы идентифицировать вероятности роста/затухания с некоторой скоростью, ожидаемые значения для роста/затухания и средние скорости вместе с оценками периодичности/апериодичности.

Наша статистическая гипотеза состоит в том, что скорость в каждую эпоху проявляется с равной вероятностью. На рис. 1 график Pp-Pn, поскольку его положительные значения соответствуют преобладающей тенденции роста, а отрицательные - затухания. Максимальное значение Pp-Pn=1 соответствует 100% вероятности роста модуля гармоник, а минимальное -1 соответствует 100% вероятности затухания. Соответственно максимум 2De-1=1 дает 100% апериодичность, минимум (-1) – 100% периодичность, а 2De-1=0 – баланс этих тенденций.

Из рис. 1а видно, что усредненные значения имеют относительно длинные спокойные (с малыми |R|) интервалы и короткие – возмущенные. Суммарные вариации роста/затухания длятся около 25 лет, а средние – 400. Спокойное поле имеет вариации от 30-ти до 100 лет в 1900-1950, 1960-1985 и 2000-2005. Типичные времена вариаций возмущенных полей уменьшаются до ~10 лет, после чего происходит резкое (1950–1960) или ступенчатое (1985–2000) возвращение в спокойное поле. Средние вариации ~50 лет для возмущенного поля и ~450 лет для спокойного. В спокойном интервале поле стремится к равновесию с доминированием периодического поведения, когда De ~ 0,25, сравните рис. 1а и 16.



Рис. 1. а - сформулированные в (5) экспоненциальные скорости роста/ затухания Rp/Rn и средние Rm (в 1/год). б - мера апериодичности/ периодичности 2De-1 и мера роста/затухания Pp-Pn из (4).

В возмущенные интервалы периодичность абсолютно преобладает с пиком в 1955 г. когда был и практически идеальный баланс. и доминирование умеренной периодичности в 1990 г. С 1900 по 1995 г. общая вероятность роста геомагнитного поля была выше чем его затухания, в то время как с 2000 г. она предпочтительно уменьшалась.



Рис. 2. Двумерные плотности вероятности (3) на вертикальных осях. Знаком «+» отмечены эпохи Dp, а «-» Dn, которые взяты с отрицательным знаком. Значения T=1//R/ центров интервалов показаны на горизонтальных осях в годах.

Для детализации рассмотрим двухмерную плотность вероятности (3) на рис. 2. Видна более или менее симметричная картина в спокойные

эпохи с умеренными экстремумами около T=21 год. Экстремумы сильнее выражены около T=7 в две неспокойные эпохи: 1950-1960 и 1985-2000 годы. Первая и самая мощная возмущенная эпоха имеет наибольший асимметричный пик вероятности, а вторая довольно симметрична.

Чтобы получить еще более детальную картину различия между спокойным и возмущенным полем, сравним пары возрастания и затухания вблизи одной спокойной эпохи (1900-1920 гг.) и вблизи двух возмущенных эпох (1940-1960 и 1985-2005 гг.) в трехмерном изображении на Рис. 3.



Рис. 3. Аналогично Рис.2, но в 3D. Отмечены экстремумы плотности вероятности.

Итоги: 3a 1900-2005гг. ΜЫ исследовали логарифмические производные по времени или экспоненциальные скорости роста/затухания для геомагнитных мультиполей Гаусса из моделей IGRF и gufm1. Нами не выраженных гармонических периодичностей, а получены выявлено продолжительные «спокойные» экспоненциальные вариации ~25 лет и кратковременные «возмущенные» пиковые вариации ~10 лет. Развивая вероятностно временной мы получили анализ, геомагнитные наш роста/затухания, вероятности ожидаемые значения, усредненные характеристики и оценки периодичности/апериодичности.

Литература

- Starchenko S.V., Yakovleva S.V., 2016. MHD sources of multipoles in the Earth's core from 400 years of observations. In: V.S. Semenov et al., ed.// 11th International School and Conference "Problems of Geocosmos", 3-7 October 2016. St. Petersburg. Petrodverets: Saint-Petersburg State University, 109-115.
- 2. Jackson A., Jonkers A R.T., Walker M.R., 2000. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records.// Phil. Trans. R. Soc. Lond., A358, 957–990
- 3. Frick P.G., 1999. Turbulence: models and approaches. Lecture course (in Russian). Perm: Perm State Technical University. Part II. ISBN 5-88151-193-X.
- 4. Tijms H., 2007. Understanding Probability. // 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.

МАСШТАБИРОВАНИЕ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ПЛАНЕТАРНОЙ МАГНИТОКОНВЕКЦИИ

Старченко^а С.В., Рани^ь Х.П., Рамешвар^с Я.

^аИнститут земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН ИЗМИРАН, Калужское шоссе 4, Троицк, Москва, 108840 ^bФакультет математики, Национальный институт технологий, Варангай, Индия. ^cФакультет математики, Инженерный колледж, Османский университет, Хайдарабад, Индия. E-mail: sstarchenko@mail.ru

PLANETARY MAGNETOCONVECTION SCALING AND TURBULENCE

Starchenko^a S.V., Rani^b H.P., Rameshwar^c Y.

^aPushkov Institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation (IZMIRAN), Kaluzhskoe Hwy 4, Troitsk, Moscow, 108840 Russia. ^bDepartment of Mathematics, National Institute of Technology, Warangal, India. ^cDepartment of Mathematics, College of Engineering, Osmania University, Hyderabad, India.

Scaling laws describing planetary convection are considered with the purpose to obtain a simple formulation of equations governing turbulent convection that is close to critical for convection onset. This justifies, in a certain way, the available numerical models of the planetary convection and MHD dynamos that are too simple and nevertheless successful. Such dynamos are considered here for known terrestrial planets and moons.

Scaling, criticality and turbulence for convection

Assuming planetary parameters as in [1] for reaching the extreme range, we consider convection in a plane layer based on [2]. The liquid layer with thickness *D* rotates with angular velocity Ω in the gravitational field with acceleration *g* anti-parallel to z-axis. The liquid has kinematic viscosity v, diffusion λ , diffusivity κ , coefficients of thermal and compositional expansion α and β (for the Earth's core, about $\pm 10^{-5}$ /K and ± 0.6 , respectively [3]). The initial temperature and concentration are respectively (D-z)T' and $(D-z)\Xi'$. As in the Earth, the convection instability is dominated by compositional effects characterized by Prandtl number μ . Effect of temperature either leads to an additional instability (at $\alpha > 0$) or stabilizes convection (at $\alpha < 0$). Using relatively too small [3] transport coefficients and very fast rotation [2] represented by a typical velocity *U*, new (δ , *r*, *s*) and classical (*E*, *Ra*) similarity factors can be written as

$$U = \Omega D\delta^2, \delta = \frac{\sqrt{g\beta\Xi'}}{\Omega} = E\sqrt{\frac{Ra}{\mu}}, r = \frac{\alpha T'}{\beta\Xi'}, s = \frac{\nu \Omega^2 / D^2}{(g\beta\Xi')^{3/2}} = E^{-2} \left(\frac{\mu}{Ra}\right)^{3/2}.$$
 (1)

Here the new factors are *r* for the thermal/composition effect ratio, *s* for the effective dissipation/generation ratio and δ for the relative size perpendicular to the rotation axis. The classical Ekman number $E = v/(\Omega D^2)$, taken ~10⁻¹⁵ for the molecular viscosity value in the Earth's core as determined from the first principles [3]. The classical Rayleigh number $Ra = g\beta \Xi' D^4/(v\lambda)$, is determined by the compositional convection, and is ~10²⁷ for the commonly accepted molecular diffusion of the light admixture in the Earth's core [3]. With such extreme values of these key geodynamo similarity factors, the real geodynamo will cannot be modeled because of computational limitations. Use of new similarity coefficients $\delta \sim 10^{-3}$ (instead of Ekman number $E \sim 10^{-15}$) and $s \sim 10^{-6}$ (instead of $1/Ra \sim 10^{-27}$) from (1) as prefactors for higher order derivatives appears more promising. In this approach, the solution is likely within reach of sufficiently powerful computers even for the real geodynamo parameters. This simplified system could be easily generalized on a planetary spherical layer based on the approach first suggested in [4].

Following new results of this paper are based on already somewhat standard [5] and inspired by [6] estimation of unified turbulent transport coefficient

$$kUD\delta \approx v \approx \kappa \approx \lambda \,. \tag{2}$$

Here k is a numerical coefficient. The new optimization here is that due to (1-2) this k is simply equal to s. Therefore, those numbers are estimated as

$$0 < k = s < s_{\rm cr} \,. \tag{3}$$

Here, s_{cr} is a critical number. Convection exists at $s < s_{cr}$ only. Critical (index 'cr') values from [2] are related (σ is the thermal Prandtl number) as

$$s_{cr}^{2} = \frac{4}{27} \frac{(\mu + r\sigma)^{3}}{\pi^{4}} = \frac{\mu^{3}}{E^{4}Ra_{cr}^{3}}.$$
(4)

For pure compositional (*r*=0) and turbulent (μ =1) convection $s_{cr} = 0.04$. In realistic spherical shell geometry, more parameters and complexities are added determined by the convective instability profile and the relative inner/outer shell radii. However, for the typical terrestrial-like turbulent parameters s_{cr} is still about a few hundredths, as follows, for example, from the scaling $Ra_{cr} \sim E^{4/3}$ [7] for the case where a terrestrial-like convection was investigated in spherical shells. In this case, the supercriticality of turbulent convection is only slightly (by a factor of ~ s_{cr}/s) greater than the critical level. This is perhaps one of the important arguments in favor of the successful (22-year after [8]) numerical modeling of the geodynamo-like systems. Another important fact is that the coefficients of turbulent transport (2) are several orders of magnitude higher than the corresponding molecular quantities. For example, *s* is of the order of 10^{-2} , turbulent viscosity/diffusion is 0.02 m²/s and turbulent Ekman number is $E = 3 \times 10^{-11}$. The latter can be achieved in the nearest future for the known

geodynamo-like systems using a sufficiently powerful supercomputer. At the same time, the corresponding simplified convective system with the realistic turbulent $s \approx 0.01$ and even molecular $s \approx 10^{-6}$ parameters of the geodynamo-like systems and other planets can in principle be numerically solved even now.

Critical convection estimations for the terrestrial planets

The Earth's thermal Prandtl number σ is 10^{-2} and the compositional Prandtl number μ is 10³ [3]. The modulus of r is less than one because compositional convection dominates over the thermal one in the Earth and similar terrestrial planets. Due to $\mu \gg \sigma$ the uncertainty in r barely affects the critical molecular value of (4) which is $s_{cr} = 1200$. This enormous value for the critical dissipation/generation ratio indicates that the convection is extremely easily generated in the Earth's core and is highly nonlinear as the realistic molecular s ~ 10^{-6} is by nine (!) orders of magnitude lower. Thus, the small-scale convection can be naturally considered as extremely chaotic or turbulent with huge Reynolds numbers $\text{Re} = UD/\kappa = 10^9$. Corresponding large-scale turbulent values σ and μ are about 1 as follows from (2). If one neglects the thermal contribution assuming r = 0, the critical turbulent value from (4) will be $s_{cr} = 0.04$. Similar moderate values are also obtained using all other probable values of r from (1). They are likely to be significantly higher than -1, but rather smaller than 1 in the cores of planets similar to the Earth. However, on approaching r = -1, nonstandard weakly nonlinear or almost critical modes with nearly laminar flows become possible. This extremely strong stabilization (r is slightly above -1) is possible in the interiors of some terrestrial planets. For Mercury having an unusually configured magnetic field, this is partly supported by numerical [9] and asymptotic [10] modeling. A similar situation is also probable for the Jovian satellite Ganymede. Thus, Mercury and Ganymede dynamos could have a special type of 'unconventional' convection where the compositional instability is almost stabilized by thermal effects. For the present-day Moon, Venus, Mars, and most of the large moons, the r value is probably about -1, and in this case convection cannot be excited at all. In the deep past, a non-Earth-like compositional convection could possibly support rather strong MHD dynamos with small |r| in Moon and Mars, while too slowly rotating Venus could never develop the convection intensity necessary to initiate the dynamo [11, 12].

