Pre-seismic anomalies in geomagnetic field and their relation to the earthquakes' parameters

Natalya Kilifarska[1], Rossen Nedialkov[2], Emil Botev[1]

[1] National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, BAS, 3 "Acad. G.Bonchev", Sofia 1113, nkilifarska@geophys.bas.bg, ebotev@geophys.bas.bg
[2] Sofia University "St.Kl.Ohridski', Faculty of Geology and Geography,"Tsar Osvoboditel" 15, rned@gea.uni-sofia.bg

Key words: geomagnetic diurnal variations prior to earthquakes, earthquake parameters – depth, magnitude, epicentral distance

Abstract
Tis paper investigates the variations of diurnal magnetic amplitude (particularly its Y-component) obtained for a week prior to each of 1944 earthquakes (EQ), occurred within the period 2004-2014, and within the region with coordinates 8^0-30^0E longitude and 35^0-53^0N latitude. Analysis of the time series from 19 geomagnetic observatories, by the use of a non-linear statistical technic *Machine learning – support vectors analysis*, reveals an existence of small to moderate weakening of geomagnetic variability prior to EQ. We have found, as well, that the effect is coupled to the depth of EQ's hypocenter, becoming stronger for the deeper EQs. This result has been interpreted within the light of recently published laboratory experiments, demonstrating appearance of strong magnetic structures under the influence of heterogeneous mechanical stress – at temperatures sufficiently exceeding the Curie point (above which the remnant magnetization of the rocks is loosed).

Зависимост на пред-сеизмичните аномалии в геомагнитното поле от параметрите на земетресенията

Наталия Килифарска[1], Росен Недялков[2], Емил Ботев[1]

[1] Национален институт по геофизика, геодезия и география, Българска академия на науките, София 1113, България, nkilifarska@geophys.bas.bg, ebotev@geophys.bas.bg
[2] Софийски университет „Св.Кл.Охридски", Факултет по геология и география, rned@gea.uni-sofia.bg

Ключови думи: геомагнитни динамични отклонения преди земетресенията, параметри на земетресението - дълбочина, величина, епицентрово разстояние

Резюме
Настоящата статия изследва пространственото разпределение на денонощната вариация в Y- компонентата на геомагнитното поле, наблюдавана в едноседмичен период преди 1944 на брой земетресения, регистрирани в регион с координати 8^0-30^0E дължина и 35^0-53^0N ширина, в периода 2004-2014г. Използван е метод за откриване на нелинейни зависимости между анализираните променливи известен като Machine learning – support vectors analysis. Намерената зависимост между денонощната амплитуда на У-компонента на геомагнитното поле и дълбочина на земетресенията е интерпретирана в светлината на съвсем новите лабораторни експерименти, показващи появата на силни магнитни структури под въздействието на пространствено нехомогенно напрежение и температури многократно надхвърлящи точката на Кюри.

