

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБСЕРВАТОРИИ «ПАРАТУНКА»

Самойлова О.М. (5 курс)

Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга

Научный руководитель: д.г.-м.н. Мороз Ю.Ф.

По данным мониторинга вариаций геомагнитного поля за период с 2000 г. по 2010 г. изучена структура поля. Обработка выполнена с использованием современных многомерных компьютерных программ. Выявлены основные особенности в поведении вариаций в диапазоне от суточных до вековых. В качестве примера исследована магнитная буря. Наряду с этим для изучения электропроводности литосферы показана возможность использования вариаций геомагнитного поля в интервале периодов от первых десятков секунд до часовых. Для этой цели использована связь между вариациями вертикального и горизонтального магнитного поля в виде индукционной матрицы или магнитного типпера.

Ключевые слова: вариации магнитного поля, магнитная буря, береговой эффект магнитный типпер.

Введение

Изучение вариаций геомагнитного поля представляет большой интерес, т.к. они позволяют получить информацию о глубинной электропроводности среды. Такая информация содержится в передаточной функции, представленной магнитным типпером, характеризующим связь вертикального поля с горизонтальным. Этому вопросу посвящен ряд публикаций [2], [5] и др. Однако, существует необходимость исследования динамики геомагнитного поля и электропроводности геологической среды по данным многолетнего мониторинга.

Исследования магнитного типпера проведены по данным наблюдений вариаций геомагнитного поля, выполненных на юго-восточной Камчатке в обсерватории «Паратунка» с 2000 по 2010 гг. Они стали возможны при появлении японских магнитометров, позволяющих вести регистрацию компонент геомагнитного поля с дискретностью 1 с и высокой точностью.

Для изучения динамики вариаций и магнитного типпера использованы современные методы и технологии, позволяющие выявить основные особенности в структуре геомагнитного поля и в изменении вещественных и мнимых частей типпера в связи с электропроводностью литосферы. Результаты выполненных исследований дополнили существующие представления о динамике магнитного поля и электропроводности земной коры и верхней мантии в области перехода от материка к Тихому океану. Этому вопросу и посвящена данная статья.

Методика наблюдений и обработка данных

Обсерватория «Паратунка» расположена на побережье Тихого океана, на расстоянии 15 км от Авачинской бухты в с. Паратунка, в 26 км западнее г. Петропавловска-Камчатского ($\varphi=52^{\circ}58'$ северной широты, $\lambda=158^{\circ}15'$ восточной долготы) (рис 1). В этой обсерватории Институтом космических исследований и распространения радиоволн осуществляется регистрация вариаций составляющих геомагнитного поля с дискретностью 1 с в автоматическом режиме. Для привязки меток времени применяют GPS приемник. Измерения вариаций геомагнитного поля осуществляются с помощью феррозондовых магнитометров FRG – 601 G, расположенных в вариационном павильоне. Точность измерений напряженности магнитного поля Земли составляет 0.001 нТл.

Вдоль Камчатки располагается глубоководный желоб, представляющий собой геоэлектрическую неоднородность. Электрические токи, индуцированные в глубоководном желобе, являются источником, вызывающим береговой эффект на Восточной Камчатке, который, в свою очередь, вносит сильные искажения в результаты магнитотеллурических зондирований, проводимых в прибрежной зоне. Все это происходит потому, что на берегу океана соприкасаются среды, различающиеся между собой по сопротивле-

нию. Причем такое различие может достигать нескольких порядков, что вызывает мощную аномалию геоэлектромагнитного поля.

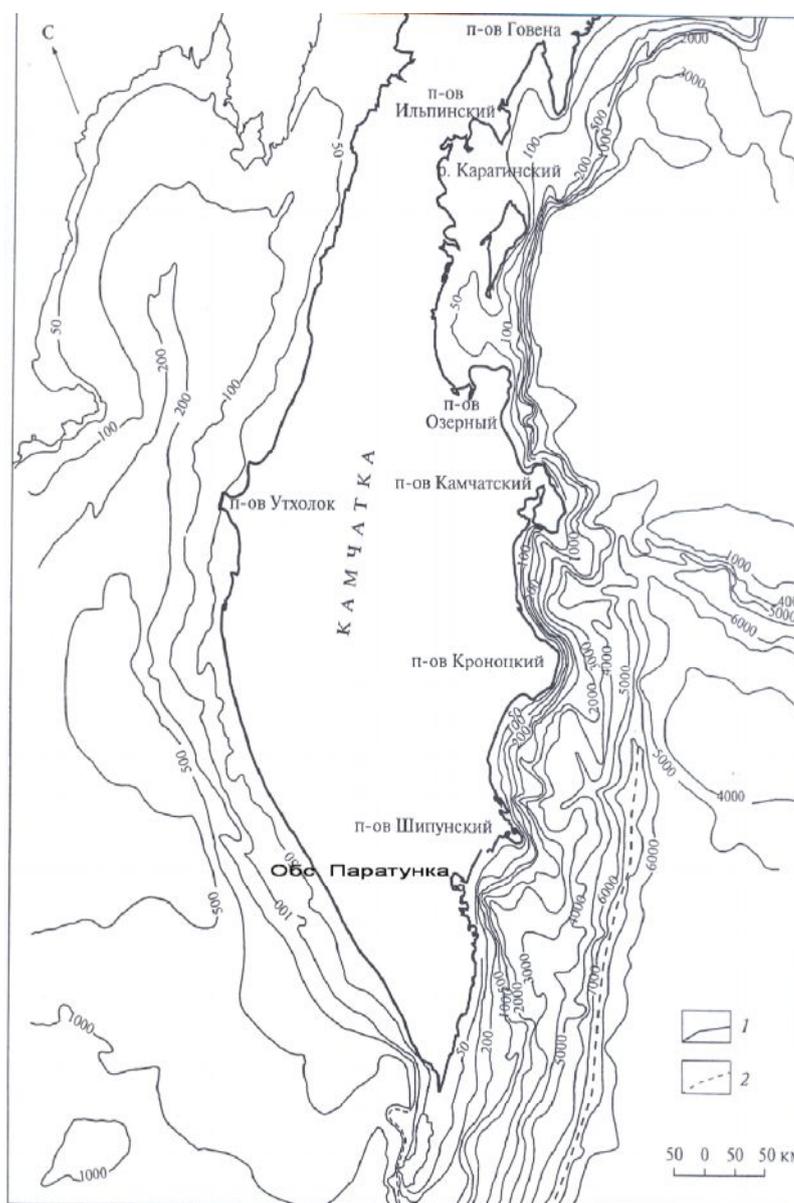


Рис.1. Схема расположения обсерватории «Паратунка».

