

Получена: 22.12.2017 г.

Приета: 28.05.2018 г.

## ИЗМЕРВАНЕ НА ЗЕМНИЯ МАГНЕТИЗЪМ. SWARM САТЕЛИТИ

**В. Йорданова<sup>1</sup>**

*Ключови думи:* магнитно поле, земен магнетизъм, SWARM сателити, измерване, магнитни модели

### РЕЗЮМЕ

Тази статия има за цел да проследи развитието на методите за изследване на магнитното поле на Земята, резултатите получени от тях, както и да направи анализ на получените модели. Главният акцент пада върху последната мисия на Международната космическа агенция и се базира на опита от мисиите на Ørsted и CHAMP – SWARM. Нейна основна цел е да предостави най-добрите досега измервания на магнитното поле, да спомогне за разбирането на неговата еволюция във времето и натрупването на нова информация за Земята, използвайки по-доброто разбиране на вътрешността на Земята и климата.

### 1. Въведение

От 1960 година до днес магнитното поле на Земята периодично е изследвано чрез сателити. Първите сателити измервали само силата на магнитното поле, като често използвали неабсолютни инструменти. Няколко сателитни мисии са се опитвали да измерят пълния вектор на полето, използвайки звездни камери, за да установят посоката на триосния сензор за поток. Сателитите осигурявали отлично разпределение на данни, но като цяло служели за кратък период от време – от месеци до няколко години. Първият космически кораб, осигуряващ пълни измервания на магнитното поле, е MAGSAT,

---

<sup>1</sup> Виолета Йорданова, инж., бул. „Цар Борис III” № 25, ап. 2, гр. София 1612,  
e-mail: violeta.yordanova91@gmail.com

пуснат в началото на 80-те, но следващите двадесет години нямат сателитно покритие на магнитното поле.

Първите години от десетилетието на изследване на геопотенциала предоставят на геомагнитното общество изобилие от висококачествени данни от няколко сателита в близост до Земята – Ørsted, CHAMP, SAC-C и Swarm.

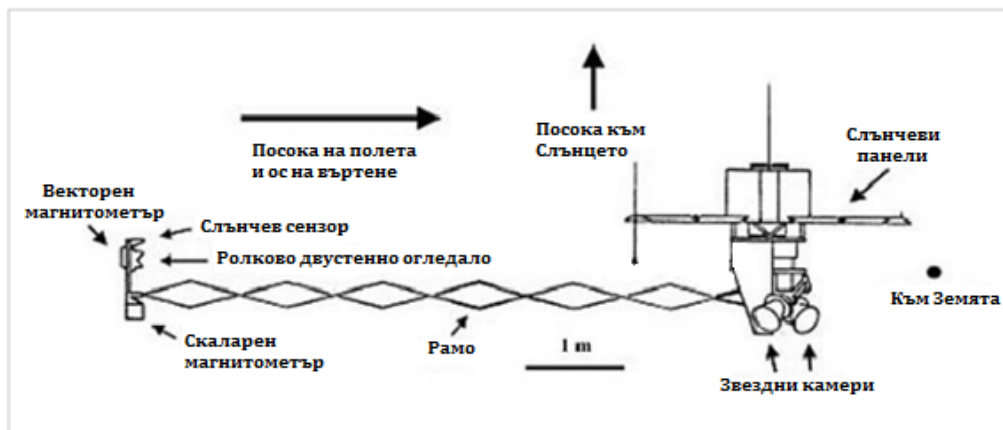
## 2. Сателитни мисии от 1980 г. до днес

### 2.1. MAGSAT

Първият спътник, който предоставя ценни векторни данни за моделиране на геомагнитното поле, е MAGSAT, чийто резултат е наличието на магнитни измервания за период от шест месеца между 1979 г. и 1980 г.

На 30.10.1979 г. сателитът е издигнат в слънчево-синхронизирана околоземна орбита с наклон  $96,76^\circ$ , с апогей 561 километра и перигей 352 километра.

MAGSAT е първата космическа апаратура, способна да измерва магнитното поле в такава близост до земната повърхност. Сателитът носи два магнитометъра – триосен магнитометър (flux-gate) за определяне на силата и посоката на магнитното поле и скаларен (Cesium vapour) за определяне на магнитното поле, причинено от самия векторен магнитометър. Магнитните инструменти са монтирани на 6-метрово рамо, заедно с две звездни камери, използвани за определяне на позицията на космическия кораб спрямо Земята. И двата магнитометъра имат разделителна способност, по-малка от 1,0 nT (nanoTesla).



