

GLOBAL AND LOCAL MODELING OF THE EARTH MAGNETIC FIELD USING SWARM SATELLITES

Violeta R. Yordanova, Andrey I. Andreev

*Department Geodesy, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Sofia, Bulgaria,
violeta.yordanova91@gmail.com*

*Department Artillery, Air Defense and Communication and Information Systems/NMU “Vasil Levsky”,
Shumen, Bulgaria, andreev_an@abv.bg*

Abstract: *This article aims to present the progress of the mission of the European Space Agency SWARM and the importance of the magnetic field for global and local studies like for the territory of the Republic of Bulgaria. Its task is not only to provide high-precision geodata, but also to extract information that helps in the study and surveying of terrestrial processes. Thanks to these results, the scientific community has up-to-date data and discovers the existence of unique processes related to the Earth's magnetic field, as well as its participation in natural disasters. Models based on data obtained from the three SWARM satellites are considered and new variations of the main global models of the magnetic field are presented. Local models for the territory of the Republic of Bulgaria have been generated.*

Keywords: *magnetic field, earth magnetism, SWARM satellites, magnetic models*

ГЛОБАЛНО И ЛОКАЛНО МОДЕЛИРАНЕ НА ЗЕМНОТО МАГНИТНО ПОЛЕ ЧРЕЗ МИСИЯТА SWARM

Виолета Р. Йорданова, Андрей И. Андреев

Въведение

Земното магнитно поле е един от основните фактори за съществуването на редица процеси и явления протичащи на Земята и пространството около нея. От климатичните особености и природни катаклизми, през миграциите на птиците и животните, до телевизията и интернет, магнитното поле има съществена роля за цялостното развитие на живота на Земята. Неговото изследване, разбиране и определяне са от съществена важност не само за учените но и за обикновените хора.

Една от най-масово използваните технологии, базирана на изучаването на магнитното поле е ориентирането с компас и навигацията. Независимо от начина на придвижване – въздушен, наземен или морски и дали става дума за ориентиране с обикновени компаси или автоматизирани навигационни системи, процесите, случващи се в земното ядро определят геомагнитното поле, което е основа във всеки метод за ориентиране и навигация.

1. Глобални модели

Съществуват редица геомагнитни модели, които се разработват, поддържат и актуализират от различни световни научноизследователски организации. Обхватът на приложението им е много широк, вариращ от фундаментални изследвания на земното ядро до геофизични проучвания и откриване на обекти. Тези модели намират приложение в различни научни разработки и се използват с определена цел. SHOM (френска военноморска хидрографска и океанографска служба)

използват само вътрешни и аномални полеви модели. Световният магнитен модел (WMM) се прилага широко в морските и въздушни навигационни системи, използвани от Министерството на отбраната на Обединеното кралство, Министерството на отбраната на САЩ, НАТО и Международната хидрографска организация. Има голямо приложение и в навигационните системи за граждански цели. Международното геомагнитно референтно поле (IGRF) е референтният модел, приет от научната общност за коригиране на основното поле и извеждане на магнитни аномалии. За изследване и оценка на морските масиви се използват глобални модели на аномални полета, като Мрежа на земната магнитна аномалия (EMAG) или Световна дигитална карта на магнитните аномалии (WDMAM). Те могат да се използват и за изчисляване на подобрени регионални магнитни карти. Глобалният геомагнитен модел на Британския геоложки институт (BGGM) е широко използван в петролната индустрия за насочени сондажи с инструменти за магнитно измерване при сондиране. Моделът на магнитната среда на Земята (MEME) е основен модел на магнитното поле, създаван от Британския геоложки институт и използван за научни изследвания. Използва се като основа за моделите на WMM, IGRF и BGGM.

Глобалните магнитни модели описват математически магнитното поле на Земята. Тези модели са сума от три влияния:

- на главното магнитно поле, произлизащо от земното ядро, което варира във времето и представлява 95% от общото поле на повърхността;
- от аномалното поле на земната кора;
- от външното поле, генерирано от горните слоеве на атмосферата и магнитосферата, което зависи основно от слънчевата активност.

Повечето модели се създават с помощта на сериен подход. Състои се от изчисляване на гаусови коефициенти, чрез инверсия и независима оценка на вътрешните и аномалните компоненти на магнитното поле от една страна, и на външния компонент от друга. След това компонентите се обобщават, за да се получи окончателният модел. Моделите са изградени главно като се използват данни от космическите мисии SWARM, OERSTED, CHAMP и SAC-C и с осреднени месечни или годишни стойности от земните магнитни обсерватории. Моделите с висока разделителна способност на аномалния компонент се основават на Мрежа на земните магнитни аномалии (EMAG2) и следователно индиректно включват морски, наземни и въздушни измервания. MAG2v3 и WDMAMv2 (Световна дигитална карта на магнитните аномалии) са аномални мрежи с много висока разделителна способност (с разстояния на мрежата съответно от 2 и 3 дъгови минути), изчислени на средното морско равнище. Полето с къса дължина на вълната се изчислява от обработени и изравнени морски, наземни и въздушни измервания и предварително съставени аномални мрежи. Полето с голяма дължина на вълната се коригира като най-дългите дължини на вълните (по-големи от около 300 км) се заместят с модели, получени от сателитни данни.

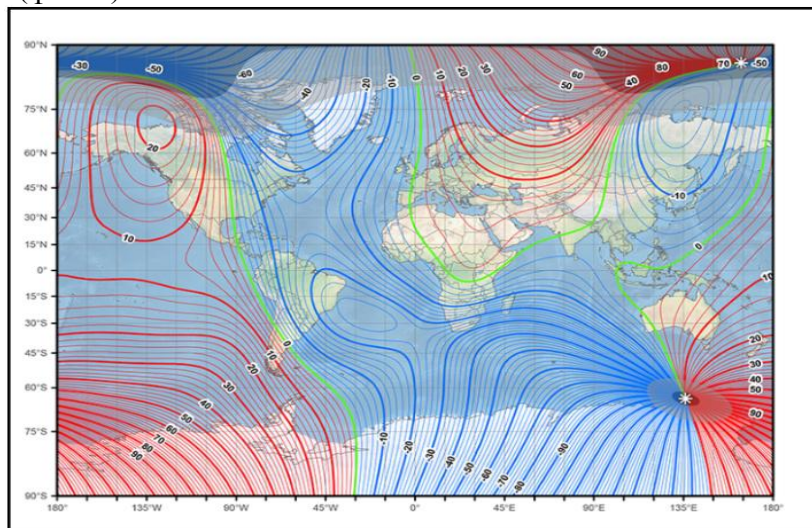
От 1999 година магнитното поле е успешно картографирано и с всяка следваща мисия се получават все по-точни модели, използвани за различни цели – научни, военни и граждански. Мисията SWARM на Европейската космическа агенция от 2013 година, предоставя данни с висока точност, които са в основата на създаването на редица модели на геомагнитното поле, както и измерванията на неговата еволюция във времето. Една от основните цели на мисията е да предостави висококачествени данни и измервания с висока резолюция за изследване на динамиката на земното ядро, геодинамичните процеси и взаимодействието между ядрото и мантията. Чрез данните от три сателита се получават подробни данни за създаване на 3D модели на електропроводимостта на мантията и се получава информация за електричеството, протичащо в магнитосферата и йоносферата.