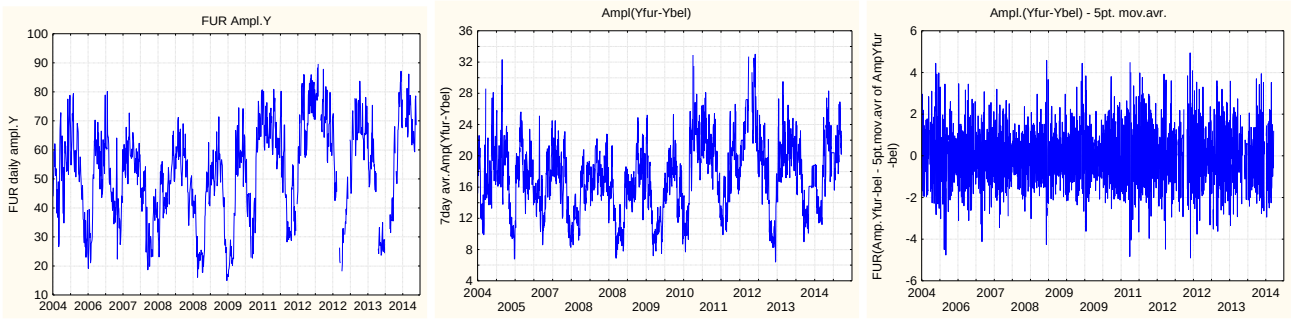
Въведение

Първите хипотези за наличието на свързаност между аномалиите наблюдавани в електро-магнитното поле на Земята преди земетресения датират от края на 19 век (Milne, 1890). Обаче, до изобретяването на протонния магнитометър (който е нечувствителен към движенията предизвикани от ускорения в земната кора, вследствие на разпространяващите се сеизмични вълни) съобщенията от подобен род изглеждат до известна степен спекулативни. От друга страна, късопериодичните вариации на геомагнитното поле са силно повлияни от йоносферните токове (проектиращи се върху електро-проводящата литосфера), които силно зависят от слънчевата активност. Това прави задачата за разделянето на вариациите с ендогенен (вътрешно земен) и екзогенен (външен) произход трудно решима.
Настоящата статия предлага анализ на вариациите в амплитудата на денонощната вариация на У-компонентата на геомагнитното поле (наблюдавани в периода 2004-2014 г., в 19 магнитни обсерватории в регион с координати 8º-30ºE дължина и 35º-53ºN ширина), след предварително щателно отделяне на вариациите породени от външни източници. Предишните ни изследвания на 3-те компоненти на геомагнитното поле (X, Y, Z) показаха, че в една част от анализираните обсерватории не съществува статистически значимо отличие между пред-сеизмичната извадка и целия ред от данни (Kilifarska et al., 2015). Анализа на амплитудата на денонощната вариация на У-компонентата показа, обаче, че пред-

сеизмичната извадка е статистически значимо различна както от целия анализиран ред, така и от извадката състояща се от дните без сеизмично събитие в изследвания регион. Освен това, според Takeda (2013), изследването на денонощната вариация на Y-компонентата има следните преимущества: 1.) по-слабо е повлияна от геомагнитните смущения; 2.) по-нечувствителна е към евентуално преместване на измервателната апаратура; 3.) денонощната вариация в тази компонента е най-ясно проявена в станциите на средни ширини.
По тези причини настоящото изследване е фокусирано върху изследването на изменчивостта на денонощната амплитуда на У-компонентата на магнитното поле (Ампл.У) и търсенето на евентуални връзки с параметрите на земетресенията (дълбочина, магнитуд и епицентрално разстояние).

Използвани данни и методи за анализ

Данните за параметрите на земетресенията случили се в периода 2004-2014 г. са взети от Европейско-средиземноморския център за данни (EMSC), предоставящ хомогенизирани по сеизмичен момент данни за магнитуда на сеизмичните събития. От пълния списък със земетресения са изключени тези с магнитуд по-малък от 4 като броят на избраните земетресения (наблюдавани в регион с координати 8º-30ºE дължина и 35º-53ºN ширина) наброява 1944.
Пред-сеизмичната извадка от магнитни данни е формирана от 7-дневните средни на амплитудата на денонощната вариация на геомагнитната Y-компонента (т.е. 6 дни преди, плюс деня на земетресението). Влиянието на магнитосферните токове (Yamazaki and Maute, 2017) бе изключено като от часовите стойности на всяка обсерватория бяха извадени съответните часови стойности на станция Belsk (51.84ºN; 20.79ºE). Доброто качество на данните и непрекъснатият ред от измервания през целия анализиран период наложи избора на обсерватория Belsk като станция за сравнение. От така получените стойности за всеки ден бе определена амплитудата на денонощната вариация, означена като Ампл.(У-Ybel).
Така получените редове все още съдържат влиянието на 11-годишния слънчев цикъл, дължащо се на синхронно изменящата се със слънчевата активност йоносферна проводимост. Слънчевото влияние бе изключено чрез изваждане на плъзгащото средно (определено за всяка станция с плъзгащ се прозорец от 5 точки) от реда Ампл.(У-Ybel). Аналогично, магнитосферното и слънчевото влияние в обсерватория Belsk бяха изключени с помощта на данните от обсерватория Niemegk (52.05ºN; 16.72ºE).