Продолжительные наблюдения за величиной магнитных компонент показывают, что они не остаются постоянными во времени. Изменения могут быть как быстротечными, так и медленными. Для того чтобы получить наглядное изображение различных видов вариаций данные наблюдений компонент H , D и Z с дискретностью 1 сек. были переведены в среднечасовые, среднесуточные и среднемесячные значения. Для анализа вековой

вариации геомагнитного поля использованы временные ряды среднечасовых значений напряженности поля с 20.11.2000 г по 31.12.2010 г., представленные на рис 2. Из этих временных рядов отфильтрованы высокие частоты рис. 3. На основе полученных временных рядов рассчитаны спектры мощностей среднечасовых, среднесуточных и среднемесячных значений рис. 4, 5, 6. Они дают представление о регулярных вариациях геомагнитного поля, к которым относятся годовые, 27-дневные, солнечно-суточные изменения и их гармоники.

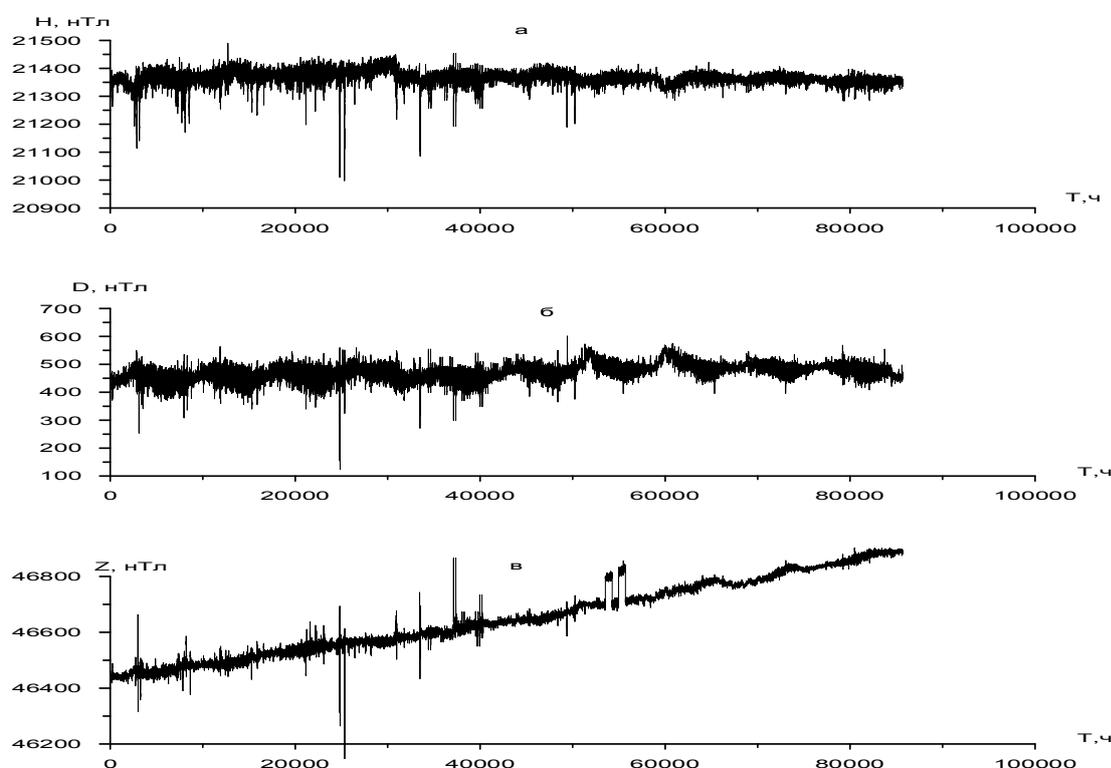


Рис.2. Графики компонент H, D, Z геомагнитного поля по данным наблюдения в обсерватории «Паратунка» с 20.11.2000 г по 31.12.2010 г.

В дальнейшем обработка данных сводилась к расчету действительной и мнимой частей индукционной матрицы Визе-Паркинсона. При обработке учтено влияние берегового эффекта на поведение геомагнитного поля. Оценка эффекта выполнена с помощью трехмерного численного моделирования. В результате расчетов получены графики зависимости изменения модулей действительной и мнимой частей типпера и их азимутов от

периодов наблюдений. Далее проведено сравнение модельных кривых с экспериментальными данными в диапазоне периодов от 9 с до 100000 с.

Рассчитанные значения модулей и азимутов использованы для анализа вариаций магнитного типпера, результатом которого стало построение графиков, демонстрирующих изменение элементов матрицы во времени. При этом исходные значения H , D и Z были объединены по 5, 10 и 20 суток.