The key results of this work

The authors' modern similarity factors and correspondent scaling laws describing planetary convection are considered with the purpose to obtain a simple formulation of equations governing turbulent convection. The last is argued to be close to critical for convection onset. This justifies, in a certain way, the available numerical models of the planetary convection and magnetic dynamos that are too simple and nevertheless successful. Such dynamos are only possible at sufficiently powerful convection, which is here considered for the terrestrial planets and moons of the Solar System.

References

- Cheng J. S., Stellmach S., Ribeiro A., Grannan A., King E. M., Aurnou J. M. Laboratorynumerical models of rapidly rotating convection in planetary cores // Geophys. J. Int. V. 201, P. 1–17. 2015.
- 2. Starchenko S.V. Scaling and excitation of combined convection in a rapidly rotating plane layer // (JETP) Zh. Eksp. Teor. Fiz. V. 124 (2). P. 352–357. 2017.
- 3. Terasaki H., Fischer R.A.: Physics and Chemistry of the Lower Mantle and Core. John Wiley & Sons. 312 p. 2016.
- 4. Starchenko S.V., Kotelnikova M.S. Critical stability of almost adiabatic convection in fast rotating and wide spherical shell // JETP. V. 116(2). P. 338-345. 2013.
- 5. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiments // Monthly Weather Review. V. 91(3). P. 99-164. 1963.
- 6. Reynolds O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and determination of the criterion // Roy. Soc. London. V. 186. P. 123-161. 1894.
- 7. Starchenko S.V., Kotelnikova M.S., Maslov I.V. Marginal stability of almost adiabatic planetary convection // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. V. 100. P. 397-428. 2006.
- Glatzmaier G.A., Roberts P.H. A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle // Phys. Earth Planet. Int. V. 91 (1– 3). P. 63–75. 1995.
- Christensen U.R. A deep dynamo generating Mercury's magnetic field // Nature. V. 444. P. 1056–1058. 2006.
- 10. Bassom, A.P., Soward, A.M., Starchenko, S.V. The onset of strongly localized thermal convection in rotating spherical shells // J. Fluid Mech. V. 689. P. 376-416. 2011.
- Breuer D., Rueckriemen T., Spohn T. Iron snow, crystal floats, and inner-core growth: modes of core solidification and implications for dynamos in terrestrial planets and moons // Progress in Earth and Planetary Science // 2(39) DOI 10.1186/s40645-015-0069-y 2015.
- 12. Starchenko S.V.: Energy geodynamo parameters compatible with analytical, numerical, paleomagnetic models and observations // Fizika Zemli. No 6. P. 110-124. 2017.

МАГНИТНОЕ И ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЯ ЛУНЫ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ "APOLLO"

Харитонов А.Л. ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия ahariton@izmiran.ru

MAGNETIC AND GRAVITY FIELDS OF THE MOON FROM THE DATA OF SPACECRAFT "APOLLO"

Kharitonov A.L.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

For a research of the deep structure of the Moon the measured values of gravity field and a radial component of magnetic field of the Moon received at different heights of survey by means of the Apollo spacecraft were analysed

В последнее время, важное значение придается различным исследованиям Луны, как ближайшего космического соседа планеты Земля. связи подготовкой предстоящим запускам Луне В К к американского, китайского и российского космических аппаратов (КА) с космонавтами на борту. По-видимому, в ближайшее время особенно интересным может стать круг вопросов, связанных с неоднородностями внутреннего строения Луны, если там удастся найти крупные скопления тех химических элементов, запасы которых на Земле ограничены (вода, радиоактивные элементы). Также интересным представляется вопрос сходства или различия глубинного внутреннего строения Земли и Луны, некоторый позволяющих пролить свет на решение вопроса 0 происхождении Луны (гипотезы захвата инопланетного тела или ee образование из единого газопылевого облака). Решить этот вопрос, грамотно, без ИЗЛИШНИХ затрат запуск различных форме на ПО окололунной орбиты ЛЛЯ космического аппарата (круговая, эллипсовидная) И высоте съемок измерения ее полей, часто не научным согласованных разным программам ee изучения, ПО планируемого на необитаемых космических аппаратах, предшествующих запуску космонавтов на Луну, можно, если уже по имеющейся спутниковой информации «Apollo-15» «Apollo-16», И удастся проанализировать одновременно несколько различных полей, на разных высотах съемки над поверхностью Луны (0-300 километров).

Исходные данные

С целью исследования глубинного строения Луны и его сравнения с глубинным строением Земли были проанализированы, измеренные КА

«Apollo» [1], значения радиальной составляющей магнитного поля (Z_R) Луны, полученные на разных высотах съемки (рис. 1).



Рис.1. Значения радиальной составляющей магнитного поля Луны (Z_R) (Zвертикальная составляющая аномального магнитного поля), измеренные на разных высотах ($H_3 = 100$, $H_2 = 30$, $H_1 = 0$ километров), по данным космических аппаратов «Apollo» (для графиков на высотах H_3 и H_2) и «Луноход» (для графика на высоте H_1). Значения величины аномального магнитного поля приведены в нанотеслах.

Также выполнены измерения гравитационного поля (∆g) Луны (рис. 2) в ее экваториальной части [1].



Рис.2. Гравитационное поле Луны - (Δg). Значения гравитационного поля Луны приведены в милигаллах. (вертикальная шкала).

Эти данные были получены в результате запуска орбитальных космических аппаратов вокруг Луны – «Apollo-15» и «Apollo-16» (США). Авторами были использованы данные магнитного поля Луны на разных средних по ансамблю высотах ($H_5 = 160$, $H_4 = 100$, $H_3 = 75$, $H_2 = 30$

километров). В частности, все 48 орбит спутника «Apollo-15» на высоте (H) от 160 до 75 километров были выполнены вблизи экватора, в широтном направлении вокруг Луны, в полосе шириной около 250 км, в диапазоне широт от 15 градусов северной широты до 15 градусов южной широты. Для расчетов статистических параметров магнитного поля Луны были использованы данные на максимально высоких орбитах (H₅ = 160 км), средней высоты орбиты (H₄ = 100 км), минимальной высоты орбиты (H₃ = 75 км) витков спутника «Apollo-15». Длина орбиты спутника «Apollo-15» на высоте 100 километров составляла 12000 км, при интервале дискретизации измеренных данных 55 км. Данные о магнитном поле Луны на высоте 30 км были представлены одним профилем «Apollo-16» длиной 3090 километров. Интервал дискретизации измеренного магнитного поля в этом случае равнялся 20 км для более надежной выборки данных.

Важным свойством магнитного поля, измеренного на космических аппаратах, вращающихся вокруг Луны, является полное отсутствие на Луне главного магнитного поля (ГМП), связанного с динамо-процессами, существующими в жидких ядрах многих других планет Солнечной системы. Отсутствие главного магнитного поля (Z_m) на Луне позволяет наблюдать в естественном виде (без предварительного исключения ГМП из измерений) ее аномальное магнитное поле (Z_R), связанное в основном с различными аномально намагниченными неоднородностями, расположенными в литосферном слое внутри Луны.

Методика обработки данных

Используя возможности спектрального и автокорреляционного анализов, по измеренным, на орбитальных космических аппаратах вокруг Луны, значениям гравитационного поля (Δg) и радиальной составляющей магнитного поля (Z_R), были вычислены нормированные спектры и автокорреляционные функции этих полей. По автокорреляционным функциям были вычислены параметры первых четырех статистических моментов (математического ожидания - М, дисперсии - S, коэффициента асимметрии - А, коэффициента эксцесса – Е) и значения радиуса корреляции (r₀₃) вдоль ряда измеренных, на разных высотных круговых орбитах космических аппаратах, вращающихся вокруг Луны, значений гравитационного и магнитного полей. Результаты этого разновысотного анализа магнитного и гравитационного полей Луны показывают, что используя значения коэффициентов эксцесса (А) (рис. 3) или радиуса корреляции (r03) можно определять оптимальные высоты совместной гравитационной и магнитной съемки [2, 3], производимой с космического аппарата, вокруг любых космических объектов (планет, астероидов, комет и других) для получения согласованных результатов о глубинных неоднородностях, проявляющихся по магнитным и гравитационным полям одновременно.



Рис. 3. График пересечения кривых значений статистического момента - коэффициента асимметрии (А-вертикальная ось, в безразмерных единицах) магнитного (сплошная линия) и гравитационного (пунктир) полей Луны в зависимости от высоты съемки (Н-горизонтальная ось, в км).

Проведенный авторами спектральный анализ гравитационного и магнитного полей Луны показывает, что Луна имеет 3 основных плотностных границы и 7 магнитных границ фиксируемых в ее литосфере.

Выводы

1. Оптимальная высота комплексной гравитационно-магнитной съемки Луны, необходимая для выявления особенностей глубинного строения Луны, составляет примерно 75-100 км.

2. На основании анализа данных КА «Apollo»можно заключить, что Луна не имеет жидкого ядра, в котором бы генерировалось ее главное магнитное поле. По-видимому, магнитное поле Луны создается только остаточной намагниченностью ее горных пород.

Литература

1. Russell C.T., Coleman P.J., Fleming B.K., Hilburn L., Ianidis G., Lichtenstein B.R. and Schubert G. // Proc. Lunar Sci. Conf. 6-th. 1975.

2. Харитонов А.Л., Хассан Г.С., Харитонова Г.П. Спектральный и автокорреляционный анализ магнитного и гравитационного полей Луны и Земли по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. №. 4. С. 17-23. 2009.

3. Пронин В.П., Харитонов А.Л. Использование результатов разновысотных статистических характеристик аномального магнитного поля для оценки мощности магнитоактивного слоя земной коры // Препринт ИЗМИРАН. № 11(958). 20 с. 1991.

АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ИЗМЕРЕННОГО КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ «СНАМР» НАД ЮЖНО АФРИКАНСКИМ МАНТИЙНЫМ ПЛЮМОМ

Харитонов А.Л.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия ahariton@izmiran.ru

THE ANALYSIS OF THE MAGNETIC FIELD, MEASURED BY THE SPACECRAFT "CHAMP" OVER SOUTHERN AFRICAN MANTLE PLUME

Kharitonov A.L.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The problems of CHAMP magnetic satellite research of deep heterogeneities of a structure of tectonosphere of the Earth on an example Southern African mantle plume are considered. The main results of a structure of electromagnetic structure Southern African mantle plume according to satellite geomagnetic data are confirmed by data of a global seismic tomography and other geologic-geophysical data.

Введение

Цель данной работы – показать влияние глубинного геотектонического строения Южно-Африканского мантийного плюма на образование устойчивых в пространстве и во времени электромагнитных неоднородностей в ионосфере Земли.

Используемые данные

Для изучения глубинного строения Южно-Африканского мантийного плюма в качестве основных использованы измеренные данные векторных ортогональных составляющих магнитного поля (X, Y, Z), полученные в результате проведения спутниковых магнитных съемок с космических аппаратов «MAGSAT» и «CHAMP» [5]. Помимо этого, для анализа связи глубинного строения мантии и приповерхностных процессов использованы результаты гравиметрических [2], сейсмотомографических [4], палеомагнитных [3], морфоструктурных, радиационных [6], драгированных океанических [1] данных.

Методы исследований

В качестве основных методов исследований глубинного строения авторами статьи использованы методы решения обратной задачи теории геопотенциала [7]. Кроме того, для изучения глубинного этроения авторами проанализированы сейсмические данные о глубине залегания всех гипоцентров землетрясений, произошедших за период проведения спутниковой магнитной съемки.