Фиг. 1. Линеен чертеж на MAGSAT, ориентация и апаратура

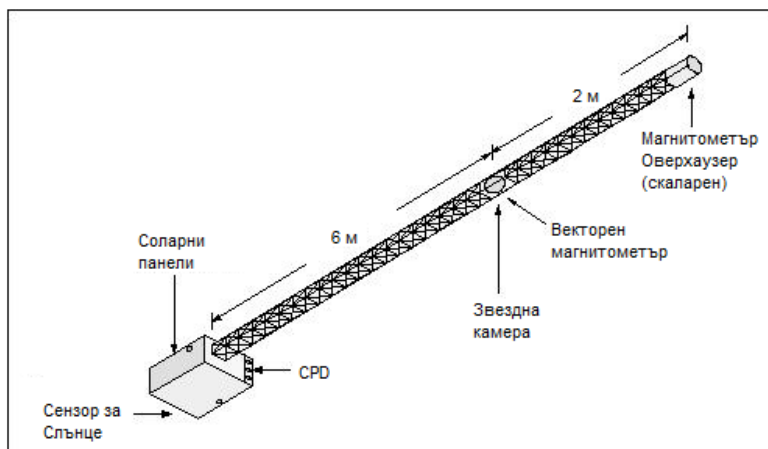
MAGSAT се смята за една от най-важните научни мисии, орбитиращи около Земята – данните, получени от нея все още се използват, особено при свързване на нова сателитна информация със стари наблюдения.

Близката орбита до Земята е поддържана с цел векторните магнитометри да могат да засекаят магнитното поле в близост до повърхността на Земята. Информацията, събрана от тази мисия, позволява 3D картографиране на магнитното поле във вътрешността на Земята, така както никога досега.

Един от основните проблеми при MAGSAT е, че при движението на метален предмет се създава магнитно поле. Проучвания след мисията установяват нелинейна реакция на поточните сензори при излагане на полета, по-големи от 5000 mT (milliTesla), като приложното поле трябва да е напречно на оста на магнетометъра.

## 2.2. Ørsted

Датският магнитен сателит Ørsted стартира на 23.02.1999 г. и отчасти все още е оперативен, тъй като големината на магнитното поле все още се измерва. Основната част на сателита носи цялата електроника, докато научните инструменти са поместени върху 8-метрово рамо – магнетометър „Оверхаузер“ на върха на рамото, за измерване на интензитета на магнитното поле, триосен сензор за поток и звездна камера за измерване на компонентите на магнитното поле. Позицията му се определя посредством GPS приемници.



Фиг. 2. Чертеж на сателитната мисия Ørsted

Наклонът на орбитата е  $96,5^\circ$  към земния екватор. Това позволява сканиране на почти цялото кълбо. Сателитът орбитира около Земята за период 100 минути, в полярна орбита с перигей 655 km и апогей 857 km. Наличните данни са от височина от 640 km до 850 km. Орбитата се движи около 0,91 минути в местно време всеки ден. След 4 години в космоса перигеят, апогейт и периодът са намалели съответно до 640 km, 845 km и 99,7 минути.

Целта на мисията е да се извършат високоточни измервания на геомагнитното поле и глобално наблюдение на земните частици, заредени с висока енергия. Данните се използват за подобряване на геомагнитните модели, за изследване на северното сияние и за корелация със земни измервания, при изследване на връзката между външното поле и енергийното свързване на системата слънчеви ветрове-магнитосфера-йоносфера.

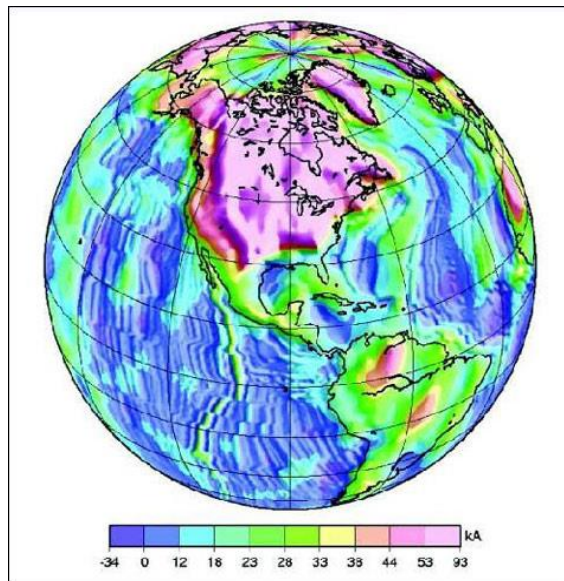
Една от основните цели на Ørsted е да попълни дупката от магнитни измервания след мисията MAGSAT на НАСА. Сателитът Ørsted и неговият инструментариум служат за модел на други оперативни и предстоящи мисии като CHAMP и Swarm, тъй като това е първият сателит от „Международното десетилетие на геопотенциалните изследвания“ [9].

През 2010 г. основната цел на научната мисия Ørsted е да продължи набирането на висококачествени скаларни магнитни данни, за да се осигури припокриване с предстоящата тогава мисия на Европейската космическа агенция – Swarm. Потенциалното припокриване между Ørsted и Swarm би осигурило уникална възможност за точно вътрешно калибриране на двете мисии.