За да се създаде точен модел на магнитно поле, са нужни измервания на векторните компоненти с добро глобално покритие и ниски нива на шум. Понастоящем мисията SWARM е най-подходящата система за магнитно наблюдение. Използват се и данни от наземни обсерватории, макар и с по-лошо пространствено покритие. Данните от наземните станции предоставят важни информации за промените на геомагнитното поле във времето.

1.1. Световен магнитен модел–WMM

Световният магнитен модел е създаден със спонсорството на Националната агенция за геопроостранствено разузнаване на САЩ (U.S.NGA) и Географския център на отбраната на Обединеното кралство(U.K. DGC). Разработен е от Националните центрове за информация за околната среда на САЩ (NOAA/NCEI) и на Британската геоложка служба (BGS). Използва се от Министерството на отбраната на САЩ, Министерството на отбраната на Обединеното кралство, НАТО и Международната хидрографска организация, за военни навигационни системи, за ориентиране и насочване, като се използват данни от геомагнитното поле. Намира широко приложение и в гражданските навигационни системи, като участва като база за създаване на мобилните навигационни приложения.

Световният магнитен модел е сферично-хармоничен модел със степен и порядък 12, изобразяващ основното геомагнитното поле генерирано от ядрото на Земята, както и неговата вариация във времето. Моментната снимка и различните времеви вариации на модела съдържат по 168 гаусови коефициента, което дава общо 336 коефициента за пълния модел, описващи посоката и интензитета на полето. Към модела е наличен компютърен софтуер за изчисляване на компонентите на магнитното поле в геодезически координати и техните времеви вариации. Промените във външното ядро на Земята водят до непредсказуеми промени в магнитното поле, но системата има голяма инерция, така че тези промени се случват в големи времеви интервали. Изследването на полето в продължение на няколко години, позволява точното картографиране на полето и неговия темп на промяна, а след това чрез линейна екстраполация се определя бъдещото му състояние. С подходящите сателитни наблюдения, прогнозата за WMM е изключително точна към датата на нейното пускане. Периодът на актуалност на всеки модел е 5 години, след това следва да бъде актуализиран с ревизирани стойности на моделните коефициенти. Последната актуализация на модела е WMM2020, от декември 2019 г. и е валидна до 31 декември 2024 г. Тя предоставя информация за векторното магнитно поле от 1 километър под елипсоида WGS 84 до около 850 километра над него (фиг. 1).



Фигура 1: Карта на деклинацията, прогнозирана от WMM2020 на 1 януари 2020 г. на повърхността на елипсоида WGS 84.

Тъй като WMM описва само вътрешното геомагнитно поле с дълги честоти на вълната, важно е да се отделят несвързаните с полето смутители, които иначе биха угрешили коефициентите. Измерванията, направени през деня и в периоди на силна слънчева активност са смутени от външни токови системи, които е трудно да се моделират. Поради тази причина, за създаването на WMM са използвани само данни от нощни измервания и от магнитно тихи периоди.

Някои дялове от измереното магнитно поле, като това на земната кора, могат да бъдат точно моделирани и коригирани преди определянето на коефициентите на основно поле на WMM. Полето на смущения включва характеристики, които дори след внимателен подбор на данни не могат да бъдат моделирани. Също така, полярните орбитални спътници събират повече данни на единица площ при големи географски ширини, отколкото при малки. Към данните, включващи тези характеристики, се въвеждат тежести при пресмятането на коефициентите на WMM.

За да се намерят остатъчни смущения, разширен набор от параметри се оценява съвместно с коефициентите на модела. Отчитат се смущенията на вътрешното магнитно поле с по-малка дължина на вълната (сферична хармонична степен по-голяма от 12), по-високи времеви производни (секуларно ускорение) и смущения от токове, външни за Земята. Наборът от коефициенти заедно с разширените параметри на модела се нарича родителски модел на Световния магнитен модел.

1.2. Модел CHAOS-7

Моделът CHAOS-7 е разработка на Датския технически университет (ДТУ) и е родителски модел на модела IGRM. Обхваща период от 21 години, като неговата разработка започва през 1999 година, а последната негова версия излиза през 2020 г. Една от основните му цели е изучаването на магнитното поле и промените настъпващи в него, изследвайки еволюцията на Южноатлантическата аномалия и бързите промени в полето в Тихоокеанския регион. Изучаването и разбирането на Южноатлантическата аномалия е от първостепенна важност, не само за регулиране на спътниковите траектории, но и за разбирането и произхода на климатични проблеми, като глобално затопляне и промените в нивото на Световния океан.

Още в края на 50-те години на миналия век се забелязват редица смущения в нискоорбитните сателитни мисии, преминаващи през определен регион в геопространството. Оттогава започва усилено изследване и документирание на района и защо именно там сателитите са изложени на значително по-високи нива на радиация. Оказва се, че дълбочината до която могат да достигат заредени частици през радиационните пояси, зависи от интензитета на магнитното поле. Аномалното слабо магнитно поле над Южния Атлантис, води до повишен поток на заредени частици в тази област – радиационна аномалия. През последните години е постигнато изключително пълно и хомогенно покритие от данни, благодарение на сателитната мисия SWARM. С мисията, може да се проследи еволюцията на слабото магнитно поле, както и развитието на радиационната аномалия. Сателитните данни от SWARM спомагат не само за изучаването на аномалиите в магнитното поле, но и предоставят информация за електронните смущения, настъпващи в бордовите компютри. Благодарение на SWARM се наблюдават и проследяват бързите секуларни вариации в Тихоокеанския регион, смятан от научната общност за тих район.

Моделът CHAOS-7 изследва промените в интензитета на полета, картографирани по повърхността на Земята. Процесите, случващи се в ядрото, са определящи за развитието на Южноатлантическата аномалия. За изследването на тези процеси се използват функции на Грийн, които свързват радиалното магнитно поле между сърцевината и мантията с промените в интензитета на полето на сателитна височина.

За създаването на модела са използвани данни от няколко мисии –Orsted, CHAMP, SAC-C, CryoSat-2 и SWARM, като данните от SWARM за последните 6 години са от основно значение за последните научни резултати. Данните от SWARM са за период от ноември 2013 г. до август 2019 г. Информацията за градиента е получена от всеки един от трите сателита, използвайки 15 секундни разлики в данните, един спрямо друг, а данните за градиентите изток-запад са определени от ниската сателитна двойка с измервания на 1 минута, при условие, че времевата разлика е под 50 секунди. Тъй като три сателита подават информация в този интервал от време, данните от тях са допълнително занижени с коефициент 3 или казано по друг начин, до триминутен отчет.