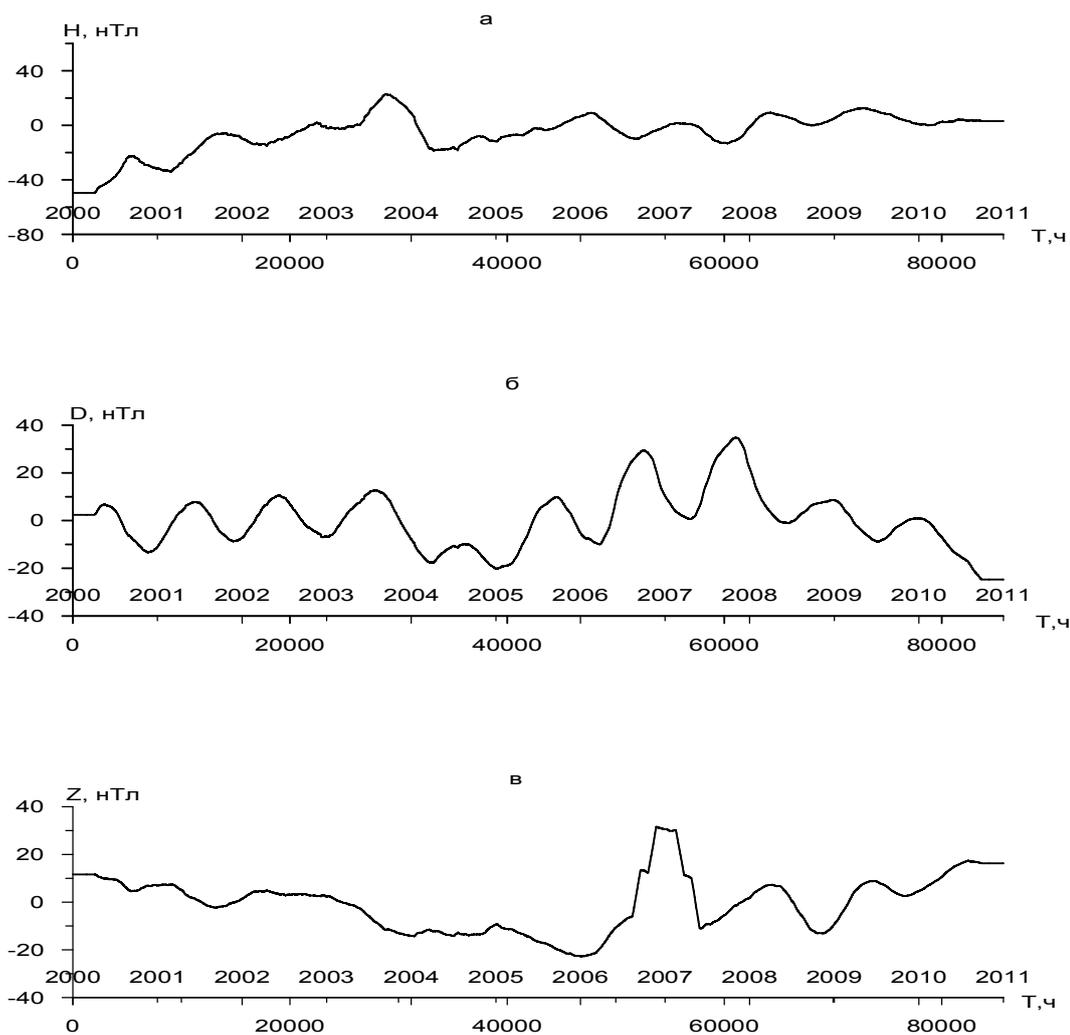


Рис.3. Графики годовых вариаций компонент H , D , Z геомагнитного поля по данным наблюдения в обсерватории «Паратунка» с 20.11.2000 г по 31.12.2010 г.

Структура вариаций геомагнитного поля

Временные вариации классифицируются в зависимости от источника их происхождения. Вековые вариации связаны с внутренними источниками. Регулярные и иррегулярные магнитные бури и суббури, суточные ва-

риации, пульсации вызваны внешними ионосферными и магнитосферными источниками.

Вековая вариация представляет собой изменения среднегодовых значений элементов магнитного поля Земли по времени из-за процессов, происходящих во внешнем ядре. Ее период исчисляется в несколько сот лет [7]. Существуют различные теории о происхождении этой вариации, но наиболее приемлемой считается модель Булларда. В основе модели лежит строение ядра, состоящего из внутренней твердой и внешней жидкой фазы. Ядро вращается вокруг оси с меньшей скоростью, чем оболочка. В жидкой части ядра располагаются вихревые кольца [7]. На графиках, представленных на рис. 2, отчетливо виден тренд, знак которого не меняется на протяжении девяти лет, что связано с вековым изменением компонент поля. В виде «шумового» фона проявлены высокочастотные вариации.

В течение года изменение элементов происходит плавно, подчиняясь определенной закономерности. На рис. 3 показаны графики годовых вариаций H , D , и Z , на которых заметно, что горизонтальная составляющая и магнитное склонение имеют минимальные значения в начале и в конце года. Данный тип вариаций связан с обращением Земли вокруг Солнца, и в течение годовых интервалов времени геомагнитная активность значительно повышается в моменты равноденствий и понижается между ними. Вероятно, это связано с тем, что в эти моменты магнитная ось занимает положение наиболее близкое к перпендикулярному по отношению к радиусу земной орбиты [2].

Резкий скачок в поведении вертикальной компоненты в 2007 г. (рис. 3) по видимому, связан с помехами.

При оценке спектральной мощности среднесуточных значений вариаций поля отчетливо видны вариации горизонтальной составляющей магнитного поля с периодами, равными 9 и 27 дням (рис.3). На других компонентах эти изменения не обнаружены. 27-дневная повторяемость связывают с вхождением Земли в зону корпускулярного потока, излучае-

мого солнцем. Рис. 5 свидетельствует о наличии полугодовой и годовой вариаций.