Результаты исследований мантийных плюмов

По результатам спутниковых магнитных исследований (с КА «MAGSAT» и «СНАМР») выделена зона Южно-Африканского мантийного плюма, расположенного на 20-м градусе восточной долготы [17] (рис. 1).



Рис.1. Спутниковая карта Z-вертикальной компоненты аномального магнитного поля по данным космического аппарата «MAGSAT» [10], показывающая магнитные аномалии в районе подхода к поверхности Южно-Африканского (1), Чилийского (2), Гавайского (3), Восточно-Азиатского мантийных плюмов (4).

Наличие мантийного плюма на юге Африки подтверждено нами по данным сейсмических исследований (рис. 2).



Рис.2. Карта, фиксирующая распределение сейсмоактивных глобальных глубинных разломных зон (1, 2) и зон поднятия Южно-Африканского (3) и Чилийского (4) мантийных плюмов, по данным о глубине расположения очагов землетрясений, возникших за период работы на орбите космического аппарата «MAGSAT» [8, 9].

На рис. 3 представлен спутниковый магнито-индукционный разрез литосферно-ионосферных неоднородностей Земли, пересекающий зону Южно-

Африканского мантийного плюма.



Рис. 3. Субмеридиональный магнито-индукционный разрез геосфер Земли с изображением электромагнитной структуры Южно-Африканского мантийного плюма, рассчитанная по данным спутниковых геомагнитных измерений [9]. 1 – активная электромагнитная зона Южно-Африканского мантийного плюма; 2 – электромагнитная зона невозмущенной мантии; 3 – граничная градиентная винтообразная зона повышенной дегазации мантии в пределах мантийного плюма; 4 – размер ячейки Южно-Африканского мантийного плюма. Горизонтальная шкала – расстояние в километрах от высоты полета КА «СНАМР».

Из рис. З видно, что в нижней мантии и переходном слое мантии имеется почти вертикальный канал дегазации глубинного вещества (в том числе радона и УВ), которое дегазируется скорее всего от границы внешее ядро-мантия. Как видно из разреза, основанного на экспериментальных спутниковых магнитных данных (рис. 3) [9] наблюдается винтообразная мантийная конвекция, которая оказывает влияние на почти вертикальный канал, приводящий к образованию устойчивых винтообразных электоромагнитных неоднородностей в ионосфере, совподающих по месторасположению с устойчивой во времени аномалией радиационного фона (рис. 4).



Рис.4. Карта устойчивой аномалии радиационного фона в районе Южной Атлантики [6],

предположительно вызванная Южно-Африканским (1) и Чилийским (2) мантийными плюмами.

Выводы

- 1. Показано, что Южно-Африканский мантийный плюм по своим винтообразным каналам, по-видимому, может обеспечивать миграцию глубинных мантийных газов (радон, углеводороды) к поверхностным зонам их накопления и даже создать в ионосфере устойчивую во времени и пространстве электромагнитную неоднородность.
- 2. Проанализированные экспериментальные геолого-геофизические данные позволяют сказать, что океанической зоне вертикального подъема вокруг Южно-Африканского мантийного плюма, в донных осадках имеется большое количество железных (до 16%), марганцевых (до 2%) и урановых руд, обычно входящих в состав нефтей.

Литература

- 1. Геолого-геофизический атлас Индийского океана. М.: Главное управление по геодезии и картографии, 1975, 151 с.
- 2. Ботт М. Внутреннее строение Земли. М.: Изд-во «Мир», 1974, 375 с.
- 3. Диц Р., Холден Дж. Распад пангеи. В сборнике статей «Новая глобальная тектоника», С. 315-321.
- 4. Николаев А.В. Проблемы геотомографии. М.: Наука, 1997, 336 с.
- 5. Ротанова Н.М., Харитонов А.Л., Фрунзе А.Х. Аномальные магнитные поля из измерений на спутнике СНАМР // Геомагнетизм и аэрономия, 2005, № 5, С. 712-720.
- 6. Сергиенко Н.П., Харитонов А.Л. Краткосрочные магнитосферно-ионосферные предвестники катастрофических землетрясений // Исследование Земли из космоса, 2005, № 6, С. 61-68.
- 7. Серкеров С.А. Корреляционные методы в гравиразведке и магниторазведке. М.: Недра, 1986, 250 с.
- 8. Харитонов А.Л., Хассан Г.С., Серкеров С.А. Исследование глубинного строения по спутниковым магнитным и гравитационным данным // Исследование Земли из космоса, 2003, № 1, С. 28-38.
- 9. Харитонов А.Л., Хассан Г.С., Серкеров С.А., Фонарев Г.А., Харитонова Г.П. Использование комплекса спутниковых геофизических данных для изучения глубинных неоднородностей строения тектоносферы Земли в пределах Европейско-Африканского меридионального сектора // Исследование Земли из космоса, 2007, № 2, С. 34-42.
- 10. Langel R.A. The use of lower altitude satellite data bases for modeling of core and crustal fields and the separation of external and internal fields // Surveys in Geophysics, 1993, V. 14, PP. 31-87.

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КОРЫ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ

Харитонов А.Л.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия ahariton@izmiran.ru

GEOLOGIC-GEOPHYSICAL RESEARCHES OF THE TECTONIC STRUCTURE OF THE CRUST IN THE SHELF ZONE OF THE EASTERN ARCTIC Kharitonov A.L.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The purpose of the work is the introduction of new high – performance geological and geophysical methods of satellite magnetic and gravity prospecting to determine the tectonic structure of the crust and the prospects of oil and gas potential of the shelf zones of the Eastern Arctic adjacent to the territory of the Russian Federation.

Некоторые данные об изученности шельфовых зон Восточной Арктики

В настоящее время территория континентального шельфа Российской Федерации, на которой могут проводиться в настоящее время буровые и эксплуатационные работы по добыче нефти и газа, в соответствии с международными законами, пока ограничена двухсотмильной зоной от береговой линии России (рис. 1).



Рис. 1. Схема условного раздела недр под акваторией глубоководной части Северного Ледовитого океана. Территория расширенного континентального шельфа Российской Федерации (РФ) в пределах 200-мильной зоны (синяя линия). Коричневой точечной линией обозначена условная линия разграничения между странами (РФ, США, Канада, Дания, Норвегия) территории Северного Ледовитого океана, для нефтегазодобычи. Серым цветом выделена глубоководная область Восточной Арктики, на которую РФ подала заявку в международные организации на присоединение к владениям Российской Федерации [1].

Региональные геолого-геофизические исследования недр В российской акватории Северного Ледовитого океана, и в частности его шельфовой части, до недавнего времени проводилось в основном такими организациями «ВНИИокеанология» [1]. научными «ААНИИ». «ИЗМИРАН» - «ИФЗРАН» [2], ОАО «СЕВМОРГЕО» и другие, с помощью геофизической аппаратуры, установленной на дрейфующих полярных станциях «Северный полюс» и вдоль одиночных арктических геотраверсов ледокола «Арктика», а также с помощью полярной авиации вдоль некоторой сети профилей (рис. 2).



Рис. 2. Схема проводимых геолого-геофизических исследований на акватории Северного Ледовитого океана в российском секторе Арктического региона: с помощью научных станций на дрейфующих льдах «Северный полюс - СП» – коричневыми кривыми; красными жирными линиями выделены геотраверсы ледокола «Арктика»; оранжевыми, зелеными, лиловыми линиями показаны маршруты аэромагнитных съемок в пределах Северного Ледовитого океана [1].

Используемые методы измерений и методы компьютерного анализа

К сожалению даже самые мощные и лучшие в мире отечественные ледокольные суда с атомным двигателем могут относительно свободно перемещаться в пределах Северного Ледовитого океана лишь в осеннелетний период и в благоприятные по погодным условиям годы. Поэтому, кроме наземных и морских геолого-геофизических данных, автор предлагает использовать данные космических аппаратов (магнитных, гравитационных, температурных съемок), которые могут осуществлять бесперебойные всесезонные длительные повторные измерения (в течение (H, Z) составляющих нескольких лет) всех ортогональных D, геомагнитного поля и альтиметрические (гравитационные) измерения (рис. 3), которые можно использовать для изучения тектонического [3] строения коры прибрежного шельфа этого очень перспективного Арктического нефтегазового бассейна.



Рис. 3. Альтиметрические (гравитационные) аномалии по данным космического аппарата «СНАМР», показывающие коричневым цветом зоны расположения активных в настоящее время рифтовых структур Земли, особенно активных в пределах шельфовой зоны Восточной Сибири (II а).

В настоящее время нами используются магнитные и гравитационные (альтиметрические) данные низкоорбитальных космических аппаратов работающих в настоящее время на орбите Земли КА «SWARM» (2010 – 2018 гг.) и других раннее работавших космических аппаратов «CHAMP», «MAGSAT», измеряющих значения ортогональных компонент вектора электромагнитного поля над всей поверхностью Арктического нефтегазового бассейна и, в частности, над труднодоступной для других видов геофизических измерений в пределах акватории Северного Ледовитого океана.

Для математической обработки и геофизической интерпретации аэрокосмических данных была разработана система компьютерных различные программ, включающая современные спектральные, корреляционные [4] и другие методы анализа [5] измеренных цифровых позволяющие исключать ошибки измерений и разделять данных, измеренное поле на составляющие, связанные с различными физическими слоями геосфер Земли (рис. 4).



Рис. 4. Схема системы компьютерных программ, используемых для математической обработки и интерпретации измеренных на космических аппаратах магнитных данных [3].

Заключение

По результатам проведенных региональных геолого-геофизических исследований коры, включая спутниковые магнитные и альтиметрические съемки, в шельфовых зонах Северного Ледовитого океана, омывающего территорию Восточной Сибири выделены перспективные зоны для постановки детальных геолого-разведочных работ на поиски месторождений нефти и газа.

Литература

- 1. Каминский В.Д. Глубинное строение Центрального Арктического бассейна // Автореферат на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. С-Петербург. 2009. 47 с.
- Харитонов А.Л., Хассан Г.С., Серкеров С.А., Фонарев Г.А., Харитонова Г.П. Использование комплекса спутниковых геофизических данных для изучения глубинных неоднородностей строения тектоносферы Земли в пределах Европейско-Африканского меридионального сектора // Исследование Земли из космоса. - 2007. -№ 2. - С. 34 – 42.
- 3. Харитонов А.Л. Программное обеспечение для технологии спутникового мониторинга и прогнозирования аварийных ситуаций на объектах нефтегазового // Материалы 5-ой научно-практической конференции «Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение». МГУ им. М.В.Ломоносова. - 2016.
- 4. Ротанова Н.М., Харитонов А.Л., Ан Ченчанг. Спектральный анализ магнитного поля, измеренного на спутнике МАГСАТ // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39. № 3. С. 101-107.
- 5. Ротанова Н.М., Головков В.П., Фрунзе А.Х., Харитонов А.Л. Анализ спутниковых измерений с помощью разложения поля на естественные ортогональные составляющие // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т.39. №4. С. 92-99.

АЭРОМАГНИТНЫЕ И ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ АЛДАНСКОЙ ПАЛЕО-ПЛЮМ-ТЕКТОНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Харитонова Г.П., Харитонов А.Л.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия ahariton@izmiran.ru

AEROMAGNETIC AND GEOLOGIC-GEOPHYSICAL RESEARCHES OF THE TECTONIC STRUCTURE OF THE ALDAN PALEO PLUME TECTONIC STRUCTURE

Kharitonova G.P., Kharitonov A.L.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

In the paper we analysed data of regional Aldan profile of multilevel aero magnetic measurements and results of its geologic-geophysical interpretation. The Aldan profile about 750 kilometers long crosses from the West to the east the territory of the Aldan paleo plume tectonic structure.