CHAOS-7 осигурява задоволително приспособяване към сателитната информация, без данни за големи отклонения и остатъчни грешки. В сравнение с CHAOS-6, остатъците по Хубер,

между CHAOS-7 и допринасящите данни, са по-ниски - между 0,2 и 0,69 nT, предвид неполярните скаларни данни и векторния компонент. С най-добро подобрение на векторните компоненти са данните в направление изток-запад. Например, остатъчната средна квадратна грешка (СКГ) за SWARMA1fa е 1,91 nT в CHAOS-7, в сравнение с 2,49 nT в CHAOS-6. Наблюдава се и малко понижение в остатъчните грешки при разликите между дължината на трасето и направлението изток-запад, в порядък от 0,05 nT. По-ниските остатъчни грешки се отдават на по-строгия избор на данни и на отпускането (отслабването) на времената регулация в CHAOS-7.

Особен интерес представлява приспособяването към новия набор от данни, предоставен от CryoSat-2. CHAOS-7 е в състояние да приспособи тези данни, заедно с едновременните данни на секуларна вариация от наземни обсерватории, до СКГ по Хубер от 4,21 nT за неполярни скаларни данни, с векторни компоненти между 4,0 и 5,25 nT. Средните остатъчни количества са по-малко от 0,25 nT, което показва малко доказателства за оставащи отклонения.

Моделът е CHAOS-7 е родителски модел на кандидат моделите на ДТУ за IGRF-13.

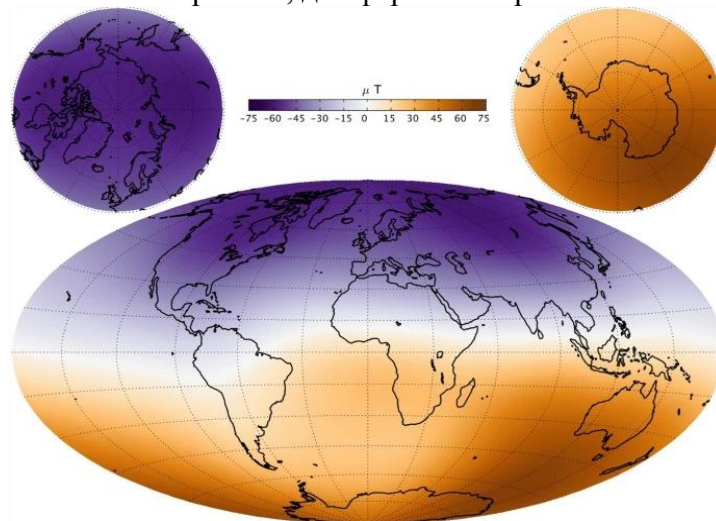
- Модел на Определено геомагнитно референтно поле (DGRF), епоха 2015.0. Основният модел CHAOS-7 е оценен в епоха 2015.0 и коефициентите на сферичните хармоники за вътрешното поле до степен и ред 13 са изведени до 0.01 nT.

- IGRF, епоха 2020.0: CHAOS-7 е оценен в епоха 2019.75, последната дата, за която са налични сателитни данни за конструиране на модела. След това тези коефициенти са размножени напред до епоха 2020.0, като се използва информацията за линейната секуларна вариация от CHAOS-7 през епоха 2019.0. Получените сферични хармонични коефициенти за вътрешното поле през епоха 2020.0 до степен и ред 13 са изведени до 0.01 nT.

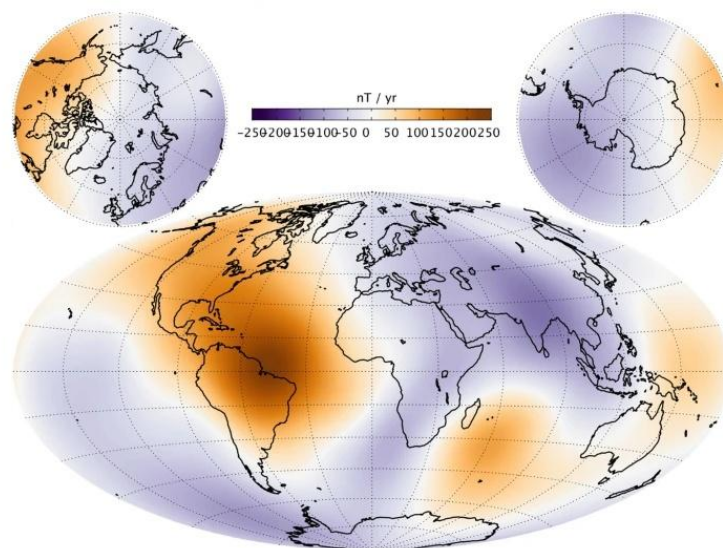
- Прогноза за средната секуларна вариация от 2020.0 до 2025.0: Избрана е оценка на секуларната вариация от CHAOS-7 в епоха 2019.0, поради възможни крайни ефекти в сплайн модела на секуларното ускорение, като не е правен опит за екстраполация. Коефициентите на сферичните хармоники за секуларната вариация за вътрешното магнитно поле през епоха 2019.0, до степен и ред 8 са изведени до 0.01 nT/година.

Поради невъзможност за строго изчисление на оценка на несигурността на модела, такава не е предоставена. Формалните грешки са нереално малки, тъй като корелациите за грешки в данните се игнорират и моделът е непълен. Най-големите грешки ще се дължат на отклонения, причинени от немоделирани източници, като полярните електроструи.

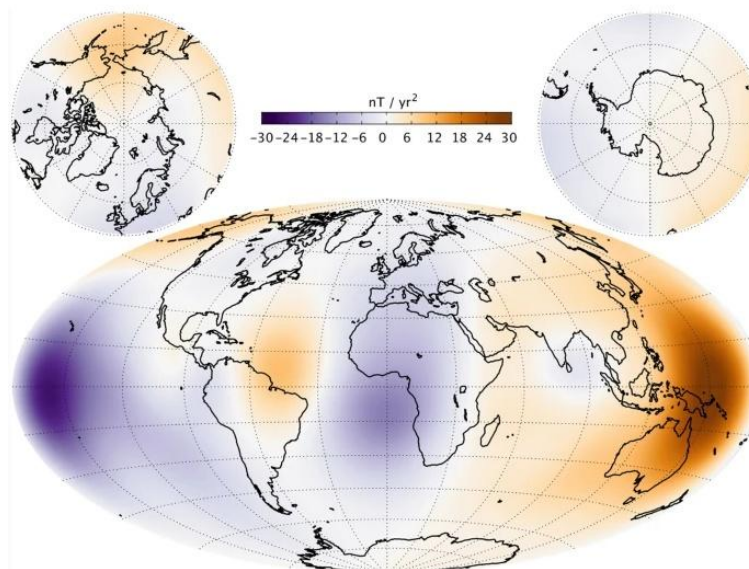
Фигура 2a, 2б и 2в представят карти на радиалния компонент на основното магнитно поле, неговата първа производна (секуларна вариация) и втората времева производна (секуларно ускорение) от CHAOS-7 на земната повърхност, до сферично-хармонична степен 20, през 2019 г.