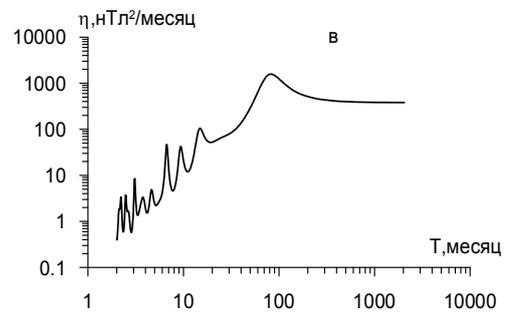
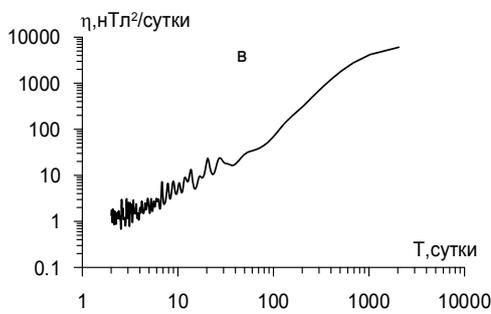
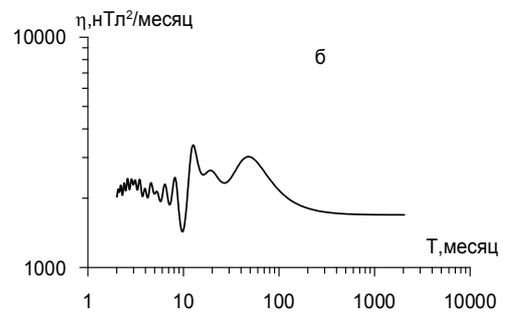
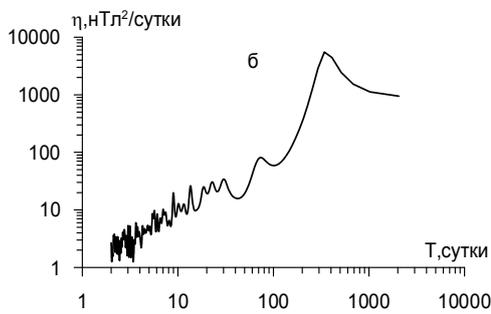
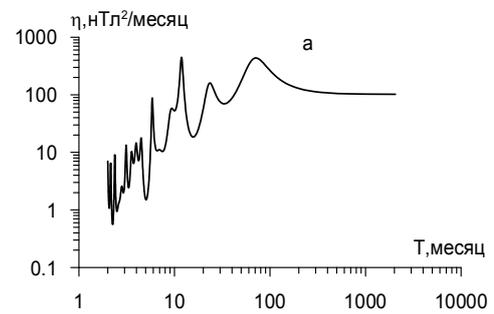
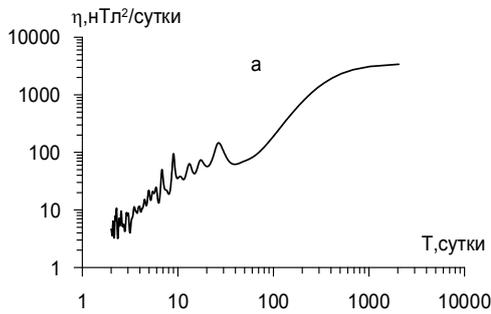


Рис.4. Спектры мощностей среднесуточных значений: а - горизонтальной составляющей; б - магнитного склонения; в - вертикальной компоненты геомагнитного поля. Время наблюдений: 20.11.2000 - 31.12.2010 гг.

Рис.5. Спектры мощностей среднемесячных значений: а - горизонтальной составляющей; б - магнитного склонения; в - вертикальной компоненты геомагнитного поля. Время наблюдений: 20.11.2000 - 31.12.2010 гг.

Наиболее устойчивыми из выше перечисленных видов изменений геомагнитного поля являются солнечно-суточные вариации, т.к. они регулярные и носят плавный характер. На рис.5 показаны спектры мощностей среднечасовых значений горизонтальной составляющей, склонения и вер-

тикальной компоненты геомагнитного поля, на которых максимумам отвечают вариации с периодами, равными 6, 8, 12 и 24 часам. Интенсивность таких вариаций меняется время от времени, а в летний период для них характерно увеличение [5]. Источник солнечно-суточных изменений магнитного поля представляет собой систему электрических токов в ионосфере на высотах порядка 100 км [6].