Спътникови системи на Ørsted, най-вече устройствата за възстановяване и софтуерно съживяване, спомагат за изключителната издръжливост на мисията, дори повече от очакваното. Извлечените поуки от мисията се считат за много полезни за бъдещите космически мисии и най-вече за апаратурата и оборудването на Swarm мисията.

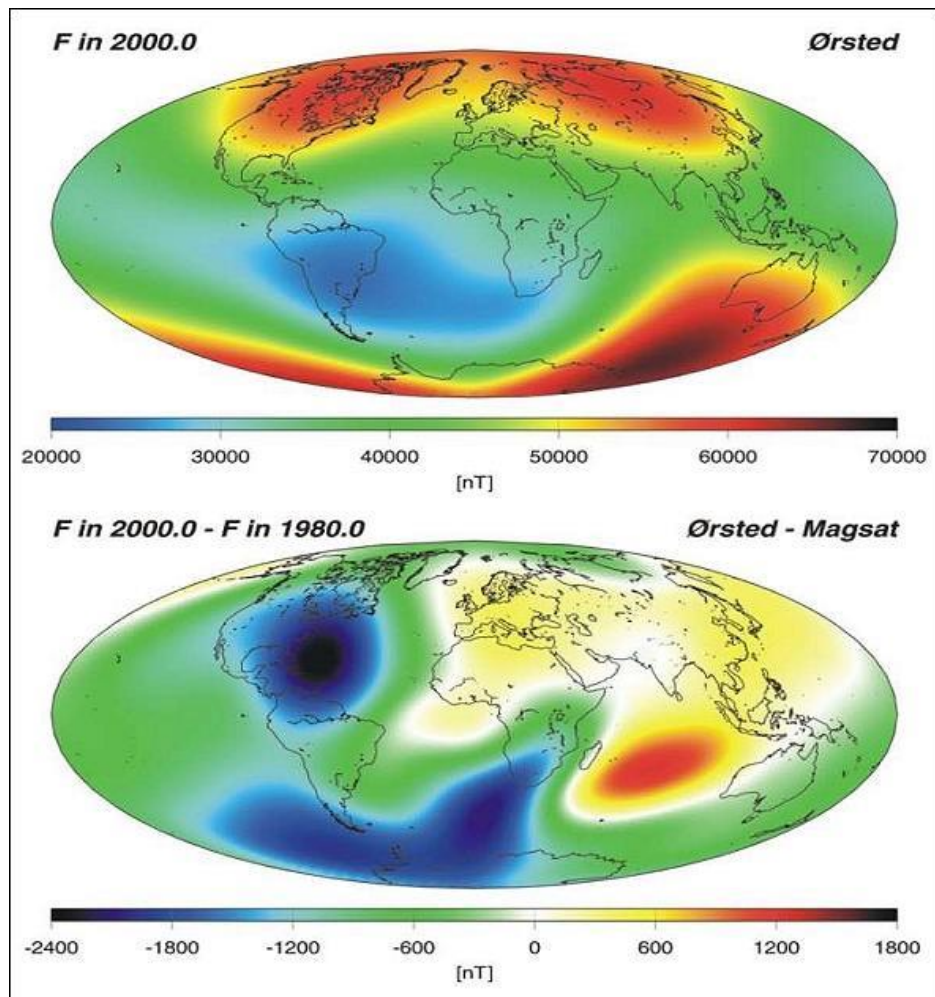
Някои от важните резултатите от мисията Ørsted са:

- разбиране на вихровите потоци на течен метал в сърцевината на земната кора;
- информация за електрическите свойства на вискозната минерална маса в мантията на Земята;
- прогнози за дебелината на земната кора и остатъчния магнетизъм;
- изчисляване на топлинния поток от вътрешността на Земята до дъното на ледените шапки;
- измервания на мащабни океански течения;
- измерване на профилите на температурата и влажността в атмосферата;
- картографиране на съдържанието на електрони в горната атмосфера;
- мащабиране на електрическите токове в космоса;
- откриване на високоенергийни частици в радиационните пояси;
- оценки на електрическите полета в слънчевия вятър.



Фиг. 3. Иллюстрация на магнетизацията в земната кора (NASA, DRSI)

На фиг. 3 е показан вертикално интегриран магнетизационен модел на индуцираната и остатъчната магнетизация. Моделът включва информация от наблюдения на магнитно поле в близост до повърхността. Областите на отрицателна магнетизация са доминирани от магнетизации в наклонени или противоположни на земното поле направления. Моделът показва магнетизациите с дълги вълни (доминирани от контраста между континент и океан) и магнетизациите с къса дължина на вълната (доминирани от разширяване на морското дъно) като релефни сенки в сивата гама.