Фигура 2a: Карта на радиалния компонент на основното магнитно поле



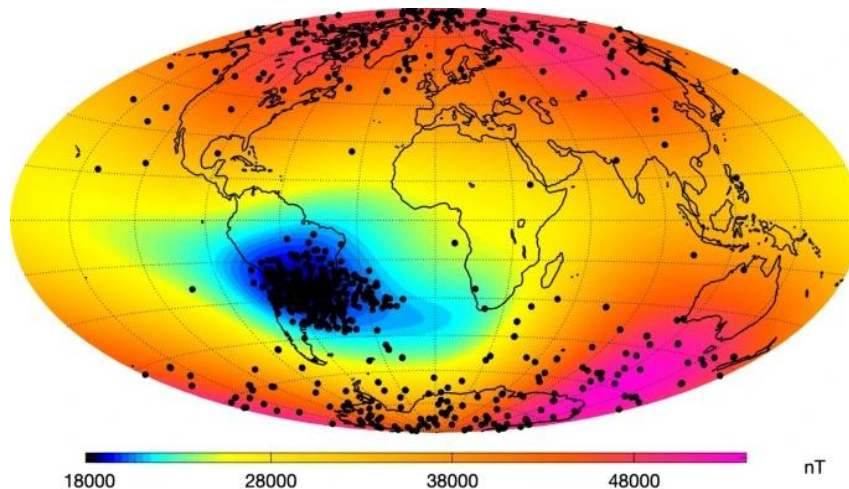
Фигура 2б: Карта на радиалния компонент на основното магнитно поле



Фигура 2в: Карта на радиалния компонент на основното магнитно поле

След пускането на SWARM през 2014 г. се наблюдават значителни промени в Южноатлантическата аномалия, както и се следи техния произход в промените в радиалното поле на границата ядро-мантия. Фигура 3а представя контура на интензитета на полето на 450 км надморска височина през август 2017 г., даден от вътрешната част на полевия модел CHAOS-7, с така наречените единични смущения, записани на борда на трите спътника SWARM, между ноември 2013 г. и август 2019 г., и насложени. Тези смущения се записват рутинно като част от процедурите за проверка на битове в бордовата електроника и показват, когато сателитната апаратура е била засегната от сблъсъци с високоенергийни заредени частици. Появата на смущения обикновено се увеличава с географска ширина към полярните области, където високоенергийните заредени частици се насочват по линиите на магнитното поле, свързващи магнитосферата и йоносферата. Независимо от това, най-високата концентрация на единични смущения се наблюдава ясно в средните и малките географски ширини в региона на слабото поле на Южната Атлантическа аномалия. Това дава ярка илюстрация на въздействието на аномалията върху космическата инфраструктура в ниска земна орбита. Като се има предвид поредицата от такива карти, най-слабият полев регион на сателитна височина, показан със син цвят на фиг. 3а, през последните шест годи-

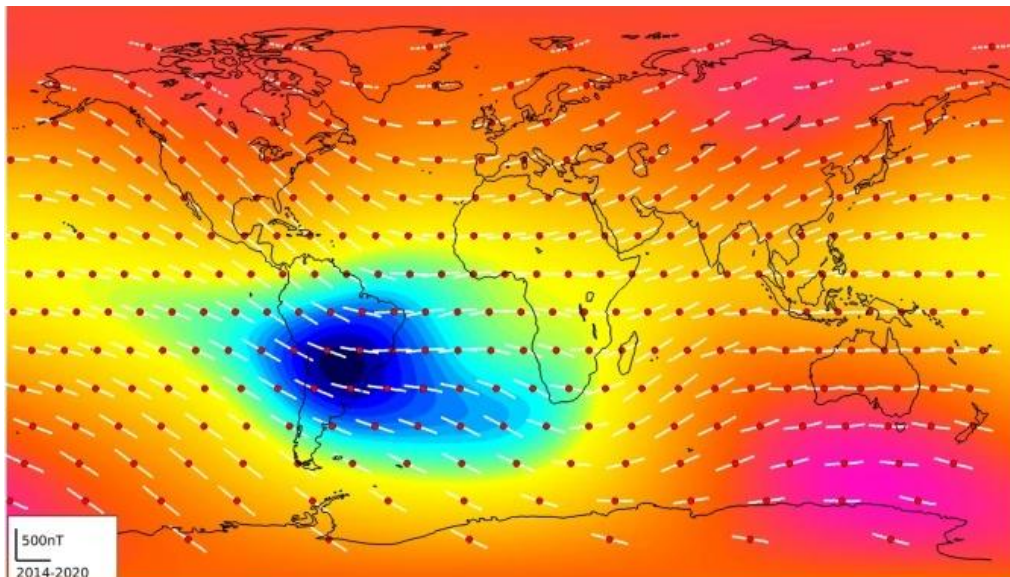
ни бавно се простира на изток, от Южна Америка към Южна Африка, на географски ширини между 30 и 45°.



Фигура 3а: Карта на най-слабия полеви регион на сателитна височина, показан със син цвят

Фигура 3б показва интензитета на полето от CHAOS-7, отново на 450 км надморска височина през август 2017 г., но вече покрит с времеви редове, показващи промяната на наблюдаваната интензивност на полето между 2014 до 2019 г. в мрежа от 300 геомагнитни виртуални обсерватории (ГВО). Данните, представени в тези времеви редове, са получени от наблюдения в радиус от 700 км от червените целеви точки чрез използване на локален потенциал на всеки 4 месеца. Сериите показват, че интензитетът на полето на височината на спътниците на SWARM (между 450 и 530 км) като цяло е намалял от 2014 г. над Северна и Южна Америка, като най-бързият спад се наблюдава над Северна Америка и над Тихия океан на запад от Южна Америка. От друга страна, интензивността на полето се е увеличила над Индийския океан и Азия.

Особен интерес представлява случващото се в региона на Южноатлантическата аномалия. Виртуалната обсерватория на SWARM показва, че интензитетът на полето е намалял по западните ръбове на аномалията, което води до нейното разширяване на запад. Има по-скромни намаления на интензивността в рамките на аномалията, а интензивността се увеличава в североизточния ѝ край, в централната част на Атлантическия океан към Северна Африка. Поразителен спад в интензитета на полето се наблюдава и по югоизточния край на аномалията, в района към Южна Африка около 45° ю.ш. на меридиана Гринуич, което води до разширяване на аномалията на изток в тази посока. Това показва, че развитието на Южноатлантическата аномалия е по-сложно от просто движение на запад и разширяване на единична аномалия.