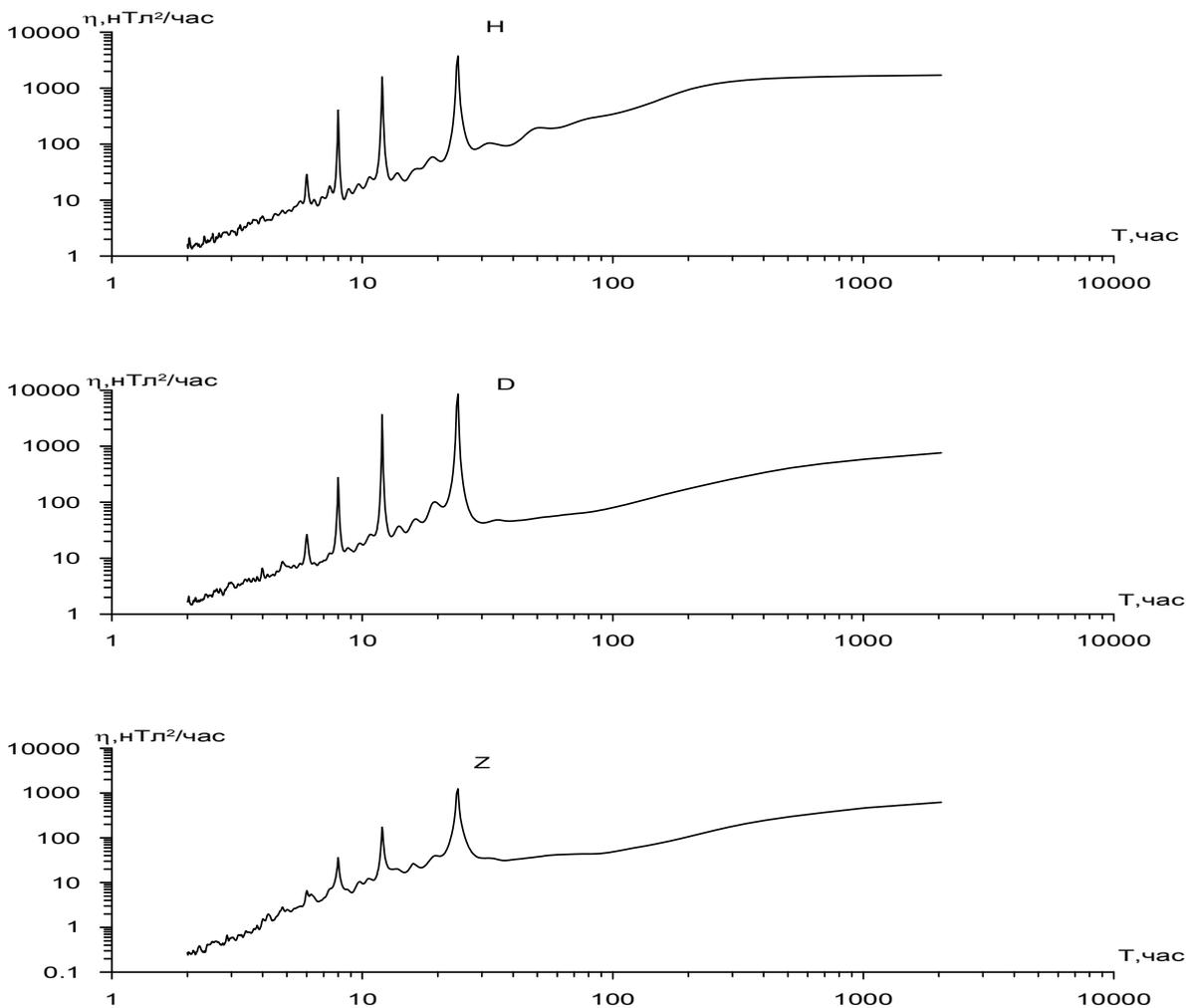


Рис.6. Спектры мощностей среднечасовых значений а - горизонтальной составляющей; б - магнитного склонения; в - вертикальной составляющей геомагнитного поля. Время наблюдений: 20.11.2000 – 31.12.2010 гг.

Независимо от суточных вариаций проявляется время от времени большое количество нерегулярных вариаций, составляющих поле возмущений. Периоды с высокой степенью возмущенности называются магнитными бурями. Существует несколько особенностей, характерных для этого

вида вариаций. Во-первых, многие, хотя и не все бури начинаются внезапным изменением горизонтальной компоненты, обычно ее возрастанием. Этот этап называется внезапным началом бури, до которого кривые всех компонент ведут себя спокойно. После начала бури появляются нерегулярные колебания, и часто на протяжении часа горизонтальная составляющая возрастает. Следующий этап развития магнитной бури характеризуется возрастанием вертикальной компоненты и уменьшением горизонтальной. При достижении первой своего максимального значения, а второй - своего минимального начинается фаза восстановления, сопровождающаяся возвращением значений этих составляющих к норме. Восстановление продолжается несколько дней [6]. На рис. 6 представлен график изменения горизонтальной компоненты, на котором видна магнитная буря.

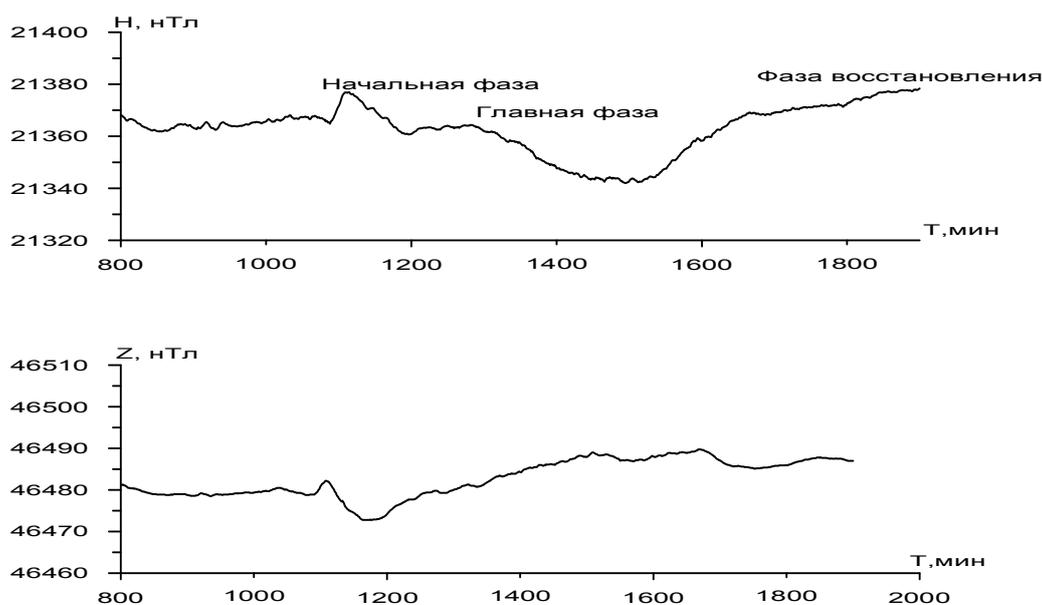


Рис.7. График горизонтальной и вертикальной компонент геомагнитного поля по данным наблюдения за 2002 г.