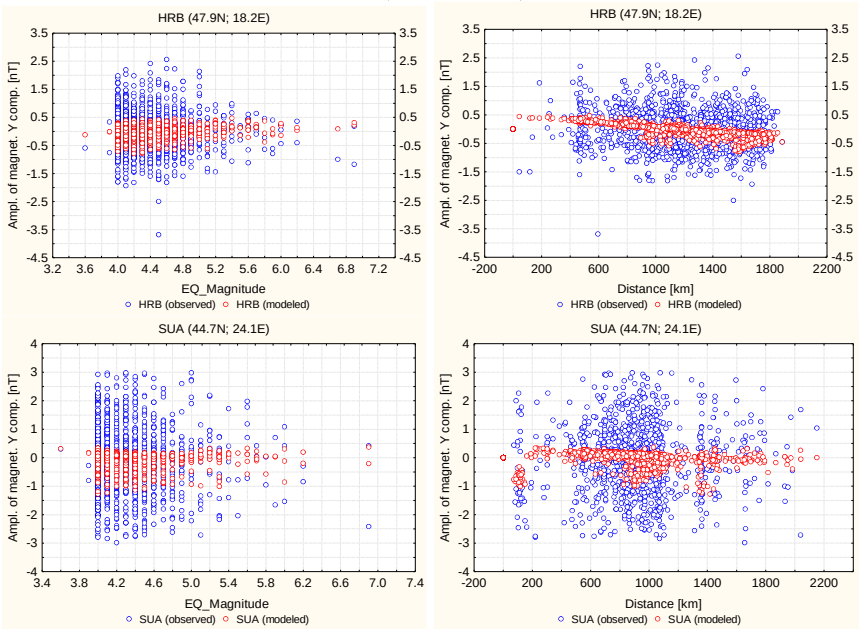
Фиг.1 Сравнение на оригиналният ред от данни за денонощната амплитуда на магнитното поле в ст. Furstenfeldbruck (48.16^0E; 11.28^0N) – ляв панел, реда след изключването на магнитосферното влияние (среден панел) и остатъчния ред след изключването на слънчевата вариация.

На фиг. 1 е представено сравнение между оригиналният ред на обсерватория Furstenfeldbruck (48.16ºE; 11.28ºN) – ляв панел, реда Ампл.(Yfur-Ybel) – среден панел и остатъка след изваждането на плъзгащото средно на реда Ампл.(Yfur-Ybel). Фиг.1 илюстрира факта, че след изключването на магнитосферния и на слънчевия сигнал от оригиналните данни, оставащият ред прилича по-скоро на шум. Анализът на шумообразния ред от данни, във всяка от 19-те обсерватории, бе извършен както с помощта на линейния мулти-регресионен анализ, така и с помощта на нелинейния статистически метод Machine learning – support vectors analysis.

Резултати

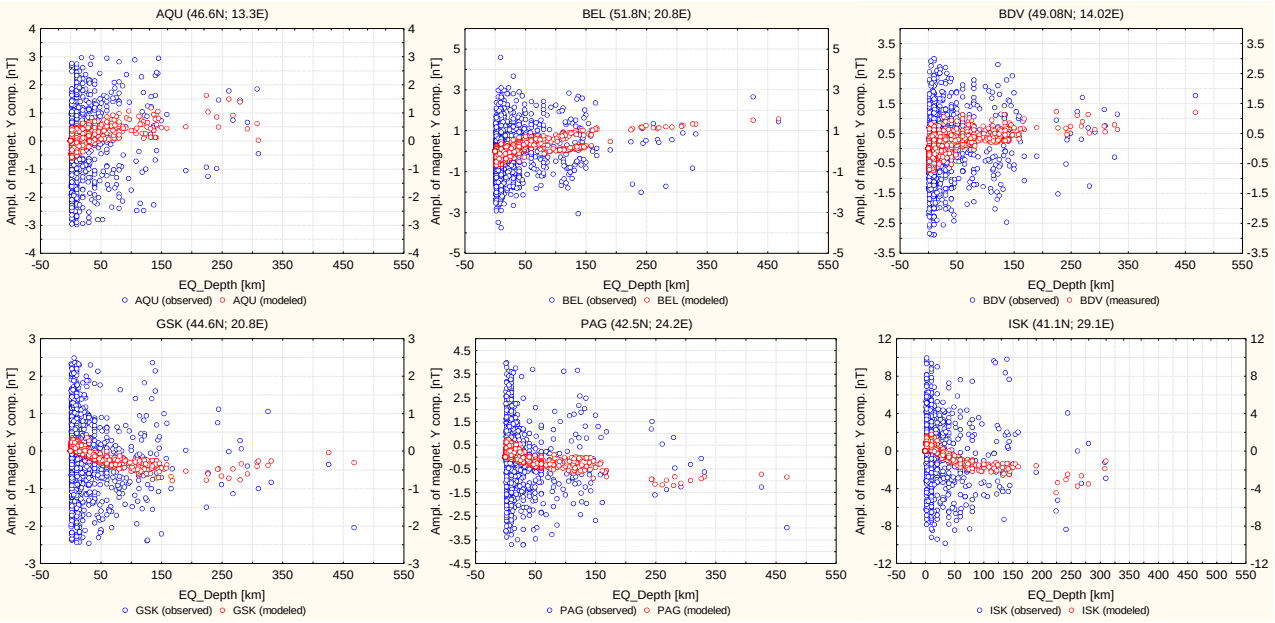
Нелинейният статистически анализ показа, че в преобладаващата част от анализираните обсерватории амплитудата на денонощната вариация на геомагнитната Y-компонента (след изключването на външните влияния) не зависи от амплитудата на земетресението (вариращо между 4 и 6.7 за пълния набор от 1944