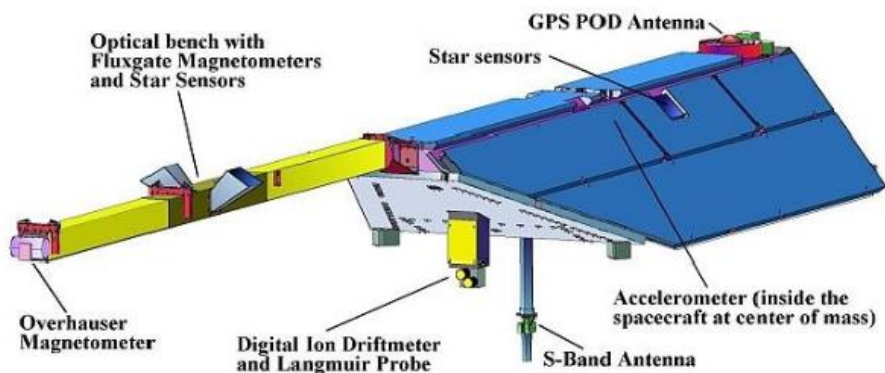


**Фиг. 4.** Илюстрация на геомагнитното поле за два периода: 2000 г. и 1980 г. (DRSI)

Във фиг. 4 са показани две глобални изображения на силата на магнитното поле. Горното изображение е моделирано изцяло с данни от мисията Ørsted. Скалата обхваща от 20 000 до 70 000 nT. Долното поле изобразява разликите в силата на полето в продължение на 20 години – между резултатите от Ørsted за 2000 г. и резултатите от Magsat (1979 – 1980 г.). Мащабът обхваща от -2400 nT до +1800 nT. Промените в силата на полето между двете мисии са най-вече отрицателни и варират до почти 10% от общото поле.

### 2.3. CHAMP

CHAMP е немска сателитна мисия, стартирала през пролетта на 2000 г. Със своите високоточни, многофункционални и допълнителни елементи на полезния товар (магнитометър, акселерометър, звездни сензори, GPS приемник, лазерен светлоотражател, йонен метър) и с орбиталните си характеристики (почти полярна орбита на ниска височина и с дълга продължителност) CHAMP генерира високо прецизни гравитационни и магнитни измервания през цялото време. И двата магнитни сензора за поток са монтирани заедно със звездните камери върху обща оптична релса. Оптичната релса е разположена по средата между сателитното тяло и магнитометъра Оверхаузер, разположен в края на 4-метровото рамо. Това местоположение е постигнато като компромис между това да се избегнат магнитни смущения от космическия кораб и преплитане между векторния магнитометър и скаларния.



Фиг. 5. Изглед отпред на сателита CHAMP

Сателитът е със слънчево несинхронизирана, почти полярна орбита от  $87,3^\circ$ , период на орбитиране 90 минути и начална надморска височина от 454 km. Тези орбитни характеристики позволяват хомогенно и почти пълно глобално покритие на повърхността на Земята.

С орбитален период от 90 минути и начална надморска височина 454 km, спътникът се движи бързо през местното време. Почти кръглата и почти полярната орбита ( $87,3^\circ$  по отношение на екватора) позволява хомогенно и почти пълно глобално покритие на Земята.

Сателитната мисия CHAMP се смята за пробив в моделирането на глобалните гравитационни модели, както и за предвестник на ново поколение сателитни мисии. Съчетава както гравитационни, така и магнитни измервания за синергично използване в геофизиката. Орбитата на CHAMP и дългосрочното времетраене на мисията са идеални за изследване на времевите вариации на гравитационното и магнитното поле. При магнитните измервания времето за наблюдение се удължава благодарение на датската мисия на Ørsted, която предхожда и допълва информацията, получена от CHAMP.