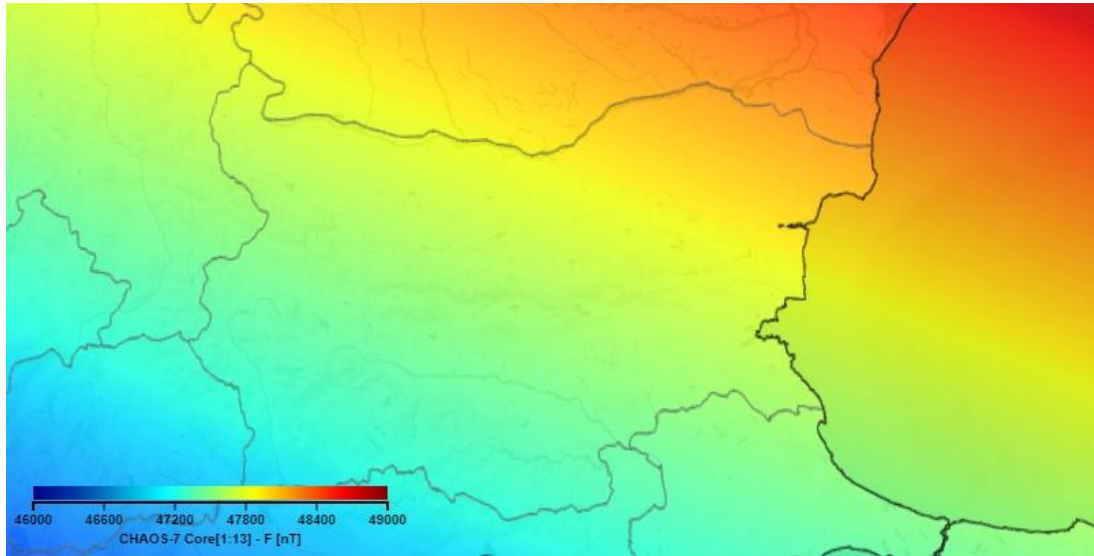
Фигура 3б: Интензитетът на полето, представен от CHAOS-7

2. Локални магнитни модели

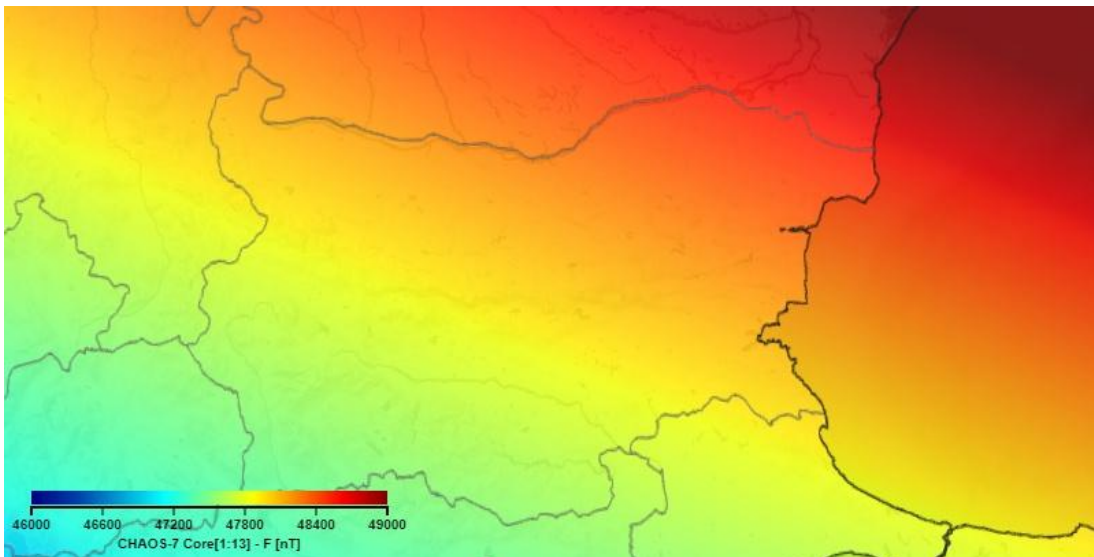
Създадени са локални модели на магнитното поле за март 2014 г. и март 2021г., като са използвани измервания от мисията SWARM и модела CHAOS-7. Използвани са данни, които служат за картографиране и представяне на основното магнитно поле, генерирано от земното ядро. Локалните модели са създадени за територията на Република България и обхващат основните компоненти на магнитното поле – интензитет, инклинация и деклинация, с цел съпоставка и анализ на измененията.

Данните използвани за генерираните локални модели са Ниво-1б. Продуктите Ниво-1б от мисията SWARM съдържат динамични серии от качествено проверени, калибрирани и коригирани измервания, дадени във физически единици SI, в геолокализирани координатни системи. Продуктите от Ниво-1б се предоставят индивидуално за всеки от трите сателита SWARM A, SWARM B и SWARM C ежедневно, т.е. всеки продукт съдържа всички налични данни от този ден от 00:00 до 24:00 UT време.

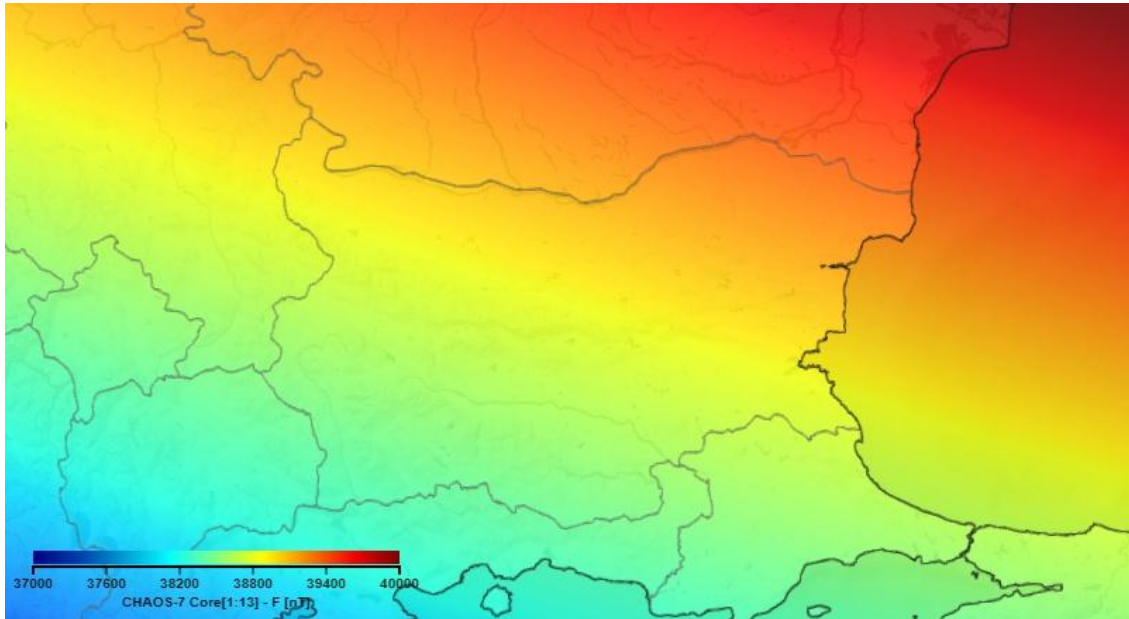
На фигури 4а и 4б е показан интензитетът на магнитното поле съответно за периоди март 2014 г. и март 2021 г. Моделите са базирани на световния модел CHAOS-7. Ясно се вижда, че за период от седем години интензитетът на магнитното поле се е увеличил като е достигнал интервал за територията на страната от 47 300 nT до 48 500 nT. Моделите показват силата на основното магнитното поле генерирано от ядрото на земята и отнасящо се за 0 км наделипсоидна височина.