земетресения). Зависимостта от разстоянието до епицентъра на земетресението е също слаба – както по данните от линейния така и от нелинейния анализ (виж Фиг.2).

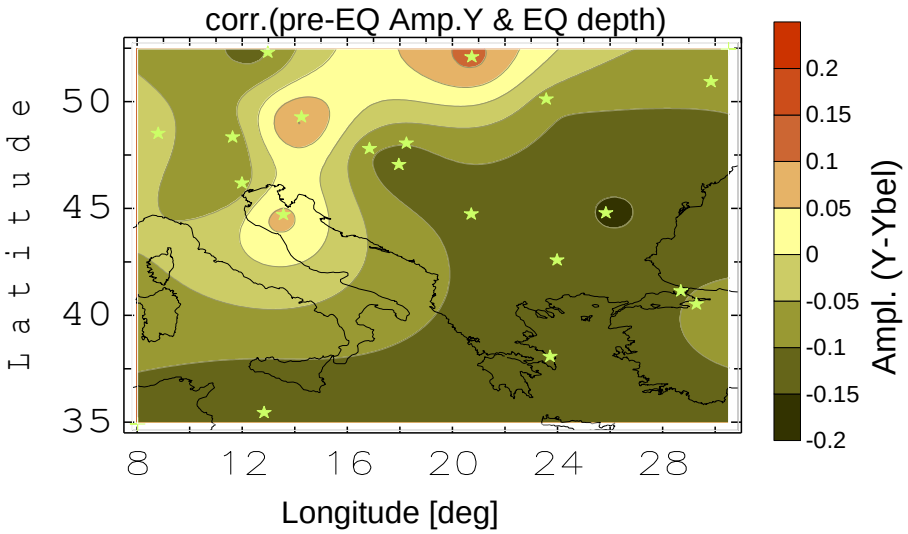


Фиг.2. Зависимост между амплитудата на денонощната вариация на магнитната Y-компонента (Ампл.Y) и магнитуда на земетресението (ляв панел) и разстоянието до епицентъра (десен панел) по данни на магнитните обсерватории Hurbanovo(47.88^{0}N; 18.19^0 E) и Surlari(44.68^{0}N;26.12^{0}E). Сините кръгчета означават измерените стойности на Ампл.Y, червените – моделните стойности получени по метода *Machine learning – support vectors analysis*.

Оказа се, обаче, че амплитудата на денонощната геомагнитна вариация зависи от дълбочината на хипоцентъра на земетресението. На Фиг.3 е представена зависимостта на Ампл.Y от дълбочината на сеизмичното огнище. Сравнени са данните от измерванията в 6 от изследваните обсерватории с моделните резултати получени с нелинейният метод *Machine learning*. Анализът на всичките 19 обсерватории показа, че в преобладаващата част от тях зависимостта от дълбочината е отрицателна, т.е. при по-дълбоките земетресения амплитудата на денонощната вариация (в 7-дневнея период преди събитието) отслабва. В 3 от обсерваториите, обаче, се наблюдава обратната тенденция - увеличаване на изменчивостта на Y-компонентата на магнитното поле преди сеизмичното събитие (виж Фиг.3). А в обсерватория Black Forest (48.33ºN; 8.32ºE) липсва зависимост от дълбочината.



Фиг.3 Зависимост между амплитудата на денонощната вариация на магнитната Y-компонента (Ампл.Y) и дълбочината на хипоцентъра на земетресението по данни от 6 магнитни обсерватории. Сините кръгчета означават измерените стойности на Ампл.Y, червените – моделните стойности получени по метода *Machine learning – support vectors analysis*.