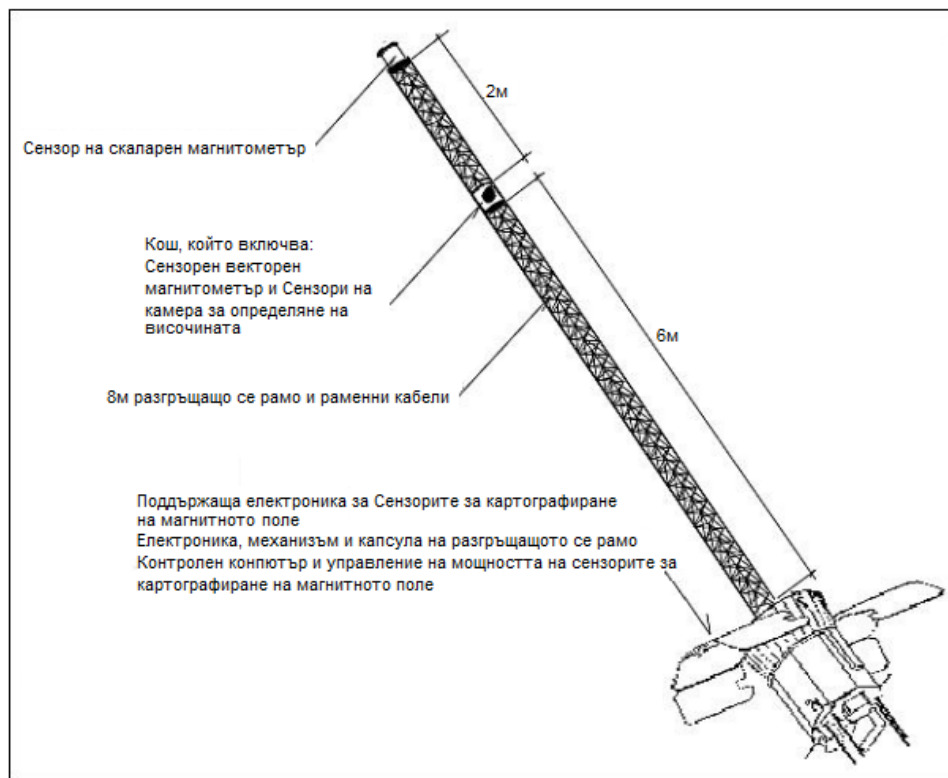
### 2.4. SAC-C (Scientific Application Satellite-C)

SAC-C (Scientific Application Satellite-C) е международна кооперативна мисия на Аржентина, САЩ, Дания, Бразилия, Италия и Франция, с участието на Национална ко-

мисия по космическите дейности на Буенос Айрес (CONAE) и НАСА като основни партньори, за наблюдение на Земята.

Общата цел е да се изследват структурата и динамиката на земната повърхност, атмосферата, йоносферата и геомагнитното поле.

При SAC-C абсолютният магнитометър се намира в края на рамото, като векторният магнитометър и звездната камера са разположени на около 1 m от края. Абсолютният инструмент е Хелиев магнитометър. Поради проблем с окабеляването на рамото звездната камера не дава никаква информация по време на цялата мисия, в резултат на което измерванията на магнитно поле от SAC-C се ограничават до стойности от 1 Hz от абсолютния магнитометър.



Фиг. 6. Сателит SAC-C

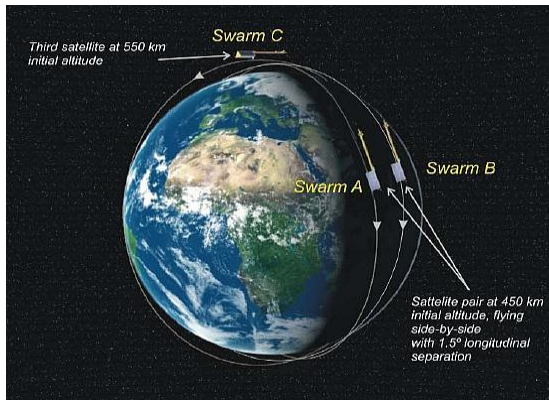
Специфичните цели на мисията са:

- осигуряване на многоспектрални изображения на Земята, за мониторинг на състоянието и динамиката на сухоземната и морската биосфера и околната среда;
- разработване и използване на нови GPS техники за глобално изследване на атмосферните явления за изучаването на метеорологичните, сезонните, годишните и дългосрочните климатични промени;
- подобряване на разбирането на магнитното поле на Земята и свързаните взаимодействия между Слънцето и Земята;

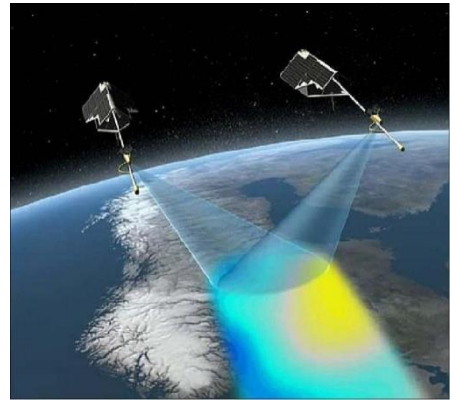
- измерване на високоенергийната радиационна среда, интензитета на уловените частици и разпределение на енергията им, корелацията с разграждането на електронните компоненти.