Фигура 4а: Интензитетът на магнитното поле за март 2014г. При $H = 0\text{km}$.



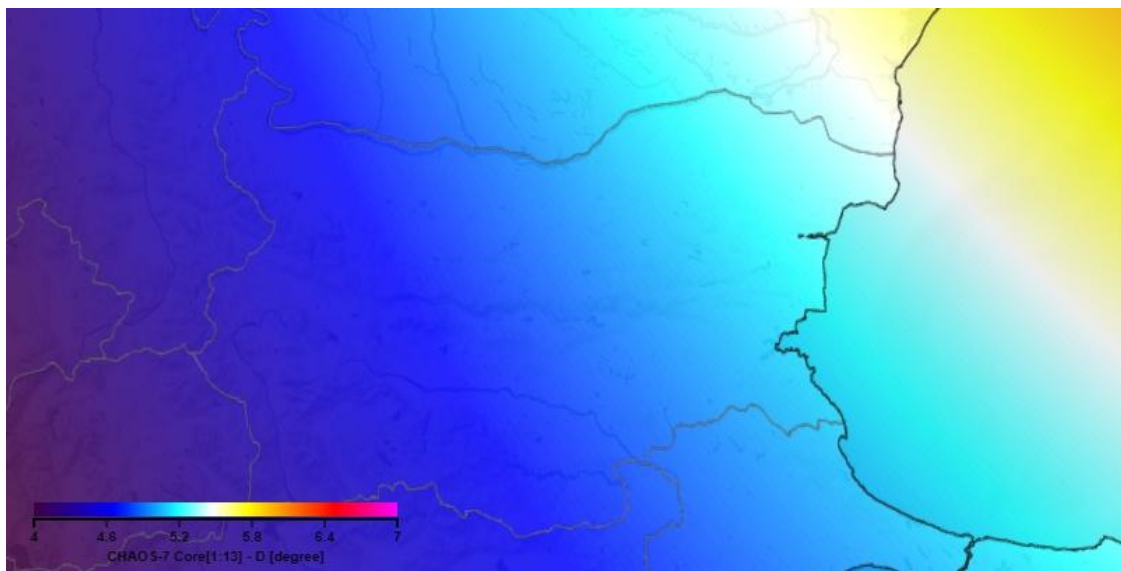
Фигура 4б: Интензитетът на магнитното поле за март 2021г. При $H = 0\text{km}$.



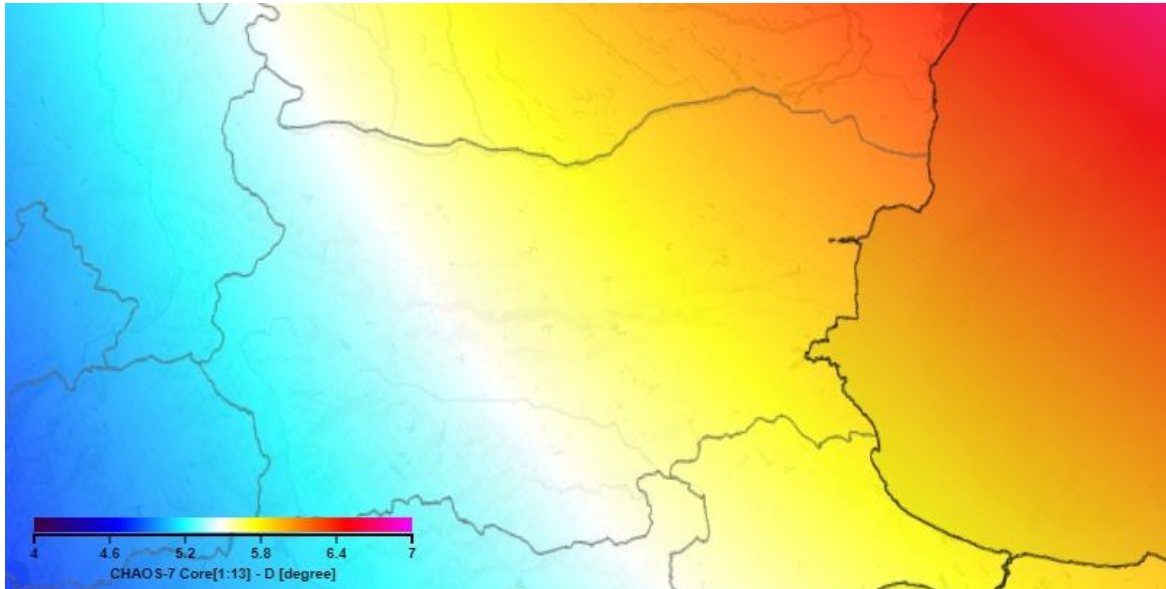
Фигура 4в: Интензитетът на магнитното поле за март 2021г. При $H = 450\text{km}$.

Фигура 4в представя силата на магнитното поле на височина 450 км над земния елипсоид или височината, на която SWARM сателитите обикалят около Земята. Чрез съпоставка между фигура 4б и 4в лесно може да се види и да се направи разлика в промяната на магнитното поле във височина. То променя силата си, като намалява с около 9 100 nT за цялата територия на страната.