Фиг.5 Пространствено разпределение на пред-сеизмичния ефект в амплитудата на денонощната вариация на магнитната Y-компонента, получен с линейния мулти-регресионен анализ. Местата на магнитните обсерватории са означени със звездички.

Тези тенденции в зависимостта на Ампл.Y се улавят и с линейния мулти-регресионен метод, в който независими променливи са магнитуда, дълбочината и епицентралното разстояние на всяко земетресение до изследваните магнитни обсерватории. Получените коефициенти на регресия са статистически значими, макар и малки по абсолютна стойност. За да получим представа за пространственото разпределение на пред-сеизмичния ефект, намерен в амплитудата на денонощната вариация на магнитнатаY-компонента, сме използвали именно мулти-регресионните коефициенти. Регресионната карта, изчертана само от статистически значимите регресионни коефициенти е представена на Фиг.4.

Интерпретация на получените резултати

Денонощната вариация в интензитета на геомагнитното поле е обусловена от протичащите в йоносферата токове на височини между 90 и 150 км. (Yamazaki and Maute, 2017). Измененията в амплитудата на денонощната магнитна вариация от ден към ден обикновено се приписва на измененията в активността на Слънцето и по-специално, съпровождащите я изменения в електро-проводимостта на йоносферата (Takeda, 2013). В настоящото изследване, обаче, слънчевият сигнал както и влиянието на магнитосферните токове бяха предварително отстранени от първоначалните данни. Следователно, статистически значимото систематично намаление в Амл.Y, наблюдавано в голяма част от анализираните обсерватории, навежда на мисълта за влияние на ендогенни процеси проявяващи си в последния етап от подготовката на предстоящото земетресение.

Лабораторни изследвания на измененията в магнитните характеристики на различни скали под въздействието на силна изотермална компресия показват, че силно намагнитените скали губят магнитния си момент, докато слабо намагнитените рязко го увеличават (Revol et al., 1977). Реалните условия в земната литосфера, обаче, са доста по-комплексни и освен наличието на компресия или екстензия, включват още ръст на температурата с дълбочината, наличие на градиент в зоните на напрежение и деформация, отделянето на флуиди и пр. Съвременните лабораторни експерименти до голяма степен симулират реалните условия в литосферата, съществуващи в зоните на субдукция и активни тектонски движения, сеизмичните разломи и пр. В серия от експерименти при различни температури Till et al. (2010; 2012) показват, че под въздействието на пространствено нехомогенно напрежение се наблюдава значителна асиметрия в магнитната възприемчивост на изследваната композитна проба – в направление перпендикулярно на градиента на приложеното напрежение. Микроскопските изследвания на анализираните проби показват значително издължаване на зърната магнетит в направление на градиента на напрежение, вследствие на пластична му деформация под въздействието на високите температури (1000-1200º К) и налягане. При по-ниски температури, увеличаването на анизотропията в магнитната възприемчивост обикновено се свързва със завъртането на твърдите магнитни зърна под въздействие на приложено напрежение (Owens, 1974). С нарастването на температурата, обаче, зърната магнетит претърпяват пластична деформация, което води до

образуването на магнитни структури при температури многократно надвишаващи температурата на Кюри на магнетита.

Тези експерименти са в състояние да обяснят резултатите от нашия статистически анализ. Така например, тенденцията за отслабване на денонощната вариация на магнитното поле с дълбочината – характерна за преобладаващата част от изследваните станции – може да бъде свързана с преориентацията на магнитните зърна в направлението на градиента в натрупващото се пред-земетръсно напрежение. Така възникналата локална магнитна структура доминира над денонощната изменчивост породена от йоносферните токове – естествено до момента на освобождаване на напрежението. Интересното е, че тази тенденция се проследява до дълбочини, на които настъпва пластична деформация на скалите в горната мантия (т.е. ~170 км), където практически не се наблюдават земетресения. Броят на земетресенията с хипоцентър под 200 км е сравнително малък и не позволява категорични заключения, но във всички регистрирани случаи зависимостта на Ампл.Y от дълбочината е пренебрежимо малка. Този ефект вероятно се дължи на силното уплътняването на молекулярната структура на веществото, която препятства по-нататъшната деформацията на магнитните минерали.