Результаты изучения магнитного типпера

Существует передаточная функция, связывающая горизонтальную и вертикальную составляющие геомагнитного поля. Эта функция получила название магнитного типпера или индукционной матрицы, в основе получения которой лежит линейное уравнение вида [1]:

$$H_Z = \hat{\mathbf{W}} \mathbf{H}_{\text{ГОР}}, \text{ где } \hat{\mathbf{W}} = |W_{ZX}W_{ZY}| \text{ или } H_Z = W_{ZX}H_X + W_{ZY}H_Y,$$

где H_X, H_Y, H_Z – составляющие наблюдаемого магнитного поля, W_{ZX}, W_{ZY} – компоненты индукционной матрицы, которые зависят от частоты, распределения электропроводности в Земле и ориентации координатных осей. В однородной среде $H_Z = 0$, а при наличии неоднородности появляется вертикальная составляющая геомагнитного поля. Задача сводится к определению компонент индукционной матрицы для каждого периода, используемого при наблюдениях.

Магнитный типпер является комплексным числом, поэтому его действительную и мнимую части можно представить следующим образом [3]:

$$\text{Re} \mathbf{W} = \text{Re} W_{ZX} \mathbf{i} + \text{Re} W_{ZY} \mathbf{j}$$

$$\text{Im} \mathbf{W} = \text{Im} W_{ZX} \mathbf{i} + \text{Im} W_{ZY} \mathbf{j}$$

Магнитные вариации индуцируют в любой проводящей среде электрические токи, которые в свою очередь становятся источником магнитного поля. По компонентам матрицы определяют направление индукционных стрелок и получают информацию о наличии проводящей зоны [3]. Если действительные и мнимые вектора коллинеарные, то среда является двумерно неоднородной. В случае перпендикулярности индукционных стрелок среда считается трехмерно неоднородной.

Как было указано выше, Камчатка расположена в области перехода от Азиатского континента к Тихому океану и характеризуется сложным геологическим строением. Существующий контраст проводимости верхнего слоя на суше и водной толщии составляет 3-4 порядка и проявляется в виде берегового эффекта, который влияет на поведение магнитного поля. Для изучения такого влияния использовано трехмерное численное моделирование магнитотеллурического поля. В пробной модели Камчатки мощность и удельное электрическое сопротивление верхнего слоя на суше приняты с постоянными значениями, чтобы получить возможность оце-

нить влияние берегового эффекта независимо от влияния геоэлектрических неоднородностей в осадочно-вулканогенном чехле Камчатки. Так верхний слой на суше имеет мощность 3 км, а удельное электрическое сопротивление составляет 30 Ом м. Сопротивление воды - 0,25 Ом м. В результате расчетов, выполненных в диапазоне периодов от 9 до 100000 с., получены модули и азимуты индукционных стрелок: вещественной и мнимой частей типпера рис 8. На рисунке видно, что максимальное значение модуля вещественной части 1,266 проявилось на периоде 15000 с, на котором модуль мнимой части имеет минимальное значение 0,1624. Эти экстремумы вызваны максимальным насыщением глубоководного желоба электрическим током [3].

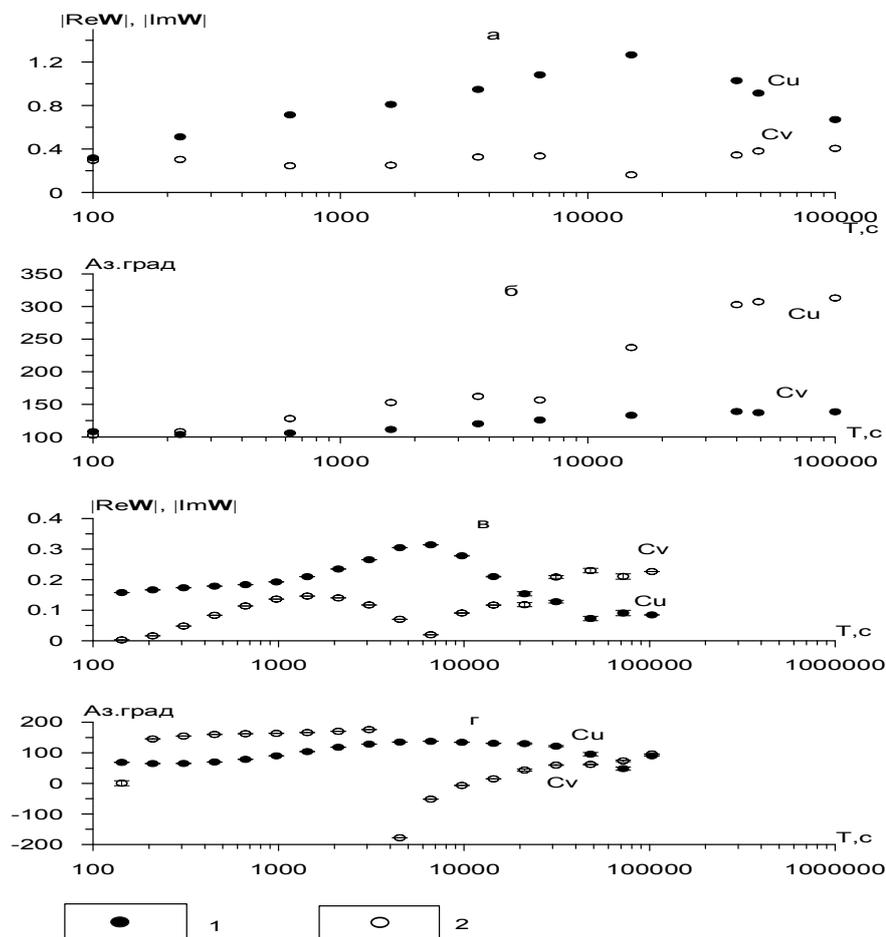


Рис.8. Частотные кривые магнитного типпера: а, б построены по модели; в, г построены по экспериментальным данным за 2010г. 1 – вещественная индукционная стрелка; 2 – мнимая индукционная стрелка

Обратимся к экспериментальным данным. Частотные кривые модулей вещественных и мнимых векторов, а также их азимутов, показанных на рис. 8 в, г, дают наглядное представление о распределении электропроводности среды в районе обсерватории. Модуль действительной части вектора, который обозначен на рисунке $|\text{ReW}|$, принимает максимальное значение 0,3 на периоде около 6000 с. Модуль мнимой индукционной стрелки $|\text{ImW}|$ на этом же периоде минимален, а ее азимут меняется на 180° . Азимут действительной части составляет 130° . На указанном периоде происходит максимальное насыщение глубоководного желоба током. Различие азимутов вещественной и мнимой стрелок в области коротких периодов составляет примерно 60° . Это объясняется влиянием сложных очертаний береговой линии и геоэлектрическими неоднородностями среды. В области длинных периодов характерно возрастание модуля мнимого индукционного вектора и убывание модуля действительного.