## 2.5. SWARM

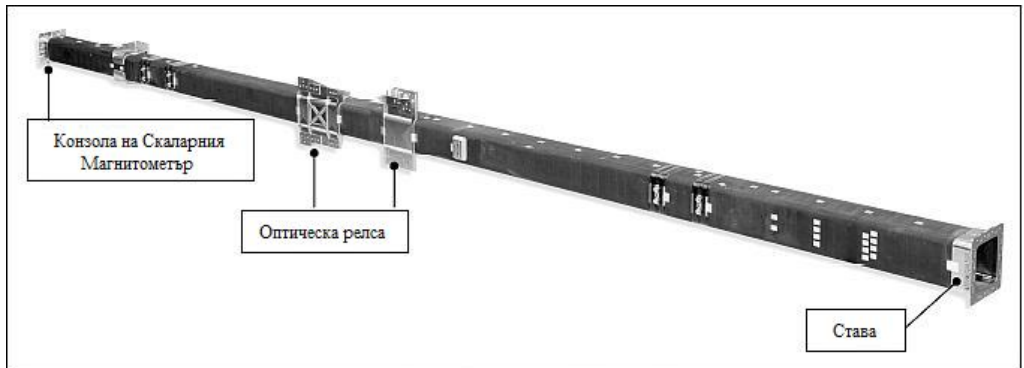
Мисията на Европейската космическа агенция се състои от три сателита, пуснати през 2012 г., които измерват магнитното поле и неговите вариации много по-точно от всякога. Концепцията се състои от съзвездие от три спътника в три различни полярни орбити между 400 и 550 km надморска височина. Два от сателитите летят едновременно на 450 km височина, в равнина с наклон  $84,7^\circ$ , измервайки градиента на магнитното поле в посока изток – запад. Третият сателит, в равнина с наклон  $88^\circ$ , е с височина 530 km и в различно местно време.



**Фиг. 7.** Екваториална проекция на конфигурацията на орбитите на сателитите от мисията SWARM



**Фиг. 8.** Двойката сателити SWARM осигурява стерео изглед



**Фиг. 9.** Оптическата релса на SWARM сателитите, изградена от въглеродни влакна

Всеки сателит носи както скаларни и векторни магнитометри, така и поне три звездни камери за определяне на височината. С подобренията в инструменталната екипировка, SWARM има от три до десет пъти по-добра точност на измерванията спрямо

предишните мисии. Високопрецизните и висококачествени измервания на силата, посоката и изменението на магнитното поле, допълнени от прецизна навигация, акселерометри и измервания на електрическото поле, осигуряват необходимите наблюдения за отделяне и моделиране на различните източници на геомагнитното поле.

Базирана на опита от мисиите на Ørsted и CHAMP, главната цел на мисията SWARM е да осигури най-добрите до сега измервания на магнитното поле и на неговата еволюция във времето, да се придобият нови познания за земната система, чрез подобряване на разбирането ни за вътрешността на Земята и климата.

### ***Основни теми, които Swarm има за цел да изследва***

*Динамика на ядрото, геодинамични процеси, взаимодействие между ядро и мантия.* Целта е да се подобрят моделите на динамичното поле на ядрото, чрез осигуряване на дългосрочни космични наблюдения с още по-добра пространствена и времева резолюция. Чрез комбиниране на Ørsted, CHAMP и SWARM наблюдения се постига по-задълбочено проучване на всички магнитнохидродинамични феномени, които потенциално се отразяват върху ядрото от годишни до десетилетни мащаби, достигайки дължина на вълната от около 2 000 km. От особен интерес са явленията, които отговарят за промени в полето и които не могат да бъдат обяснени от моделите на повърхностните потоци на ядрото.

*Литосферно намагнитване и геоложка интерпретация.* Повишената резолюция на SWARM сателитите позволява, за първи път, идентификацията от сателитна височина на океанските магнитни ивици, съответстващи на периодите на обратна магнитна поляризация. Такова глобално картографиране е важно, тъй като поради оскъдната информация за покритието на южните океани нашето разбиране за тектониката на плочите в океанската литосферата е било тежко ограничено. Друг важен извод от подобрената резолюция на литосферното магнитно поле е възможността за получаване на глобални карти на топлинния поток.

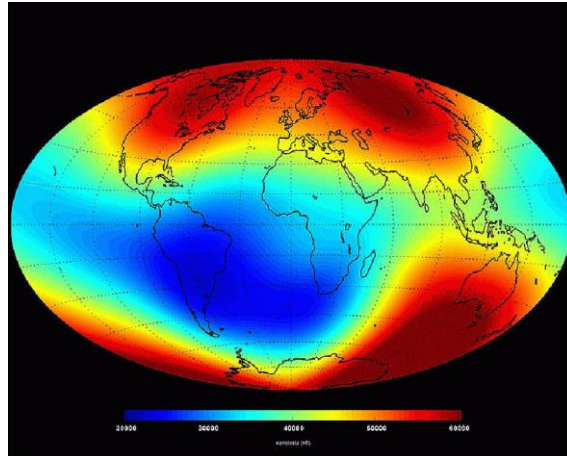
*3-D модели на електропроводимостта на мантията.* Знанията за физическите и химическите свойства на мантията могат да бъдат значително подобрени, ако се знае нейната електропроводимост. Поради рядкото и нехомогенно покритие на геомагнитни обсерватории, като само няколко са в океанските райони, истинска глобална картина за електропроводимостта на мантията може да се получи само от космоса.