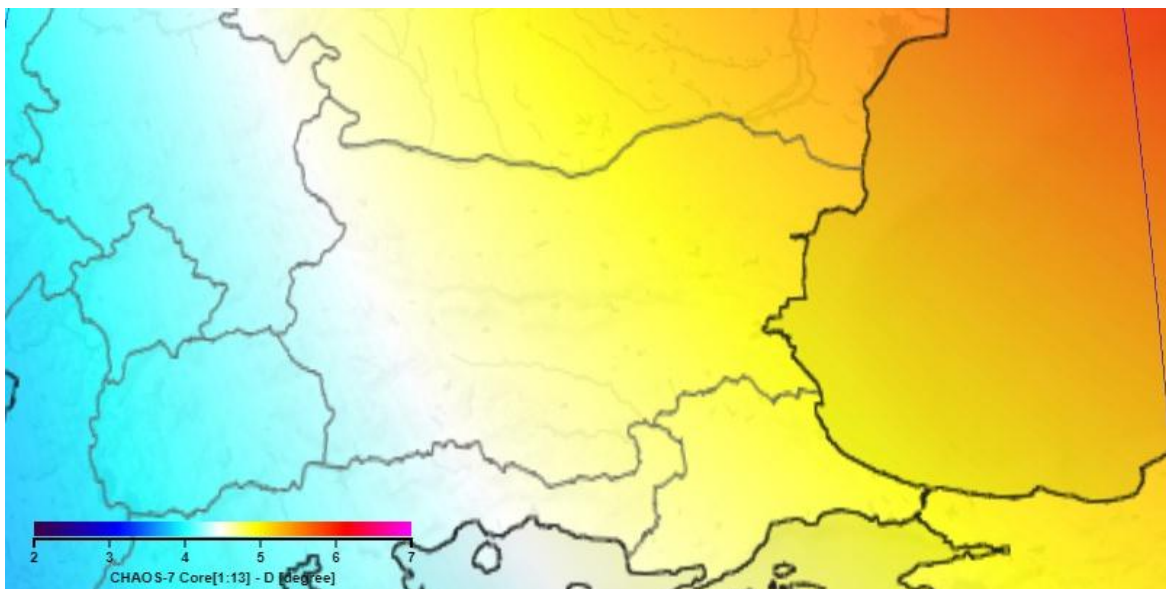
Фигури 5а и 5б са генерирани модели на деклинацията на магнитното поле за територията на България. При стойности между $4,2^\circ$ и $5,5^\circ$ за 2014 година, през последните седем години е достигнала стойности между $5,1^\circ$ и $6,4^\circ$.



Фигура 5а: Деклинация на магнитното поле за март 2014г. При $H = 0\text{km}$.

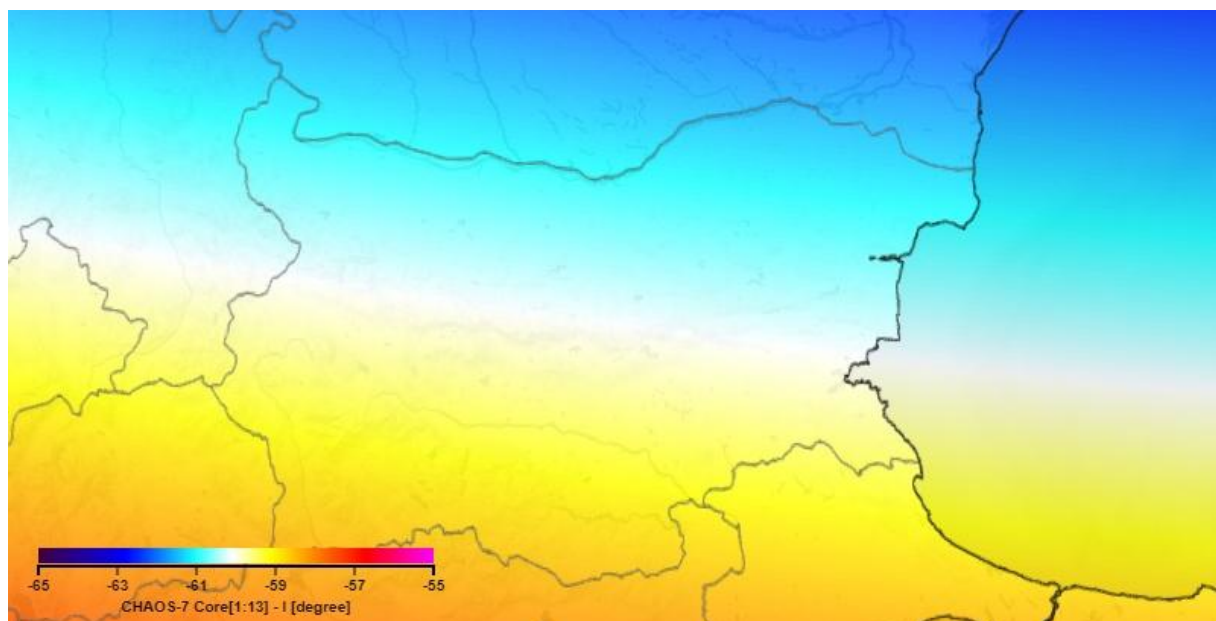


Фигура 5б: Деклинация на магнитното поле за март 2021г. При $H = 0\text{km}$.

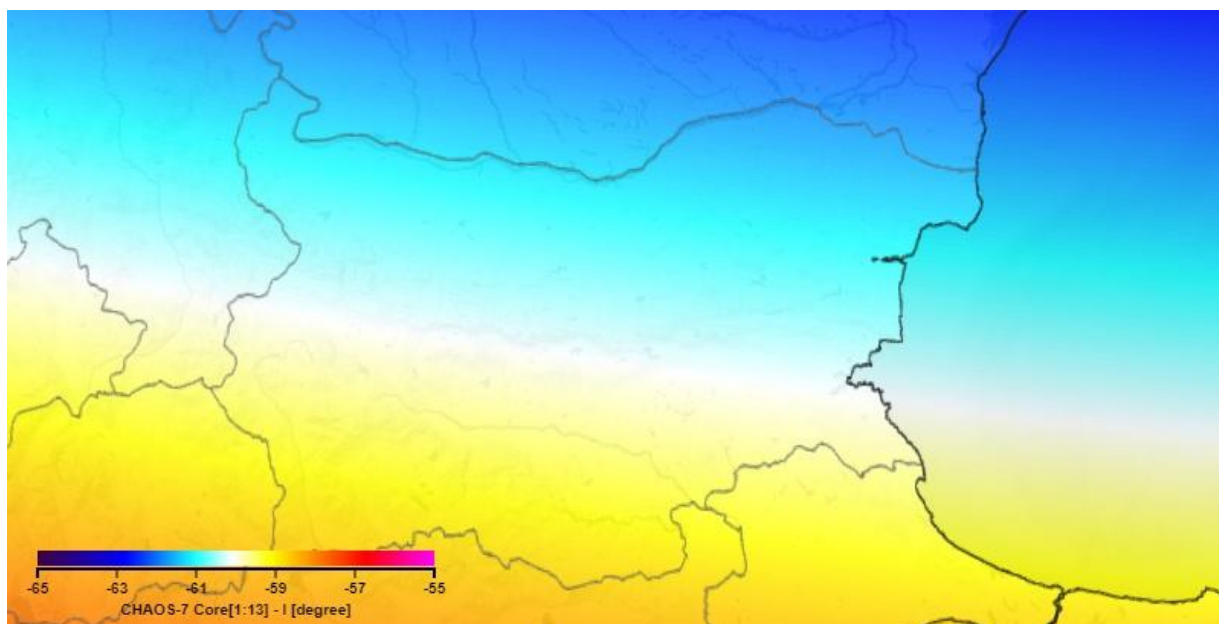


Фигура 5в: Деклинация на магнитното поле за март 2021г. При $H = 450\text{km}$.