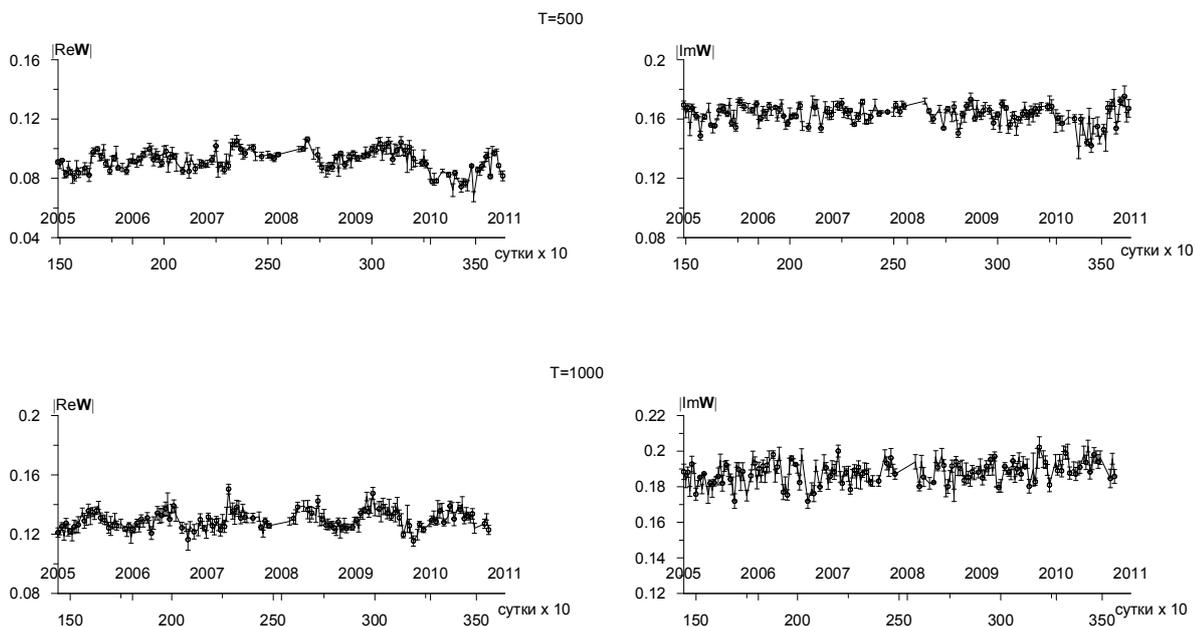


Рис.9. Графики изменения модулей действительной ReW и мнимой ImW части магнитного типпера со временем при разных периодах наблюдения.

Главное, что необходимо отметить при сравнении модельных и экспериментальных частотных кривых – это проявление одного и того же процесса (насыщение глубоководного желоба электрическим током) на разных периодах. В первом случае экстремумы проявляются на периоде

15000 с, а во втором – на 6000 с. Следовательно, в действительности глубинная электропроводность Камчатки имеет повышенные значения.

Представляет интерес изменение типпера со временем. В результате обработки получены графики поведения индукционной матрицы на различных периодах, начиная от первых минут и заканчивая первыми часами. Однако, наиболее устойчиво магнитный типпер определяется на периодах 500 с. и 1000 с. На рис. 9 представлены графики модулей вещественных и мнимых частей типпера. В поведении модуля вещественной части типпера хорошо выражены годовые вариации, особенно на периоде 1000 с. Рассмотрим их возможную природу. Для этого обратимся к кривым МТЗ, которые представлены на рис. 10.