Постановка задачи, используемые данные, применяемая методика

Изучение региональных физических неоднородностей глубинного тектонического строения земной коры может позволить определять структуру приповерхностных месторождений полезных ископаемых, поэтому без использования региональных аэромагнитных методов [1, 2], выполненных в комплексе с некоторыми другими геофизическими проводить поиски новых месторождений методами немыслимо труднодоступных регионах Арктики, Восточной Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации. Поэтому в данной работе, в качестве примера, рассматриваются результаты геофизической интерпретации региональных многоуровневых аэромагнитных измерений над территорией Алданской палео-плюм-тектонической структуры. В ряде опубликованных работ [1, 2] показано, что для выделения слабоконтрастных магнитных объектов в земной коре могут быть использованы многоуровневые наблюдения потенциальных полей (например, магнитного), что несколько расширяет возможности геофизической интерпретации. Для анализа многоуровневых аэромагнитных модульных (скалярных) измерений по профилям «Алдан» был использован метод пространственно-временной магнитной градиентометрии (ПВМГ). Этот метод, может быть применен при наличии данных вертикального градиента потенциала магнитного поля. Также могут быть использованы данные конечных разностей поля, отнесенных к длине вертикально ориентированной базы датчиков поля или к расстоянию по высоте между уровнями наблюдений. Применяемый метод позволяет оценить глубины верхних кромок намагниченных (или геологических объектов. если предположительно известна гипотетически задана) форма элементарного намагниченного тела. При этом необходимо, чтобы значения измеренных полей или их вертикального градиента были свободны от трендов линейного (первого) и более высоких порядков, то есть кривые измеренных полей должны быть выведены на нулевой уровень, ОТ которого отсчитываются амплитуды средний небольшой аномалий. При глубине залегания сравнительно объектов магнитоактивных геологических данный метол работает несколько лучше, чем при глубоком их залегании. На региональном профиле «Алдан-1», в пределах Алданской палео-плюм-тектонической структуры, были проведены аэромагнитные измерения, на четырех высотах съемки с помощью буксируемых за самолетом модульных магнитометров, для определения так называемого «курсового вертикального градиента» полного индукции модуля вектора геомагнитного поля. В конечном счете, при проведении аэромагнитных съемок В этих регионах с использованием метода ΠΒΜΓ по пространственно-временным координатам, на каждой точке измерений аномалий постоянного выделялись значения магнитного поля ОТ источников в земной коре с некоторыми небольшими помехами и уже по ним проводились определения глубины магнитоактивных источников.

Геомагнитный разрез вдоль профиля «Алдан-1», составленный на основе полученных автором результатов решения обратной задачи по многоуровневым измерениям аномального магнитного поля и его сравнение с материалами гравиметрических исследований приведено на рис. 1 и рис. 2.



Рис. 1. Глубинный геомагнитный разрез земной коры вдоль регионального аэромагнитного многоуровневого профиля «Алдан-1».


Рис. 2. Глубинный плотностной разрез земной коры вдоль регионального геофизического профиля «Алдан-1» по данным гравитационного поля [4].

Сведения о морфологии границ трех основных физических слоев коры (осадочного, "гранитного", "базальтового") земной вдоль профиля получены рассматриваемого были путем совместной интерпретации материалов многоуровневой аэромагнитной сьемки и гравиметрических данных. То есть можно определенно сказать, что такой метод решения обратной задачи позволяет очень четко определять местоположение на профиле и глубину разломных тектонических структур (рис. 1 и рис. 2).

Для определения сложного рельефа поверхности магнитоактивных границ земной коры, разбитой разломными структурами, и вариаций вертикальной мощности магнитоактивных слоев использовалась созданная авторами компьютерная методика. Глубина большинства тектонических разломов по опубликованным данным [3] соответствует результатам интерпретации многоуровневых аэромагнитных данных выделяющих все основные глубинные границы, в том числе и нижнюю кромку земной коры (поверхность Мохоровичича). Таким образом, можно заключить, что большая часть глубинных характеристик разломных структур, опубликованной приведенных на карте [3] подтверждается аэромагнитными, гравиметрическими [4] данными.

Заключение и выводы

Использованные многоуровневые методы геофизической интерпретации позволяют без привлечения априорной информации

определять глубину до аномалиеобразующих геологических тел, делать количественное разделение на слабо и сильно магнитные породы (по их магнитной восприимчивости), определять горизонтальные и вертикальные размеры этих тел. При наличии некоторой дополнительной информации эти методы позволяют делать обоснованные предположения о форме и физических свойствах геологических тел. Высокая точность метода подтверждается не менее, чем 70% совпадением выделенных вдоль этого профиля глубинных разломов, определенных по данным аномального магнитного поля, с разломами, трассируемыми по геологическим данным на карте глубинных разломных структур [3]. Таким образом, можно сделать вывод. ЧТО данная методика выделения вертикальных И горизонтальных магнитоактивных границ земной коры работает достаточно хорошо. Приведенные примеры, представляется, как свидетельствуют о достаточно высокой эффективности интерпретации многоуровневых измерений аномального магнитного поля при изучении глубинного строения Алданской палео-плюм-тектонической структуры. Приведем основные выводы данного доклада.

1). На примере аэромагнитных измерений, выполненных над Алданской палео-плюм-тектонической структурой, проанализировано применение разработанного метода пространственно-временной магнитной градиентометрии (ПВМГ), который можно использовать для исследования глубинного строения земной коры.

2). Выявлены новые глубинные тектонические разломы в пределах Алданской палео-плюм-тектонической структуры и уточнено расположение разломов, представленных на существующей карте глубинных разломов [3].

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Цветков Ю.П., Ротанова Н.М., Ораевский В.Н., Харитонов А.Л., Одинцов С.Д. Аномальное геомагнитное поле по градиентным измерениям на стратосферных высотах // Геомагнетизм и аэрономия. № 1. С. 136-142. 1996.
- 2. Пронин В.П., Харитонов А.Л. Использование результатов разновысотных статистических характеристик аномального магнитного поля для оценки мощности магнитоактивного слоя земной коры // Препринт ИЗМИРАН. № 11(958). 1991.
- 3. Ананьева Е.М., Беляев И.В., Головин И.В. и др. Схема зон глубинных разломов территории СССР, масштаб 1:10 000 000 // ВСЕГЕИ. 1977.
- 4. Стогний В.В. Тектоническая расслоенность Алдано-Станового геоблока (по геолого-геофизическим данным) // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. М. 30 с. 1996.

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ БАЗЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «КОСМОС-49» ПОД РУКОВОДСТВОМ Ш.Ш. ДОЛГИНОВА – СОРАТНИКА Н.В. ПУШКОВА

Харитонова Г.П., Харитонов А.Л.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия galina@izmiran.ru

CREATION OF DIGITAL BASE OF THE COSMOS-49 SPACECRAFT UNDER THE LEADERSHIP OF SH.SH. DOLGINOV – THE COLLEAGUE N.V. PUSHKOV

Kharitonova G.P., Kharitonov A.L.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

In the paper we analysed the hystory of the creation and some data of world magnetic measurements of spacecraft «Cosmos-49» and results of its geophysical interpretation.

Введение

Для проведения исследований по программе «Мировая магнитная съемка», планируемой в Советском Союзе и США перед академией наук СССР была поставлена задача создания отечественного спутника, который бы обеспечил выполнение магнитной съемки как минимум на всей территории СССР, а как максимум на всей территории Земли. В связи с этим событием перед дирекцией ИЗМИРАН, в лице Николая Васильевича Пушкова, была поставлена задача в кратчайшие сроки разработать магнитометр, который мог быть установлен на отечественном космическом аппарате (КА) для проведения мировой магнитной съемки [1]. Решение этой задачи было поручено сотрудникам лаборатории ИЗМИРАН, возглавляемой Шмайя Шлемовичем Долгиновым. Благодаря самоотверженному труду инженеров коллектива этой лаборатории (д.ф.м.н. Козлов А.Н., Чинчевой М.М., Жузгов Л.Н., Наливайко В.И., Тюрмин А.В., Захаров П.И., Каминер Н.С., Бузин В.Б.) эта задача была выполнена в срок и магнитометры ИЗМИРАН были разработаны, технически созданы И установлены на космический аппарат «Космос-49» [2]. И хотя до запуска искусственного спутника Земли (ИСЗ) «Космос-49» были и другие запуски спутников с магнитометрами на борту (например, «Космос-26»), но наиболее полные и точные данные о магнитном поле Земли были получены именно с помощью спутников «Космос-49» (рис. 1).

Активная высота полета КА «Космос-49», где производились измерения магнитного поля составляла примерно 240-490 км. Наклон орбиты спутника «Космос-49» около 75 градусов обеспечивал проведение однородной магнитной съемки почти на 75% поверхности Земли. Это был большой прорыв СССР в области исследования космического пространства и магнитного поля Земли.



Рис. 1. Типичные значения разностей δT между измеренными ΔT_i и вычисленными значениями геомагнитного поля на космическом аппарате «Космос-49». І и ІІ – графики разности измеренного геомагнитного поля ΔT_i для двух вариантов аналитического представления геомагнитного поля на повторяющихся 56-м и133-м витках КА «Космос-49»; δT – кривые разности значений геомагнитного поля для повторных витков ($\Delta T_{56} \Delta T_{133}$) КА «Космос-49».

Предварительная обработка аналоговых данных космического аппарата «Космос-49»

Далее перед коллективом ИЗМИРАН встала задача обработки полученных со спутника «Космос-49» данных по измеренному магнитному полю почти на всей территории Земли. Было получено около 18000 измерений абсолютных значений скалярного магнитного поля Земли. Здесь, на первом этапе обработки, вместе с лабораторией Шмайя Шлемовича Долгинова [3], большую роль сыграла группа сотрудников, возглавляемая доктором физико-математических наук Натальей Павловной Беньковой занимавшаяся обработкой аналоговых данных и других спутников Земли (рис. 2). Первая группа, возглавляемая Н.П. Беньковой, совместно с А.Н.Пушковым, впервые в СССР произвела расчет значений главного магнитного поля Земли и построила его карты для всей территории спутниковой магнитной съемки.



Рис. 2. Карта значений векового хода модуля индукции геомагнитного поля по данным космического аппарата «Космос-321».

Создание цифровой базы космического аппарата «Космос-49»

Затем другая группа сотрудников лаборатории космических исследований ИЗМИРАН, возглавляемая кандидатом физико-математических наук Лией Овсеевной Тюрминой начала сложную работу по переводу аналоговых данных измеренного геомагнитного поля КА «Космос-49», представленного на магнитных лентах в цифровой машиночитаемый вид на CD-диске. Эту тяжелую кропотливую работу проводила группа инженеров – Шарова В.И., Харитонова Г.П. В результате этой работы была создана цифровая база магнитных измерений космического аппарата «Космос-49». На память осталась одна фотография, когда в лаборатории магнитных космических исследований ИЗМИРАН, 9-го мая отмечали праздник – День победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 годов и создание цифровой базы магнитных измерений космического аппарата «Космос-49» (рис. 3). В последствии эту знаменитую лабораторию магнитных космических исследований ИЗМИРАН возглавлял доктор физико-математических наук Рузмайкин А.А. Сейчас новые разработки спутниковых магнитометров в этой лаборатории ведутся под руководством кандидата физико-математических наук Стяжкина В.А.



Рис. 3. На фото представлены (справа на лево) первый руководитель лаборатории магнитных космических исследований ИЗМИРАН – доктор физико-математических наук, профессор Долгинов Ш.Ш., лаборант лаборатории Тихонова Т.С., инженер этой лаборатории Харитонова Г.П.