Що се отнася до трите станции (L'Aquila, Budkov и Belsk), в които наблюдаваме нарастване на денонощната изменчивост, оказа се, че това е „ехо“ от далечните земетресения. Статистическия експеримент с ограничаване на разстоянието до епицентъра на земетресението (фиксирано на 800 км) показа, че и в тези обсерватории се наблюдава затихване на денонощната вариация преди сеизмично събитие като ефекта се усилва с увеличаване дълбочината на земетресението.

Заключение

Анализа на денонощната вариация на геомагнитната Y-компонента (Апл. Y) в едноседмичен период преди изследваните 1944 земетресения – след изключване влиянието на слънчевата активност и магнитосферните токове – показаха наличието на свързаност с дълбочината на сеизмичното огнище. Използваните линейни и нелинейни методи за статистически анализ разкриха тенденция към отслабване на денонощната вариация на магнитното поле с увеличаване на дълбочината на земетресението. Този резултат бе интерпретиран в светлината на съвсем новите лабораторни експерименти, които демонстрират появата на магнитни структури при високи температури (съществено превишаващи точката на Кюри) и налягане, под въздействието на нехомогенно разпределена в пространството компресия. Пластичната деформация на магнетита и появата на структури със силен магнитен момент, които доминират локалните магнитни характеристики на средата, силно редуцира или води до пълното изчезване на вариациите индуцирани от йоносферните токове.

Анализа показа още слаба зависимост на Апл. Y от разстоянието до епицентъра на земетресението, което е индикация за локалния характер на измененията в магнитните характеристики на средата под въздействието на тектонските напрежения. В този аспект отсъствието на връзка с магнитуда на земетресението е напълно разбираем, тъй като количеството неутрализирано напрежение е случайна характеристика (освобождава се само част от натрупаното напрежение вследствие на осъществилото се земетресение), която не отговаря на напрежението породило локалната магнитна нееднородност. Този резултат предполага, че наблюдаваните пред-сеизмични изменения в амплитудата на денонощната вариация на Y-компонентата на магнитното поле не дават информация за магнитуда, но евентуално биха могли да служат като индикатор за дълбочината на предстоящото сеизмично събитие.

Благодарности:

Настоящото изследване е частично финансирано от ФНИ, ДН 14/1 от 11.12.2017. The authors acknowledge the INTERMAGNET portal (www.intermagnet.org), and the national institutes supporting it, for the magnetic data provided. We thanks also to the Euro-Mediterranean Seismological Centre (https://www.emsc-csem.org/#2) providing the catalogue of seismic events.

ЛИТЕРАТУРА

Milne, J. (1890) Earthquakes in Connection with Electric and Magnetic Phenomena, Trans. Seismol. Soc. Japan 15, 135-162.

Kilifarska N., Nedialkov R., Velichkova Ts.(2015) Geomagnetic field variations due to active tectonic processes during periods of lower solar and magnetospheric activity, Compt. rend. Acad. bulg. Sci., 68(9), 1145-1152.

Owens, W.H., 1974. Mathematical model studies on factors affecting the magnetic anisotropy of deformed rocks. Tectonophysics 24, 115–131. https://doi.org/10.1016/0040-1951(74)90133-4

Revol, J., Day, R., Fuller, M.D., 1977. Magnetic behavior of magnetite and rocks stressed to failure — Relation to earthquake prediction. Earth and Planetary Science Letters 37, 296–306. https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90175-3

Takeda, M., 2013. Contribution of wind, conductivity, and geomagnetic main field to the variation in the geomagnetic Sq field. Journal of Geophysical Research: Space Physics 118, 4516–4522. https://doi.org/10.1002/jgra.50386

Till, J.L., Jackson, M.J., Moskowitz, B.M., 2010. Remanence stability and magnetic fabric development in synthetic shear zones deformed at 500°C. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 11. https://doi.org/10.1029/2010GC003320

Till, J.L., Moskowitz, B.M., Jackson, M.J., 2012. High-temperature magnetic fabric development from plastically deformed magnetite in experimental shear zones. Geophys J Int 189, 229–239. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05338.x

Yamazaki, Y., Maute, A., 2017. Sq and EEJ—A Review on the Daily Variation of the Geomagnetic Field Caused by Ionospheric Dynamo Currents. Space Sci Rev 206, 299–405. https://doi.org/10.1007/s11214-016-0282-z