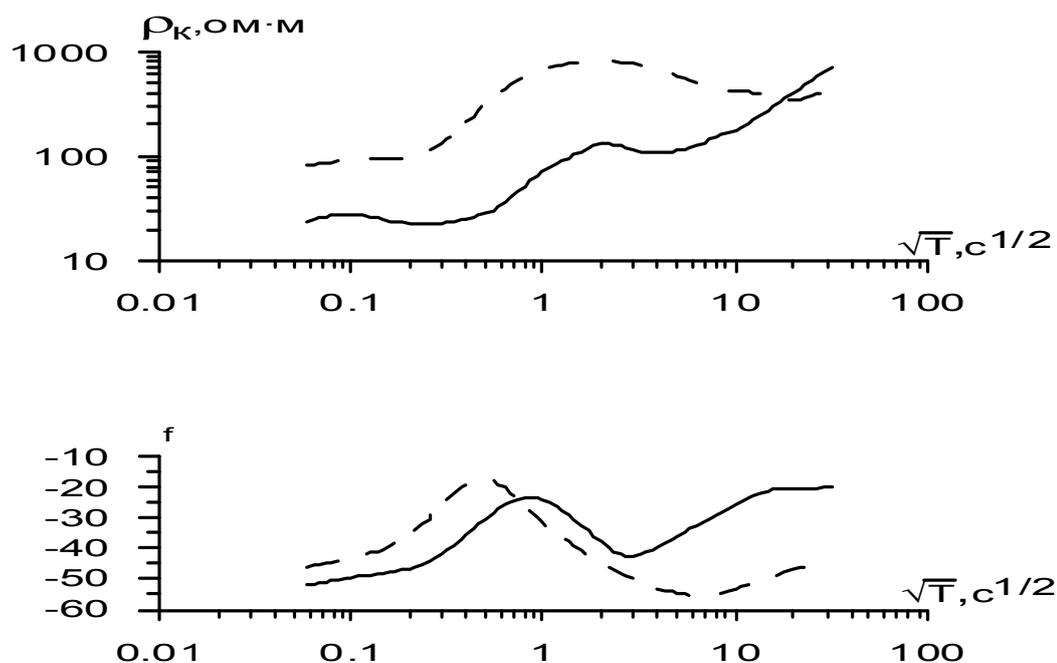


Рис.10. Кривые кажущегося сопротивления и фазы по данным МТЗ в районе обсерватории «Паратунка».

На нем сплошная линия соответствует кривой, полученной вкрест простиранию Камчатки, а пунктирная линия представляет кривую, полученную вдоль Камчатки. Их формы разные, следовательно, среда неоднородная. Поперечная кривая, начиная с периода 10 с. имеет восходящую асимптотическую ветвь, связанную с влиянием берегового эффекта [3]. Поэтому она не отражает глубинный разрез. На продольную кривую также оказыва-

ет влияние индукционный эффект, но в меньшей мере. Об этом говорят данные моделирования. Таким образом, данная кривая может быть использована для формальной интерпретации геоэлектрического разреза. Первый минимум кривой связан с осадочно-вулканогенным чехлом. Максимум кривой соответствует слою земной коры с высоким сопротивлением до нескольких сотен Ом·м. Следующий минимум кривой связан с высокой электропроводностью в слое земной коры. Фазовая кривая не чувствительна к влиянию локальных неоднородностей, но она характеризует только относительное изменение электропроводности и не дает точных значений [5].

Период 1000 с, на котором наиболее хорошо проявились годовые вариации модуля вещественной индукционной стрелки, соответствуют второму минимуму на кривых МТЗ, т.е. годовые вариации, возможно, связаны со слоем земной коры с повышенной электропроводностью.

Выводы

В результате анализа временных рядов среднечасовых значений компонент геомагнитного поля выявлен тренд, знак которого не меняется на протяжении девяти лет, что связано с вековым изменением элементов H, D и Z. По графикам годовых вариаций H, D и Z, полученным после фильтрации высоких частот показано, что горизонтальная составляющая и магнитное склонение имеют минимальные значения в начале и в конце года. Вероятно, это связано с тем, что в данные моменты магнитная ось занимает положение наиболее близкое к перпендикулярному по отношению к радиусу земной орбиты.

Спектральная мощность среднечасовых, среднесуточных и среднемесячных значений составляющих магнитного поля Земли свидетельствует о наличии регулярных солнечно-суточных вариаций с периодами 6, 8, 12 и 24 ч, 27-дневной повторяемости, полугодовых и годовых вариаций.

В результате изучения влияния берегового эффекта на поведение геомагнитного поля, с помощью сравнения модельных и эксперименталь-

ных частотных кривых магнитного типпера установлено, что насыщение глубоководного желоба электрическим током на модельной кривой проявляется на периоде 15000 с, а на экспериментальной – на 6000 с. Это свидетельствует о повышении электропроводности литосферы юго-восточной Камчатки.

По данным мониторинга вариаций геомагнитного поля изучен магнитный типпер в диапазоне периодов от первых минут до первых часов. Наиболее устойчиво передаточная функция определяется на периодах 500 с и 1000 с. На последнем из них выявлены годовые вариации вещественной индукционной стрелки. Согласно данным МТЗ на этом периоде проявляется проводящий слой. Это дает основания полагать, что годовые вариации магнитного типпера возможно связаны с наличием проводящего слоя в литосфере.

Автор выражает признательность Смирнову С.Э. за предоставление данных наблюдения геомагнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердичевский М.Н., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли. М.: Недра. 1981. 207 с.
2. Краев А.П. Основы геоэлектрики. Л.: Недра. 1965. С. 131-139.
3. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Смирнов С.Э. Результаты мониторинга вариаций геомагнитного поля в обсерваториях «Магадан» и «Паратунка» (Камчатка) 2009 г.
4. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Численное трехмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Физика Земли. 2006. № 3. С. 49-56.
5. Мороз Ю.Ф., Вершинин Е.Ф., Назарец В.П., Мороз Т.А. Аномальные эффекты в вариациях геомагнитного поля на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 32-37.
6. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир. 1986. 528 с.
7. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ. 1964. 446 с.

STUDING' S RESULTS OF MAGNETIC FIELD'S VARIATIONS
IN OBSERVATORY «PARATUNKA»*Samoylova O.M.**Kamchatka Vitus Bering State University*

Using the data on monitoring of magnetic field's variations for period from 2000 till 2010 the field's structure was studied. The treatment was carried out with use of modern computer programs. Fundamental peculiarities in variations behavior were discovered in the range of periods from per diem till age-old. As an example the magnetic storm was investigated. In order to study a lithosphere conductivity the use's possibility of geomagnetic field's variations is shown in the intervals from first tens of seconds till several hours. For this aim the connection between vertical and horizontal field's variations was used in the form of inductive matrix or magnetic «tipper». The tipper's frequency characteristic indicates on the coastal effect depended on high contrast between land's conductivity and ocean's one. Much attention was given to the dynamics' studying of lithosphere conductivity with the tipper's help. A special computer program allowing defining tipper's components for periods from 144 s till 7200 s was used during treatment. On monitoring data of inductive matrix the typical peculiarities in change of lithosphere geoelectrical heterogeneousness were defined. Possible nature of discovered anomalies was considered.

Key words: magnetic field's variations, magnetic storm, coastal effect, magnetic tipper.