Литература

- 1. Долгинов Ш.Ш., Жузгов Л.Н., Пушков Н.В., др. Измерение геомагнитного поля спутником «Космос-49» // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 2. № 6. с. 1061-1075. 1962.
- 2. Долгинов Ш.Ш., Наливайко В.И., Тюрмин А.В., Чинчевой М.М. Исследование космического пространства. М.:Наука, с. 606-615. 1965.
- Долгинов Ш.Ш., Наливайко В.И., Орлов В.П., др. Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряженности геомагнитного поля вдоль орбит спутника «Космос-49» // М.: ИЗМИРАН. Ч. 1. 245 с., Ч. 2. 238 с., Ч. 3. 206 с. 1967.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РИТМЫ СОЛНЦА

Цветков Е.П., Цветков¹ Ю.П.

¹ИЗМИРАН г. Москва, г. Троицк, Россия E-mail: tsvetkov@izmiran.ru

THE THERMONUCLEAR RHYTHMS OF THE SUN

Tsvetkov E.P., Tsvetkov¹ Yu.P.

¹IZMIRAN Moscow, Troitsk, Russia E-mail: tsvetkov@izmiran.ru

The cycles of air temperature of the earth's atmosphere correlating with the solar day were found. The mechanism of occurrence of temperature cycles is offered. Their connection with the process of star formation and with the model of the Sun is shown.

Мы живем практически в атмосфере Солнца и влияние его на все процессы на Земле очень значимо. Из большого фактического материала, представленного академиком А.Л. Чижевским [1], очевидна корреляция активности Солнца с метеорологическими условиями на Земле, с зарождением электрических, магнитных воздушных И бурь, С вулканической деятельностью, с урожайностью злаков и плодов, с рождаемостью И смертностью людей, co эпидемий. вспышками психическими заболеваниями и т.д.

Актуально изучение Солнца и с астрономической точки зрения. Земле уникальную Близость Солнца к создала естественную астрофизическую лабораторию солнечно-земную С возможностью визуального, порою невооруженным даже глазом, наблюдения физических процессов на звезде. Однако физику Солнца мы знаем еще в недостаточной степени, в частности нам неизвестны механизмы 11- летних циклов солнечной активности, их влияния на атмосферу и биосферу Земли. Возможности простой диагностики солнечных недр и посвящен данный доклад.

Температура воздуха, его влажность и давление отслеживаются на Земле множеством метеостанций. Обычно суточный ход температуры воздуха записывается в непрерывном режиме. Однако у этой методики есть как плюсы, так и минусы, допускающие потерю ценной информации.

В 90-х годах прошлого века при ежедневной фиксации полуденной (в 12.00) и полуночной (24.00) температур воздуха были замечены регулярные температурные циклы. Регистрация температурных циклов, проведенная в феврале-марте 2019 года, показала, что каждый цикл представляет собой двенадцати - четырнадцати суточное повышение температуры воздуха на фоне годовой сезонной ее динамики (рис.1).



Рис. 1. Температурные циклы (II.2019-III.2019гг.). На нижней кривой показаны циклы солнечной активности [2.с.210].

Оказалось, что существует корреляция температурных циклов с циклами солнечной активности (на нижней кривой рис.1 приведен для сравнения их вид[2.с.210]). А это открывает возможность простого зондажа процессов в недрах Солнца. Поскольку светимость солнечного диска постоянна с высокой точностью за много миллион- ной период времени, можно предположить связь темпера-турных циклов с выбросами звездой потоков водородной плазмы. Причиной этих выбросов могут быть пульсации энерго-выделения в недрах Солнца, если хорошо известный протон – протонный термоядерный процесс в нем [2]:

$${}^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}D + e^{+} + v + 1.44 \text{ M}\Im\text{B}$$

$${}^{2}D + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma + 5.49 \text{ M}\Im\text{B}$$

$${}^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + {}^{1}H + {}^{1}H + 12.85 \text{ M}\Im\text{B}$$

не стационарный, а быстро пульсирующий.

Физика циклов энерговыделения в звезде обсуждалась еще в прошлом веке в связи с нейтринной проблематикой. Термоядерный механизм разогрева Солнца, предложенный в то время, можно было подтвердить регистрацией солнечных нейтрино. Эксперимент, выполненный в США Девисом, действительно зафиксировал солнечные нейтрино, но интенсивность потока их оказалась в три раза слабее теоретически предсказанной. Сегодня эта разница объясняется нейтрино, но в прошлом проблема нестыковки осцилляцией веке

эксперимента с теорией была злободневной. Для решения проблемы предполагалась периодичность энерговыделения в центральной области Солнца, вызванная колебаниями в ядре концентрации изотопа ³*He*.

«В обычных условиях недр Солнца концентрация этого изотопа поддерживается динамическим равновесием между ядерными реакциями, ведущими к его образованию и уничтожению. Расчеты показывают, что максимальная концентрация изотопа ³*Не* достигается на расстоянии 0.6 солнечного радиуса. Представим себе теперь, что по какой-либо причине произошло внезапное перемешивание солнечных недр. Оно должно повлечь за собой значительное увеличение концентрации ³*He* в области центра Солнца, так как туда поступит материал, где концентрация ³Не выше. Так как концентрация этого изотопа определяет скорость протон – протонной реакции, энерговыделение резко возрастает» [2]. Причина перемешивания «может быть связана с циркуляцией вещества солнечных будет меридианном направлении, в которая как бы недр "транспортировать" вращательный момент Солнца от его периферических слоев к центру. В результате центральные области Солнца начнут вращаться значительно быстрее, чем периферия. Такая ситуация должна неустойчивости, которая будет "сбрасываться" приводить к перемешиванием» [2]. Расчет, однако, показал что такое перемешивание солнечных недр может дать периодичность циклов порядка сотни миллионов лет. Фактический же материал (рис.1) свидетельствует о существовании механизма перемешивания недр звезды в несколько суток. Природа скоростного перемешивания солнечных недр может быть следующей.

После сжатия водорода в протозвезде и начала термоядерного процесса в ней протозвезда сохраняет себя от перегрева сбросом энергии в космос излучением. Но как только недра протозвезды потеряют прозрачность, излучательный энергообмен в ее недрах прекращается, о чем звезда сигнализирует ИК-вспышкой. На смену излучательного энергообмена включается В недрах протозвезды конвекционная Формированием протозвезде теплопередача. В ЗОНЫ конвекции И завершается созревание протозвезды. Она становится звездой. При этом возникает вторая ИК-вспышка. Именно вторая ИК-вспышка, по нашему мнению, и запускает волновой процесс во внешней относительно ядра зоне звезды, то есть в зонах излучательного и конвекционного энергопереносов.

Начиная с момента формирования зоны конвекции, волна излучения и плотности будет совершать возвратные движения между границей энерговыделения в ядре звезды и внешней границей звезды, на которой звезда выбрасывает в космос порцию водородной плазмы. Вот этот-то выброс плазмы и создает повышение температуры земной атмосферы. Тот температурный цикл воздуха, который мы и фиксируем. По современной модели Солнца в его центре имеется ядро с размером около 0.25 радиуса Солнца, то есть сфера энерговыделения с радиусом около 1.5×10^5 км. Вся остальная часть Солнца до границ его диска, то есть сферический слой толщиной около 5.5×10^5 км, представляет собой зоны излучения и конвекции с челночной волной уплотнения, средняя скорость движения которой имеет величину около 0.5 км $\times c^{-1}$.

Модель Солнца предполагает плавное нарастание содержания водорода в ядре от 50% до 75% на его границе и постоянную затем концентрацию водорода до границ диска. Концентрация же изотопа ³*He* в недрах светила максимальна на растоянии около 0.6 радиуса звезды. То есть ${}^{3}He$ имеет повышенное содержание в конвекционной зоне, где сжатия вещества. Челночная активен волновой процесс волна, курсирующая между границами ядра, и поверхностью Солнца и приводит к последовательности вспышек термоядерных реакций в недрах звезды. Там, где концентрация ${}^{3}He$ окажется достаточной, инициируется термоядерная реакция как в излучательно-конвекционной зоне, так и на внутренней и внешней ее границах. Выброс же ими водородной плазмы в откликается циклами повышения сезонной температуры космос атмосферного воздуха Земли.

Волна быстрого перемешивания солнечных недр может оказаться причиной и 11-летних ритмов солнечной активности. Более медленная их периодичность по отношению к температурным циклам может быть объяснена высокой плотностью вещества в ядре (примерно в сто раз большей плотности в периферийных зонах звезды). В этой ситуации волна перемешивания, периодически возмущающая недра ядра, будет порционно обогащать ядро изотопом ${}^{3}He$. Требуется, видимо, восемь-девять сотен возмущающих воздействий волны, то есть 10÷12 лет, чтобы обогатить ядро достаточной для термоядерной вспышки концентрацией ³*He*. Высокая плотность вещества в ядре обеспечивает синхронность термоядерных реакций во всем его объеме, что и проявляется в большой мощности взрыва. В периферийных же зонах ситуация иная. Поэтому излучательно-конвекционной ячейки в зоне слоисты И вспышки энерговыделения в них менее мощные.

Одиннадцатилетние ритмы солнечной активности редки, но значительно мощнее вспышек энерговыделения в периферийных зонах Солнца. В 2019 году ожидается очередной одиннадцатилетний цикл. Повидимому он очень слаб и поэтому прогнозируется сильное похолодание воздуха в мае месяце. Однако это маловероятно, потому что на температуру влияет плазменный выброс Солнца, скорость которого на пути к земле мала. Он может достигнуть нашей планеты только через несколько лет. Обнаружены регулярные температурные циклы воздуха земной атмосферы. Природа циклов связана с ритмами термоядерных процессов, возникающими при волновом перемешивании солнечных недр и ритмичного повышения концентрации изотопа ³*He* до величины, обеспечивающей термоядерный взрыв.

Температурные циклы атмосферного воздуха Земли хорошо вписываются в современную модель Солнца и согласуются с теорией рождения звезд. Регистрация температурных циклов атмосферного воздуха открывает возможность дистанционного зондажа солнечных недр. Учет циклов температуры при прогнозировании погоды на Земле поможет повысить его точность. Используя температурные ритмы, каждый обладатель бытового термометра может дать точечный, с привязкой к своему дому, и достаточно точный прогноз погоды минимум на полмесяца вперед.

Литература

 Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь // М.:Мысль, 1976.367с.
Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть//М.:Наука, 1984.384с.

МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ, ИЗМЕРЕННЫЕ НА ТЕРРИТОРИИ ТИХООКЕАНСКОЙ МОРФОСТРУКТУРЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТИПА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Чегис В.В., Харитонов А.Л.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия chegisvv@gmail.com

MAGNETIC ANOMALIES, MEASURED ON THE TERRITORY OF PACIFIC OCEAN MORPHOLOGICAL STRUCTURE OF CENTRAL TYPE AND RESULTS OF ITS GEOLOGIC-GEOPHYSICSAL INTERPRETATION

Chegis V.V., Kharitonov A.L.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

All identified morphological structures of the central type observed on the Earth's surface, according to statistical data, are divided into twelve main classes, the spatial dimensions of which range from several meters to thousands of kilometers in diameter. Examples of deep sections crossing Pacific ocean morphological structure of the central type, identified by a set of different geological and geophysical data (satellite electromagnetic, sea magnetic) are given.

Широко американского геофизика Кэри известна гипотеза 0 расширении геометрических постепенном эволюционном размеров (диаметра, объема) Земли, происходившего в течение многих миллионов лет. Цель статьи – по результатам измерений палеомагнитных аномалий морского дна в пределах Тихого океана показать, что подтверждается геолого-геофизический механизм постепенного расширения размеров Земли за счет разрастания плюм-тектонических структур (морфоструктур центрального типа) в океанических областях Земли. Для подтверждения выдвинутой гипотезы автором были проанализированы данные [1], которые представлены на (рис. 1).