*Токове, протичащи в магнитосферата и йоносферата.* Едновременните измервания с различна височина и местно време позволяват по-добро разделение на вътрешните и външните източници, подобрявайки моделите на геомагнитното поле. В допълнение, в полза на вътрешните изследвания на полето, по-доброто представяне на външното магнитно поле е основен интерес за научното общество, особено за изследвания и приложения на космическия климат. Обобщението на едновременната информация от местните времена насърчава разработването на нови методи за оценяване на вътрешните и външните действия.

### ***Вторични изследователски цели***

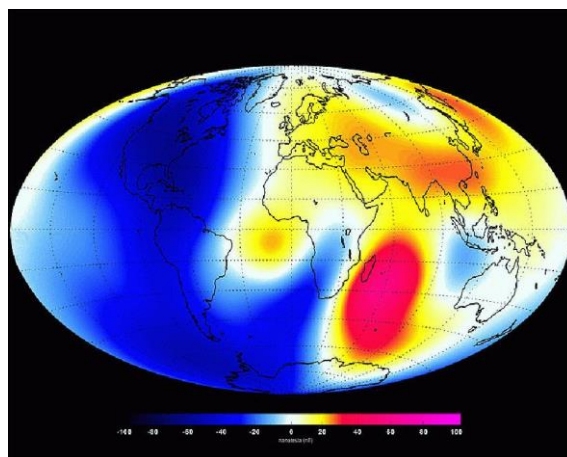
Идентификация на движението на океаните чрез магнитните следи – движещата се морска вода създава магнитно поле, следите от което допринасят за магнитното поле от сателитна височина. Въз основа на състоянието на морската циркулация и моделите на електропроводимост е показано, че очакваните полеви амплитуди са в рамките на резолюцията на SWARM сателитите.

Определяне на магнитното натоварване върху атмосферата – магнитното поле упражнява пряк контрол върху динамиката на йонизираните и неутрални частици в горните слоеве на атмосферата, което може и да повлияе върху долните атмосферни слоеве. Със специален набор от инструменти всеки SWARM сателит може да достигне висока резолюция и едновременни измервания на място на взаимодействащите полета и частици, които са ключът към разбирането на системата.



**Фиг. 10. Магнитното поле на Земята през юни 2014 г., получено по данни от спътниковото съзвездие SWARM**

На фиг. 10 е показана „моментна снимка“ на основното магнитно поле на земната повърхност от юни 2014 г., базирана на данните от SWARM сателитите. Основните измервания са доминирани от магнитното влияние на земното ядро – 95%, докато други източници, като мантия, кора, океани, йоносфера и магнитосфера, съставляват останалата част. Червените зони представят области, в които магнитното поле е по-силно, докато сините райони показват местата с по-слабо магнитно поле.



**Фиг. 11. Промените в магнитното поле на Земята от януари до юни 2014 г., измерени чрез спътниковото съзвездие SWARM**

На фиг. 11 са показани промените в магнитното поле за Земята, базирани на магнитните сигнали от земното ядро. Червените разцветки представят областите на укрепване, докато областите в синьо показват зоните на отслабване за 6-месечен период.

### **3. Анализ и съпоставка**

#### **3.1. Точност и инструментариум**

##### **3.1.1. Magsat**

Magsat носи и скаларен, и векторен магнитометър. Скаларният магнитометър, двусензорен, цезиев, е използван за калибровка на векторния магнитометър. Разположението на сензорите е избрано така, че да се минимизират нулевите зони, където магнитометрите не са в състояние да усетят обкръжаващото поле. На практика пулсиращият шум в намагнетизираните вериги на цезиевата лампа причинява блокиране на проследяващите филтри и намалява количеството на данните, доста под номиналната честота от 8 Hz. Системните грешки при определянето на скаларното поле са 0,5 – 1,5 nT. Векторният инструмент е триосен магнитометър със сензори за поток с динамичен диапазон от 2000 nT и с дигитално управлявани токови източници, които да увеличат обхвата до 64000 nT. Векторният инструмент измерва околното обкръжаващото поле 16 пъти в секунда с разделителна способност от 0,5 nT. Всеки сензор е навит с платинена тел върху високо пропусклива тороидална магнитна сърцевина. Сензорите са монтирани върху стабилен керамичен блок и температурата се контролира с цел минимално изместване на ориентацията по отношение на двете оптични системи.

Всяко наблюдение се свързва с неопределеност в положението и подробностите от сензорите се използват за изчисляване на положението. Според изискванията към мисията, и трите оси на векторния магнитометър трябва да бъдат определени в рамките на 6000 nT, въпреки че на практика често е известно в рамките на 2000 nT, което съответства на грешка в положението от 5 nT.