Фигура 5в отразява промените на деклинацията във височина, като ясно се вижда нейната промяна в интервала между $4,2^\circ$ и $5,1^\circ$. Забелязва се, че не само намалява като стойности, но и като разлика в границите на интервала. Може да направим извода, че във височина промяната на деклинацията не е толкова рязка и процесите в магнитното поле се случват по-плавно.

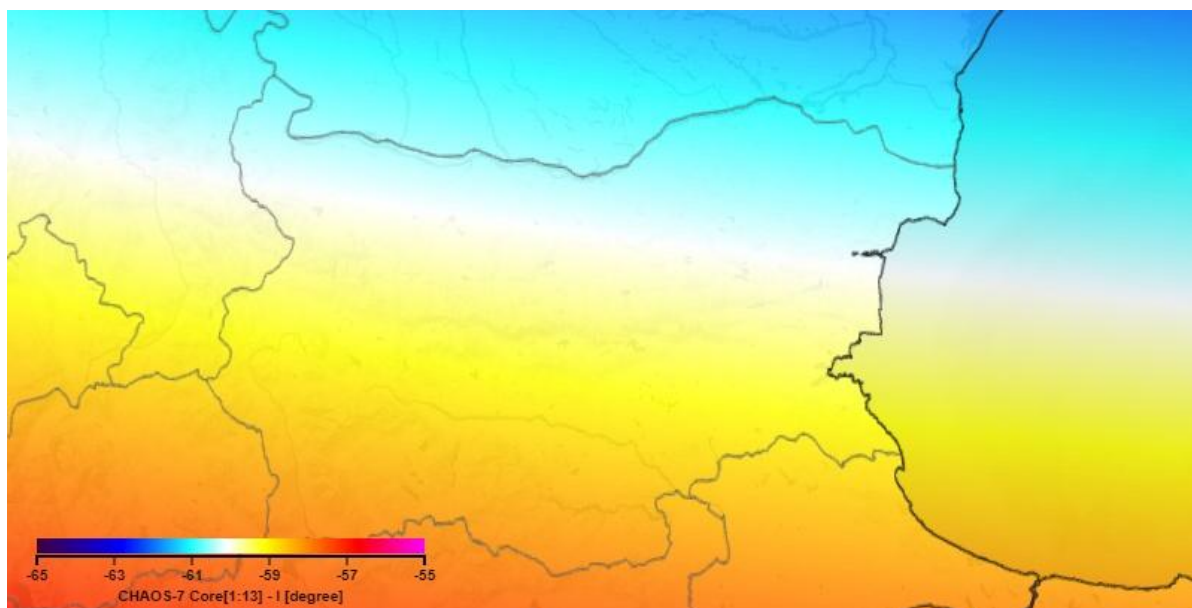


Фигура ба: Инклинация на магнитното поле за март 2014г. При $H = 0\text{km}$.



Фигура бб: Инклинация на магнитното поле за март 2014г. При $H = 0\text{km}$.

Като се сравнят фигури *ба* и *бб* се вижда, че промяната в инклинацията на магнитното поле, за територията на страната е изключително малка. Промяната е в рамките на половин градус, с тенденция да се увеличава от североизток към югозапад.



Фигура 6б: Инклинация на магнитното поле за март 2014г. При $H = 450\text{km}$.

От фигура 6в може да се види, че в този случай инклинацията се увеличава във височина. Промяната е с 1° , като нараства от югозапад към североизток.

Заклучение

Промените в магнитното поле на Земята може да са бурни, но предвидими. Изследването и изучаването на магнитното поле на Земята е от съществено значение не само за научните среди, но за развитието и усъвършенстването на технологиите за военни или граждански цели, както и за разбирането и мониторинга на природните явления и катаклизми.

Мисията SWARM има безпрецедентна и неоспорима заслуга за прогреса в научните открития и изследвания, свързани с магнитното поле. Данните от трите спътника са с изключителна точност, покритие и гъстота, като предоставят ценна информация. Моделите генерирани от тях, могат да се използват за изучаване и съпоставка на компонентите на полето във всяка височина и момент. Това води до улесняване на процесите на изследване на магнитната история, тектониката на земните плочи, обръщането на полюсите, както промените настъпващи в земното ядро.

В локален план, данните от SWARM могат да се използват съвместно с данни от наземни станции, така че да се повиши точността на създаваните магнитни карти и модели. Създадените локални модели на магнитното поле за територията на Република България могат да се използват, с цел да се спестят време и ресурси при създаването и актуализирането на карти на магнитното поле.

References

1. Barrois O, Hammer MD, Finlay CC, Martin Y, Gillet N (2018) Assimilation of ground and satellite magnetic measurements: inference of core surface magnetic and velocity field changes. *Geophys J Int* 215(1):695–712. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy297>
2. British Geological Survey https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/directionaldrilling/bggm.html
3. British Geological Survey <https://geomag.bgs.ac.uk/research/modelling/MEME.html>
4. Chulliat A, Brown W, Alken P, Beggan C, Nair M, Cox G, Woods A, Macmillan S, Meyer B, Panizza M, 2020 *The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025*. British Geological Survey, 121pp.

5. Chulliat A, Brown W, Alken P, Macmillan S, and Panizza M. *Modeling Earth's Ever-Shifting Magnetism*. Geology and Geophysics, 2021
6. Finlay, C.C., Kloss, C., Olsen, N. et al. *The CHAOS-7 geomagnetic field model and observed changes in the South Atlantic Anomaly*. Earth Planets Space **72**, 156 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01252-9>
7. Manda M, Olsen N (2006) A new approach to directly determine the secular variation from magnetic satellite observations. *Geophys Res Lett* 33(L15):306. <https://doi.org/10.1029/2006GL026616>
8. Maus S et al (2009) *EMAG2: a 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements*. *Geochem Geophys Geosyst* 10:Q08005. <https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
9. National Centers for Environmental Information (NCEI) <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/limit.shtml>
10. Oehler, JF., Rouxel, D. & Lequentrec-Lalancette, MF. Comparison of global geomagnetic field models and evaluation using marine datasets in the north-eastern Atlantic Ocean and western Mediterranean Sea. *Earth Planets Space* 70, 99 (2018). <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0872-y>
11. Olsen N, Manda M (2007) Investigation of a secular variation impulse using satellite data: The 2003 geomagnetic jerk, *Earth Planet. Sci Lett* 255:94–105. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.12.008>
12. Rother M, Korte M, Morschhauser A, Vervelidou F, Matzka J, Stolle C (2020) The Magnum core field model as a parent for IGRF-13, and the recent evolution of the South Atlantic Anomaly. *Earth Planets Space*. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01277-0>
13. Thébaud E, Purucker M, Whaler KA, Langlais B, Sabaka TJ (2010) *The magnetic field of the Earth's lithosphere*. *Space Sci Rev* 155:95–127