Кроме того, по данным дешифрирования космических снимков поверхности рельефа Земли различными авторами [2, 3] было выявлено множество морфоструктур центрального типа (МСЦТ) разного вида (кольцевые, эллипсовидные, полукольцевые) и пространственного размера (от нескольких сотен метров до нескольких тысяч километров в диаметре). По своим пространственным размерам морфоструктуры центрального типа (МСЦТ) можно разделить на несколько структурных классов (порядков).



Рис. 1. Карта полосовых магнитных аномалий Мирового океана [1].

Таблица №1.

Пространственные размеры (диаметры) морфоструктур центрального типа (МСЦТ) первых 12 порядков, выявленных по различным статистическим геологогеофизическим данным.

№ порядка МСЦТ	Диаметр МСЦТ (км)
1-й порядок МСЦТ	12000 - 16 000
2-й порядок МСЦТ	4000 - 10 000
3-й порядок МСЦТ	1000 - 1500
4-й порядок МСЦТ	500 - 750
5-й порядок МСЦТ	200 - 300
6-й порядок МСЦТ	75 - 85
7-й порядок МСЦТ	30 - 50
8-й порядок МСЦТ	20 - 30
9-й порядок МСЦТ	8 - 10
10-й порядок МСЦТ	1 - 5
11-й порядок МСЦТ	0.1 – 1.0
12-й порядок МСЦТ	Менее 0.1

По результатам проведенного геофизического анализа автором выявлена корреляционная взаимосвязь пространственного (географического) расположения морфоструктур центрального типа 1-го порядка, проявляющихся в структуре поверхности рельефа Земли (рис. 2) и кольцевых структур, образованных цепочками полосовых магнитных аномалий, расположенных на дне Тихого, Индийского и Атлантического океанов (рис. 1).



Рис. 2. Схема расположения морфоструктур центрального типа 1-го и 2-го порядков, проявляющихся в структуре рельефа поверхности Земли [3].

На рис. 2 изображены основные, известные в настоящее время, морфоструктуры центрального типа 1-го и 2-го порядков, расположенные на территории Земли [3], образовавшиеся в результате возникновения активных плюм-тектонических структур [4]. В частности, на поверхности дна Мирового океана и примыкающих к нему территориях расположены морфоструктуры центрального типа такие как: І – Тихоокеанская, ІІ – Атлантическая, III – Индоокеанская, IA – Беринговоморская, I-II – Наска, – Мадагаскарская, III-I – Филиппинская. Большинство II-I этих морфоструктур центрального типа возникло в процессе различных периодов геологической эволюции Земли. Судя по датировке палеомагнитных данных о полосовых магнитных аномалиях Мирового океана, морфоструктуры центрального типа 1-го и 2-го порядка, повидимому, образовались на поверхности Земли, в результате выхода на поверхность мантийных плюмов (нуклеаров) в Протерозойский период эволюции Земли. На основании этих палеомагнитных данных можно сделать вывод о постепенном расширении поверхности Земли co скоростью около 5 см в год, за счет увеличения площади океанов, произошедшей в после-Протерозойский период эволюции Земли.

Авторами рассмотрены возможные физические механизмы образования морфоструктур центрального типа [2]. По результатам интерпретации физических полей показано глубинное строение этих морфоструктур центрального типа определяется плюм-тектоническими процессами, происходящими в мантии Земли. На рис. 3 представлен глубинный разрез электромагнитных неоднородностей («трубы дегазации»

Гавайского плюма) мантии, построенный по данным измерений космического аппарата «MAGSAT».



Рис. 3 Глубинный разрез электромагнитных неоднородностей мантии - «трубы дегазации» Гавайского плюма, построенный по данным измерений космического аппарата «MAGSAT» [4].

По результатам применения космических технологий выявлены почти вертикальные электромагнитные неоднородности мантии («труба дегазации» Гавайского плюма) (рис. 3), которые коррелируют с расположением аналогичных глубинных структур [4].

Литература

- 1. Heirtzler J.R., Dickson G.O., Herron E.M., Pitman W.C., Le Pichon X. Marine magnetic anomalies, Geomagnetic field reversals and motions of the ocean floor and continents // Journal Geophys. Res. V. 73. № 6. P. 2119-2136. 1968.
- 2. Соловьев В.В. Карта морфоструктур центрального типа территории СССР. Масштаб 1:10 000 000. (Объяснительная записка). Ленинград. ВСЕГЕИ. 44 р. 1982.
- 3. Кац Я.Г., Тевелев А. В., и др. Основы космической геологии. М.: Недра, 200 с. 1988.
- 4. Харитонов А.Л., Хассан Г.С., Серкеров С.А. и др. Изучение глубинных неоднородностей тектоносферы и мантии Земли по спутниковых магнитным и гравитационным данным // Исследование Земли из космоса. № 3. С. 81-87. 2004.

ПЕКУЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В МИНИМУМЕ 24-ого ЦИКЛА

Черток¹ И.М., Белов¹ А.В., Абунин^{1,2} А.А., Абунина¹ М.А.

¹ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия ²КалмГу, Элиста, Россия <u>ichertok@izmiran.ru</u>

PECULIAR EVENTS OF SOLAR ACTIVITY AND SPACE WEATHER AT THE MINIMUM OF CYCLE 24

Chertok¹ I.M., Belov¹ A.V., Abunin^{1,2} A.A., Abunina¹ M.A. ¹*IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia* ²*Kalmvk State University, Elista, Russia*

We analyzed two sets of the outstanding solar activity and associated space weather disturbances occurred during the minimum of cycle 24. In powerful flares of 4–10 September 2017, parameters of protons arrived to Earth correspond to characteristics of solar radio bursts. On 20–26 August 2018, a filament eruption from the central sector of the solar disk caused the third-intensity geomagnetic storm and a rather weak but peculiar Forbush decrease.

В глубоком минимуме довольно слабого 24-ого цикла, в начале сентября 2017 г. и второй половине августа 2018 г., произошли два значительных ансамбля солнечной активности и возмущений космической погоды.

1. Выдающийся всплеск вспышечной активности 4–10 сентября 2017 г., связанный с рекордно быстрым развитием и усложнением магнитной структуры активной области AR12673 на западной половине диска, включал в себя большое число мощных вспышек, в том числе две самые сильные в цикле вспышки рентгеновского балла X9.3, X8.9 и, по крайней мере, три значительные солнечные протонные события (СПС). Мы проанализировали эти СПС на основе методики количественной радиодиагностики протонных вспышек, разработанной в ИЗМИРАН в 1970–1980-х гг. (см. [1–3]).

Методика исходит из того, что параметры интенсивности микроволновых всплесков на частотах $f \sim 3-15$ ГГц, хотя последние и генерируются электронами, распространяющимися к фотосфере, отражают количество ускоренных частиц, в том числе приходящих к Земле протонов с энергией десятки МэВ. Более того, в [3] было показано, что существует прямая статистическая зависимость между частотным спектром микроволновых всплесков и показателем степенного энергетического спектра наблюдаемых у Земли потоков протонов с энергией десятки МэВ.



Рис. 1. Временные профили рентгеновских вспышек (каналы 0,5–4, 1–8 Å) и потоков протонов (*E*>10, 50, 100 МэВ) у Земли для постэруптивного события 4 сент. 2017 г. с мягким радио и энергетическим спектром (левый ряд) и для мощной длительной вспышки 10 сент. 2017 г. (правый ряд) с жестким радио и энергетическим спектром протонов. В центре - частотный спектр микроволновых всплесков этих двух вспышек.

Сравним две наиболее сильно различающиеся вспышки (Рис. 1). Главной отличительной особенностью вспышки 4 сент. является мягкий радиоспектр с максимальным потоком в интересующем нас диапазоне $S_3 \sim 2000 \text{ sfu}$ (1 sfu = 10^{-22} Вт м⁻² Гц⁻¹) на $f_m \sim 3$ ГГц (фактически частотный спектр достигает пика даже в дециметровом диапазоне). Этим определяются основные оценочные и наблюдаемые характеристики потока протонов: мягкий энергетический спектр с показателем $\gamma \sim 2,7$ (оценка) и $\gamma \sim 3,0$ (наблюдения). Радиоданные дают также правильную оценку масштаба СПС с $J_{10}(>10$ МэВ) в диапазоне 10 - 250 pfu (1 pfu = $1 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{сp}^{-1}$) при наблюдаемой интенсивности $J_{10} \sim 100$ pfu. Указанные характеристики радиовсплеска дают основания предполагать, что в данной вспышке преобладало постэруптивное энерговыделение и ускорение частиц.

Прилимбовая вспышка 10 сент. обладала самым мощным радиовсплском с $S_{15} \sim 21000$ sfu при резком росте радиопотока вплоть до $f_m \sim 15$ ГГц и, следовательно, наиболее жестким частотным спектром. Соответственно, оценки по радиоданным приводят к значительной интенсивности потока протонов $J_{10} \sim 2600$ pfu и расчётному показателю энергетического спектра при энергиях десятки МэВ в диапазоне $\gamma \sim 1,2-1,7$, близкому к наблюдаемому $\gamma \sim 1,4$. Существенно, что такие оценочные параметры соответствуют не только наблюдаемому масштабу и спектру СПС, но также и зарегистрированному в данном случае наземному возрастанию (GLE) потока космических лучей.



Рис. 2. Возмущения космической погоды от эрупции волокна 20 авг. 2018 г. (а) Форбуш-понижение с двумя положительными всплесками. (b) Геомагнитная буря с Dst≈–174 нТл. (c) Векторная диаграмма и вертикальные стрелки, характеризующие экваториальную и северо-южную анизотропию космических лучей.

2. 26 августа 2018 г. неожиданно произошла интенсивная геомагнитная буря (ГМБ) класса G3. Её Dst индекс достиг –174 нТл, что соответствует третьей по интенсивности ГМБ в цикле. Прогнозисты фактически пропустили солнечный источник этой бури и не предсказали её. Однако, анализ показал, что она была инициирована двумя эрупциями волокна и волоконного канала, локализованных в центральном секторе северной половины солнечного диска между северо-восточной и юго-западной корональными дырами. Эрупции наблюдались 20 августа с интервалом около 8 часов в линии H-альфа, а также с помощью ультрафиолетового телескопа SDO/AIA и сопровождались характерными для эрупций двумя протяженными светящимися лентами, расходящимися со временем, и довольно крупными диммингами. При этом не было зафиксировано ни заметного вспышечного повышения потока мягкого рентгена, ни радиовсплесков.

За обеими эрупциями последовали довольно слабые, но заметные корональные выбросы (CMEs), которые наблюдались как гало на коронографе SOHO/LASCO и как направленные к Земле транзиенты на короногафе STEREO-A/COR2, находившегося по углом 108°. Во внутренней короне скорость CMEs была довольно низкой порядка 200–300 км/с. По этой причине соответствующие межпланетные транзиенты (ICMEs) переносились фоновым солнечным ветром, по-видимому, без существенного расширения и достигли Земли только 25 августа. Результирующий транзиент принёс к земной магнитосфере неожиданно сильное поле Вt ≈ 20 нТл с преимущественно южной Вz компонентой почти такой же напряженности (Рис. 2).

Геокосмическое возмущение проявило себя также в форме пекулярного Форбуш-понижения (ФП) потока галактических космических лучей (ГКЛ). Его амплитуда, соответствующая жесткости 10 ГВ и определенная на основе данных мировой сети нейтронных мониторов (НМ) по методу глобальной съемки, была ~1.4 %, что довольно мало для зафиксированной ГМБ класса G3.

На некоторых европейских НМ на фоне ФП наблюдался заметный положительный всплеск потока ГКЛ с подъёмом над фоновой скоростью счёта перед ФП до 3%. В частности, на НМ ИЗМИРАН (MOSC) этот всплеск состоял из двух похожих импульсов с интенсивностью 2,5% и 2,0%, длительностью 4–7 часов и примерно таким же интервалом между ними. В данном событии имела место аномально высокая азимутальная (Axy≈2.9%) и северо-южная (Az≈2.35%) анизотропия ГКЛ. Из Рис. 2 видно, что на НМ ИЗМИРАН 1-ый всплеск наблюдался вблизи пика ГМБ и максимума обеих составляющих анизотропии, а 2-ой всплеск происходил во время наиболее значительных изменений направления азимутальной анизотропии. Отсюда следует, что положительные всплески скорости обусловлены, в основном, анизотропией ГКЛ, хотя вариации жёсткости геомагнитного обрезания тоже внесли свой вклад.

Рассмотренные здесь выдающиеся события, связанные с сильнейшим всплеском вспышечной активности 4–10 сент. 2017 г., а также специфические солнечные эрупции и геокосмические возмущения 20–26 авг. 2018 г., расширяют наши представления о том, какие мощные и пекулярные явления могут происходить в глубоком минимуме солнечного цикла.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 17-02-00308, 17-02-00508) и РНФ (грант 15-12-20001).

Литература

- 1. Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. Результаты количественной диагностики протонных вспышек по данным о радиовсплесках за контрольный интервал 1970–1977 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 20. С. 385–393. 1980.
- 2. Черток И.М. Оценки показателя энергетического спектра протонов по данным о солнечных микроволновых всплесках // Геомагн. и аэрономия. Т. 22. С. 182–186. 1982.
- 3. Черток И.М. Диагностический анализ солнечных протонных вспышек сентября 2017 г. по их радиовсплескам // Геомагн. и аэрономия. Т. 58. № 4. 2018.
- 4. Abunin A.A., Abunina M.A., Belov A.V., Chertok I.M. Peculiar solar sources and geospace disturbances on 20–26 August 2018 // Space Weather, in press, 2019.

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ПОЛЯ, КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Щекотов¹ А.Ю., Беляев² Г.Г.

¹ИФЗ РАН, г. Москва, Россия ²ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия <u>oldresidenr@yandex/ru</u>

LOW-FREQUENCY FIELDS AS A TOOL OF EARTHQUAKE PREDICTION

Schekotov¹ A.Y., Belyaev² G.G.

¹IPE RAS, Moscow, Russia ²IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

This paper devoted to the method of short-term earthquake (EQ) prediction in Kamchatka. Properties of low frequency magnetic fields lie in the basic of the method. We used two seismo-magnetic phenomena:

- seismo-ionospheric depression at frequencies 0.01-0.1 Hz and - seismo-atmospheric radiation at frequencies 1-30 Hz.

В работе показана возможность использования низкочастотных полей для прогноза Камчатских землетрясений. Метод основан на данных, полученных на Камчатке в обсерватории Карымшина, где с 1998 года под руководством проф. О.Молчанова проводились комплексные исследования процессов, связанных с сейсмикой, в том числе сейсмо-электромагнитных явлений. В результате были обнаружены эффекты: сейсмо-атмосферного излучения (~ 1-30 Гц) и сейсмо-ионосферной депрессии (~ 0.01- 0.1 Гц).

Первый эффект вызван флюидами и газами, проникающими из очага готовящегося землетрясения между тектонических плит в Курило-Камчатский и/или Алеутский жёлобы. Затем они поднимаются на поверхность океана и взаимодействуя с атмосферой, вызывают межоблачные и внутри-облачные разряды, являющиеся источником этого излучения. Проекция источника на поверхность океана даёт информацию о примерном положении эпицентра будущего землетрясения, а дата появления о примерном времени события.

Другой эффект сейсмо-ионосферной депрессии так же вызван извержением газов и выражается в подавлении магнитосферных и ионосферных сигналов в окрестности местной полуночи за несколько дней-недель до землетрясения. Величина депрессии зависит от магнитуды ожидаемого землетрясения и позволяет, на основе их статистической зависимости, оценивать величину ожидаемого события. К недостаткам метода следует отнести зависимость от уровня индустриальных помех. На рис. 1. представлена природа возникновения электромагнитных (ЭМ) предвестников.



Рис. 1. Природа возникновения ЭМ предвестников.

На Рис. 2 представлено определение положения эпицентра по параметрам излучения ИЗЛУЧЕНИЕ > ПОЛОЖЕНИЕ ЭПИЦЕНТРА



Рис. 2. Определение положения эпицентра по параметрам поля.

На рис. 3 приведён расчет локальных магнитуд ожидаемого землетрясения по максимальной депрессии компонент поля.



Рис. 3. Расчет локальных магнитуд ожидаемого землетрясения.

На Рис. 4 приведено представление результатов обработки – ежедневный





Рис. 4. Представление результатов обработки.

Процедура прогноза

- 1. Ожидание депрессии ~> 10 тревога! max(DS(f)) > 500 − дополнительный аргумент в пользу тревоги.
- 2. Ожидание прохождения максимума депрессии и определяем его значение. Осталось ~2-30 дней (редко несколько недель).
- 3. Находится пересечение наибольших (по уровню 0.5) лепестков максимального азимутального распределения с разломом и определяется расстояние до его середины и границ.
- 4. Определяются ожидаемые KLS и магнитуду, ожидаем появления EQ с KLS больше минимального и фиксируется результат.

Литература

- 1. Uyeda S. et al, Japanese-Russian Complex Geophysical Observatory in Kamchatka Region for, 433-443, 2002.
- Schekotov, A Monitoring of Phenomena Connected with Seismic Activity, In M. Hayakawa and O. Molchanov, editors, Seismo-Electromagnetics (Lithosphere-Atmosphere- Ionosphere Coupling), TERRUPUB., O. Molchanov, K. Hattori, E. Fedorov, V. A. Gladyshev, G.G. Belyaev, V. Chebrov, V. Sinitsin, E. Gordeev, M. Hayakawa,(2006) Seismo-Ionospheric Depression of the ULF Geomagnetic Fluctuations at Kamchatka and Japan, Physics and Chemistry of the Earth,31,313-318
- Schekotov, A. Y., O. A. Molchanov, M. Hayakawa, E. N. Fedorov, V. N. Chebrov, V. I. Sinitsin, E. E. Gordeev, G. G. Belyaev, and N. V. Yagova ULF/ELF magnetic field variations from atmosphere induced by seismicity, Radio Sci., 42, RS6S90, doi:10.1029/2005RS003441, 2007.
- 4. Schekotov, A., Fedorov E., Molchanov O., Hayakawa M., Low frequency electromagnetic precursors as a prospect for earthquake prediction, "Earthquake Prediction Studies: Seismo-Electromagnetics", ed. by Hayakawa M., TERRAPUB, 2013, pp. 81-99.
- 5. O.A.Molchanov and M.Hayakawa, Seismo-electromagnwetics and related phenomena. History and latest results, TERRAPUB, 2008, Tokyo
- A. Y. Schekotov, O. A. Molchanov, M. Hayakawa, E. N. Fedorov, V. N. Chebrov, V. I. Sinitsin, E. E. Gordeev, S. E. Andreevsky, G. G. Belyaev, N. V. Yagova, V. A. Gladishev, and L.N. Baransky, About possibility to locate an EQ epicenter using parameters of ELF/ULF preseismic emission, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 1237-1242, 2008

ЭНЕРГИЯ И МОЩНОСТЬ ГЕОМАГНИТНОГО ПОТЕНЦИАЛА: СРАВНЕНИЕ СУММ И СПЕКТРОВ ПО ТРЕМ МОДЕЛЯМ.

Яковлева С.В., Старченко С.В.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН ИЗМИРАН, Калужское шоссе 4, Троицк, Москва, 108840 svyakov@izmiran.ru, sstarchenko@mail.ru

ENERGY AND POWER OF A POTENTIAL GEOMAGNETIC FIELD: COMPARISON OF SUMS AND SPECTRA BY THREE MODELS.

Yakovleva and S.V. Starchenko S.V.

Pushkov Institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation, Kaluzhskoe Hwy 4, Troitsk, Moscow, 108840 Russia.

Based on three well-known observational models of the geomagnetic field, the total and spectral variations of energy and power have been analyzed from 1840 to 2020. The energy variations are ~10% and are similar for all models except for the "splash" of the IGRF model in 1945-1950. The average powers close to zero at non-dipole field indicate its almost periodic behavior. The significant power variations show strongly non-linear geodynamo.

Одним из первых Lowes [1] определил радиальную плотность энергии этого поля через стандартные коэффициенты Гаусса (g_n^m, h_n^m) , радиус Земли *а* и сферический радиус *r*:

$$R_n = (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^{2n+4} \sum_{m}^{n} \left[(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2 \right]$$
(1)

Авторы работ [2], [3] получили спектральные составляющие этой энергии:

$$\operatorname{En} = \frac{2\pi a^3}{\mu_0} \left(\frac{a}{c}\right)^{2n+1} \frac{n+1}{2n+1} \sum_{m=0}^n \left[(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2 \right]$$
(2)

Здесь *с* – радиус ядра. Именно эта энергия (2) представляется наиболее адекватной для выявления глобальных временных характеристик наблюдаемого геомагнитного поля и скрытого от наблюдателя геодинамо.

Физически очевидна соответствующая мощность:

$$Pn = dEn/dt.$$
 (3)

для сравнения выбраны три модели геомагнитного поля: GUFM1 [4], COV OBS [5] и IGRF, см. http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html.

На Рис.1 по COV_OBS модели сравниваются вышеупомянутые классические «спектры мощности» (1) у поверхности ядра и Земли с нашим радиально-независимым энергетическим спектром (2) по всему пространству за исключением ядра Земли.



2

Рис.1. Три вида спектров построенных по модели [5]: верхняя группа (I) – традиционные на ядре, нижняя (III) – традиционные на поверхности Земли, средняя группа (II)– истинные как в (2). Серая сплошная линия с ромбиками соответствует эпохе 1840, черная с треугольниками – 1930. серая пунктирная с пустыми кружками – 2020.

На Рис.2 сравниваются различные суммарные энергии, имеющие вариации ~10%. Общая суммарная энергия E=E1+E2+... по-разному ведет себя для GUFM1 и COV_OBS моделей позже 1900г, а IGRF модель имеет «всплеск» в 1945-1950гг. Эти расхождения и «всплеск» сосредоточены в сумме Eod=E1+E3+... нечетных составляющих. Энергии же симметричного относительно оси вращения поля Eax близки к дипольной E1 и согласуются в рассматриваемых моделях. Малая разница E и четных составляющих Eod близка к Eod-E1, выделяя доминирующий диполь и энергетически балансируя составляющие недипольные поля как в геодинамо моделях.



Рис.2. Общая энергия E, сумма ее нечетных (по n) составляющих Eod из (2), симметричная относительно оси вращения Eax (с m=0) и дипольная E1.



3

Рис.3. Справа накопительные гистограммы для n>1 из (2) в джоулях. Слева мощности в ваттах. Максимальные значения – светлые, средние – серые, а минимальные – черные. Каждый 1-ый столбец из IGRF модели, 2-ой из GUFM1, третий из COV_OBS за 1900-1990гг.

Из рис. 3 видно, что IGRF «всплеск» сосредоточен в гармониках с n=9 и 10, а вариации остальных гармоник сходны во всех моделях. При этом n=3 доминирует над n=2. С n=3 до 8 – убывание, а далее доминирование n=9 над 8 и 10. Такое выделение нескольких спектральных масштабов есть и в теоретических оценках [6], и в наиболее продвинутых численных геодинамо подобных моделях [7].

Суммарные мощности существенно более вариативны по сравнению с энергиями и имеют порядок величины несколько десятых ГВт всюду за исключением IGRF «всплеска» величиной порядка ГВт. Все это свидетельствует о сильной нелинейности геодинамо, которая должна воспроизводиться в геодинамо подобных моделях, см. [6; 7]. Мощности преимущественно негативны в основном из-за уменьшения модуля диполя в современную эпоху. Близкие к нулю средние мощности свидетельствуют о почти периодическом поведении недипольного поля во всех гармониках за исключением 10-й IGRF гармоники.



Рис.4. Эволюция гармоник с *n*=8,9,10 в (3-4) для энергии (слева) и мощности (справа). Верхняя пара– IGRF модель, средняя– GUFM1 модель и нижняя – COV_OBS модель.

Интересна эволюция «беспокойных» гармоник с n=9,10 представлена на Рис.4. Очевидно, что все «беспокойство» сосредоточилось в IGRF модели примерно с 1940 по 1965 гг. Две другие рассматриваемые модели всюду ведут себя «спокойно». Этот эффект вероятнее всего связан с неточностями в описании модели IGRF. К такому же выводу пришел и автор работы [3]. В любом случае эта особенность заслуживает самого пристального внимания мирового геомагнитного сообщества.

Просуммируем основные результаты этой работы.

1. Определены и исследованы вариации энергии и мощности потенциальной части Главного геомагнитного поля с 1840 года на основе трех ([4], [5], IGRF) наблюдательных моделей.

2. Суммарная энергия (~ $6 \cdot 10^{18}$ Дж) и мощность (~ 10^{8} Вт) определяются суммой нечетных мультиполей: диполь n=1, октуполь n=3 и т.д. Доминирует диполь, энергия которого близка ко всей энергии симметричного относительно оси вращения поля. Вариации энергий ~10% и сходны для всех моделей за исключением «всплеска» IGRF модели в 1945-1950 гг.

3. Спектральный анализ, показал, что «всплеск» сосредоточен в n=9 и 10, а вариации остальных мультиполей сходны во всех моделях. При этом n=3 доминирует над n=2. С n=3 до 8 – убывание, а далее доминирование n=9 над 8 и 10.

4. Близкие к нулю средние мощности при n>1 свидетельствуют о почти периодическом поведении недипольного поля, а существенные вариации мощности говорят о сильной нелинейности геодинамо. Этот результат и результаты 1-3 хорошо согласуется с современными геодинамо моделями.

Литература

- 1. Lowes F.J. Spatial power spectrum of the main geomagnetic field, and extrapolation to the core // Geophys. J. R. Astr. Soc. V. 36. P. 717–730. 1974.
- 2. Старченко С.В., Яковлева С.В. Спектры энергии и мощности потенциального геомагнитного с 1840 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. Т.59. № 2. С.258-264. 2019.
- 3. Wen-Yao Xu. Unusual behavior of the IGRF during the 1945–1955 period // Earth Planets Space. V. 52. P. 1227–1233. 2000.
- 4. Jackson A., Jonkers A.R.T., Walker M.R. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records // Phil. Trans. R. Soc. Lond. V. A358. P. 957–990. 2000.
- 5. Gillet N., Barrois O. Finlay C.C. Stochastic forecasting of the geomagnetic field from the COV-OBS.x1 geomagnetic field model, and candidate models for IGRF-12 // Earth, Planet and Space. 67:71. 2015. DOI 10.1186/s40623-015-0225-z
- 6. Starchenko S.V. Analytic base of geodynamo-like scaling laws in the planets, geomagnetic periodicities and inversions // Geomagnetism and Aeronomy. V. 54, No 6. P. 694-701. 2014.
- 7. Schaeffer N., Jault D., Nataf H.-C., Fournier A. Turbulent geodynamo simulations: a leap towards Earth's core // Geophys. J. Int., V. 211. P. 1–29. 2017.

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЖЕСТКОСТЕЙ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Янке В.Г.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия yanke@izmiran.ru

LONG-TERM CHANGES IN THE GEOMAGNETIC CUTOFF RIGIDITY OF COSMIC RAYS

Yanke V.G.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

With the annual resolution for the period 1950-2050 by method of trajectory calculations, the cutoff rigidity of vertical and inclined directions for the Global network was obtained. The results of the calculations indicate the manifestation of two World anomalies in the northern and southern Atlantic and the irregular course of the time dependence of the cutoff rigidity for inclined directions.

Современное развитие эксперимента, и по продолжительности наблюдений, и по точности получаемых экспериментальных данных, требует самого тщательного исследования магнитосферных эффектов связано, космических лучей. Это например, С тем, что за шестидесятилетний период наблюдений космических лучей геомагнитное поле уменьшилось на ~4%, причем в разных регионах Земли уменьшение идёт с различной скоростью. В работе [1] отмечено, что в то время как момент диполя уменьшился на 6.5% с 1900 г. и центр диполя сместился на 200 км в направлении западной части Тихого океана, вклад высоких гармоник магнитного поля за этот же период увеличился на ~30%.

Чтобы оценить последствия такой большой перестройки магнитного поля с точки зрения магнитосферных эффектов, необходимо получить планетарное распределение жесткостей геомагнитного обрезания для всего периода наблюдений. По предварительным оценкам в отдельных регионах изменение жесткостей геомагнитного обрезания, достигает ~2 GV (>10 % для экваториальных детекторов), что очень важно при исследовании долгопериодных вариаций космических лучей.

Расчеты жесткостей геомагнитного обрезания проводились на основе решения уравнений движения заряженных частиц в геомагнитном поле методом обратных траекторий по методике [2]. Уравнение движения решалось численно методом Рунге-Кутта с адаптивным шагом.

Жесткости геомагнитного обрезания рассчитаны с 1950 года вплоть до 2020 года с годовым разрешением. С этой целью привлекалась модель главного магнитного поля IGRF. Такая модель для каждых пяти лет разработана вплоть до 2015 года, а с учетом вековой вариации магнитного поля модель продолжена до 2020 года [3]. Нами такое продолжение

выполнено до 2050 года методом линейной экстраполяции коэффициентов разложения поля, которое представлено 13-ю сферическими гармониками, однако прогностическая модель ограничена 8-ю гармониками.

вертикального направления прихода частиц (нейтронных Лля мониторов) для 5-летних эпох с 1900 года методом траекторных расчетов выполнены расчеты планетарных распределений жесткостей были геомагнитного обрезания для сетки 5°×15° в работе [4, 5]. Цифровые результаты можно найти на сервере [6]. Для того же периода с годовым разрешением получены жесткости геомагнитного обрезания для Мировой нейтронных мониторов. Результаты изменений планетарных сети распределений жесткостей геомагнитного обрезания свидетельствуют о проявлении двух Мировых аномалий (рис. 1, вкладка). В зоне действия одной аномалии - жесткость геомагнитного обрезания со временем увеличивается, в зоне другой – уменьшается, но глобально жесткость геомагнитного обрезания понижалась на ~3.4% за последние 50 лет.



Рис. 1. Изменения относительно эпохи 1950 вертикальных жесткостей геомагнитного обрезания Мировой сети нейтронных мониторов и изменения планетарного распределения вертикальной жесткости геомагнитного обрезания (на вкладке).

Временные изменения жесткостей геомагнитного обрезания для каждой станции определяются влиянием аномалии, в зоне действия которой находится станция. На рис. 1 (левая панель) приведены увеличение жесткостей геомагнитного обрезания группы станций, которые находятся в зоне влияния Северо-Атлантической аномалии, а на рис.1 (правая панель) приведены уменьшение R_c группы станций, которые находятся в зоне влияния Южно-Атлантической аномалии. На

периферийных станциях наблюдаются незначительные (~0.1 GV) изменения жесткостей геомагнитного обрезания. Точность полученных значений жесткостей геомагнитного обрезания 0.05 GV.

Еше более сложно выглядит временной ход жесткостей геомагнитного обрезания для наклонных направлений прихода частиц, что важно для мюонных телескопов, которые регистрируют частицы из большого числа наклонных направлений. Как следует из рис. 1, временные изменения вертикальных жесткостей геомагнитного обрезания, в целом, являются регулярными. Для части наклонных направлений наблюдаются существенное нерегулярное поведение временных зависимостей, где можно выделить две группы детекторов. Детекторы первой группы имеют нерегулярный ход во временной зависимости только для наклонных направлений север - запад для детекторов северного полушария. Детекторы второй группы имеют нерегулярный ход только для наклонных направлений юг - восток для детекторов южного полушария.

Физические причины такого поведения понятны при рассмотрении пенумбры, ее изменения и сами траектории частиц. Теневая область жесткостей, следующая непосредственно после штермеровской граничной жесткости и фактически примыкающая к ней, заполнена частицами, пересекающими поверхность Земли; последняя область характерна для наклонно падающих частиц, обращенных к северному или южному полюсу, и имеет наибольшее значение при больших зенитных углах.



Рис. 2. Относительные изменения вертикальных жесткостей геомагнитного обрезания для 2-х групп станций космических лучей относительно эпохи 1950. Первая группа – телескопы северного полушария, вторая - телескопы южного полушария.

В первом случае именно для северных направлений происходит более резкое уменьшение жесткостей геомагнитного обрезания со временем, во втором случае для южных направлений происходит более резкое увеличение жесткостей геомагнитного обрезания.

Итак, причиной существенного изменения жесткостей геомагнитного обрезания является общее уменьшение магнитного поля

Земли, на фоне которого нарастает его своеобразная «контрастность» с появлением двух аномальных зон: Северо-Атлантической аномалии и ее восточного шлейфа и Южно-Атлантической аномалии с западным шлейфом.

Временные изменения жесткостей геомагнитного обрезания для вертикального прихода частиц на станциях Мировой сети полностью согласуются с поведением, диктуемым этими двумя аномальными зонами. За наблюдательный период космических лучей средне - планетарная жесткость геомагнитного обрезания для вертикального прихода частиц уменьшилась на 0.2 GV или 3.4 %, что приводит к увеличению измеряемого потока частиц на ~1 % за 50 лет. В эпицентре аномалий за тот же период поток изменяется до 12 %.

Временные изменения жесткостей геомагнитного обрезания для наклонно приходящих частиц для мюонных телескопов Мировой сети также полностью согласуются с поведением, диктуемым ДВУМЯ аномальными зонами. Но действует и второй фактор, поскольку изменение магнитного поля приводит к значительной изменчивости пенумбры и, в итоге, к неустойчивости наклонных траекторий частиц, что и приводит к нерегулярному ходу временной зависимости жесткостей геомагнитного обрезания некоторых направлений, которые определяются для расположением детектора относительно геомагнитного экватора.

Так, для детекторов северного полушария нерегулярность временного хода жесткостей геомагнитного обрезания наблюдается для наклонных направлений север-запад. Для детекторов южного полушария нерегулярность временного хода жесткостей геомагнитного обрезания наблюдается для направлений юг-восток.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 17-02-00508 и базируется на экспериментальных данных УНУ «Сеть СКЛ».

Литература

- 1. Xu Wen-yao, Wei Zigang, Ma Shizhuang Dramatic variations in the Earth's main magnetic field during the 20th century // Chin. Sci. Bull. V. 45. № 21. P. 2013–2016. 2000.
- Shea M.A. D.F. Smart, McCracken K.G. A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field // J. Geophys. Res, 70, 4117-4130. 1965. DOI: 10.1029/JZ070i017p04117.
- 3. Model IGRF-12. (2015). ePub. http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html.
- 4. Гвоздевский Б.Б., Абунин А.А., Кобелев П.Г., Гущина Р.Т., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г. Магнитосферные эффекты космических лучей. І. Долговременные изменения жесткостей геомагнитного обрезания для станций мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и Аэрономия: Т. 56, №4, С. 411-422. 2016.
- 5. Gvozdevsky B.B., Belov A.V., Gushchina R.T., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Planetary long term changes of the cosmic ray geomagnetic cut off rigidities // J. Phys.: Conf. Ser. 1181, 012008, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1181/1/012008
- 6. Mag_Effect ftp://crsb.izmiran.ru/MagEffect. See guide.pdf. ePub. 2016.