##### **3.1.2. Ørsted**

Магнитометърът Оверхаузер, измерващ интензитета на магнитното поле с честота на изследване от 1 Hz, е монтиран в горната част на разгъваемото 8-метрово рамо. Този инструмент има абсолютна точност, по-добра от 0,5 nT. Компактната сферична намотка на векторния магнитометър изследва магнитното поле при 100 Hz (в монополярен режим при полярни ширини) или 25 Hz (нормален режим) с резолюция, по-добра от 0,1 nT и се калибрира с помощта на интензитета на полето, измерен от Оверхаузер магнитометъра. След калибриране сходството между двата магнитомера е по-добро от 0,33 nT rms.

Общата точност на магнитометрите е по-добра от 0,5 nT. Най-голямото ограничение на векторните данни идва от точността на звездната камера. Тя е силно анизотропна, което води до относително по-голям шум в ъгъла на завъртане на звездната камера. Освен това, ъгълът на въртене е по-чувствителен към изкривяващи ефекти като ослепяване на инструментите (например от луната). Тази анизотропия на положението води до корелационни грешки между магнитните компоненти, които трябва да се отчетат при създаването на модели на полето.

Тъй като данните за положението са от съществено значение за предоставянето на векторни данни, отпадналите от звездната камера данни (поради топлинни проблеми или

поради заслепяването на инструмента) ограничават наличието на векторни данни. Сателитът е напълно осветен от Слънцето от юли до ноември 2000 г., от август 2002 г. до февруари 2003 г. и от януари до май 2005 г. и тъй като не е проектиран за подобна ситуация, топлинните проблеми водят до намаляване на наличието на данни през тези периоди.

### 3.1.3. Champ

Магнитометърът Оверхаузер с протонна прецесия измерва общата интензивност на магнитното поле веднъж в секунда. Този инструмент има абсолютна точност  $<0,5$  nT. Неговите измервания се използват при абсолютно калибриране на два редувантни векторни магнитометъра, разположени на средното рамо на оптичката (оптичната) релса. Тези магнитометри моделират полето при 50 Hz с резолюция  $<0,1$  nT.

### 3.1.4. Swarm

Основната цел на абсолютния скаларен магнитометър е да се осигурят скаларни измервания с висока разделителна способност за калибриране на векторния магнитометър. Въпреки това и както бе споменато по-горе, абсолютният скаларен магнитометър е в състояние да осигури и да демонстрира допълнителни векторни измервания, освен собствените си. Неговата векторна разделителна способност е по-ниска от тази, предоставена от векторния магнитометър – разделителната способност на абсолютния магнитометър е в диапазона  $1$  nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  с векторна широчина на честотната лента  $0,4$  Hz.

Абсолютният скаларен магнитометър на Swarm осигурява абсолютно мащабиране на скаларното магнитно поле с разделителна способност  $1$  pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  в честотна лента до 100 Hz. Подробни анализи, подкрепени от обширни тестове за характеризирание, идентифицират различните фактори, влияещи върху точността на магнитометъра, която е доказана като по-добра от 45 pT (норма на максималната остатъчна грешка). Всички летателни модели абсолютни скаларни магнитометри понастоящем са квалифицирани и са налични за интегрирането на SWARM сателитите.

## 3.2. Съпоставка и резултати

Измерванията на Magsat за векторното поле в близост до Земята не са подобрени или повторени до старта на Ørsted и CHAMP. Следващите мисии на НАСА по отношение на магнитното поле се фокусират върху планетарните магнитни полета или върху земната магнитосфера и динамиката на йоносферата.

Редица модели на магнитно поле с нарастваща сложност и точност са получени от Ørsted наблюденията – от модели, които описват моментното състояние на полето в определена епоха (IGRF, International Geomagnetic Reference Field 2000 или Ørsted Initial Field Model, OIFM) до модели, които включват времевите промени в полето.

Въпреки че основната цел на Ørsted е прецизното картографиране на вътрешното поле на Земята, мисията допринася за по-добро разбиране на йоносферичните и магнитосферичните токови системи. Поради подобреното разпределение на данните в сравнение с предишни мисии е възможно много по-подробно определяне на тяхната променливост според сезона и местното време.

На борда на аржентинския спътник SAC-C е поставено копие на рамото на Ørsted и товароподемността (скаларен хелиев магнитометър, вместо магнитометър Оверхаузер), наречен Ørsted-2. Въпреки това, поради повредена връзка в коаксиалния кабел, не

са налице данни с висока точност за положението, откъдето следва и липсата на надеждни векторни данни.

Вследствие на анализи на измерванията и симулационни изследвания от CHAMP и SAC-C се постига по-задълбочено разбиране на проблемите на ниското тропосферно подмагнитване, разработват се и се прилагат усъвършенствани техники за проследяване и анализ на сигнала за повишаване на качеството на данните от радио-затъмнения в ниската част на тропосферата.

Комбинираният анализ на измерванията от трите магнитни сателитни мисии CHAMP, Ørsted и SAC-C, води до пробив в точността на модела на магнитното поле. Докато моделите от наземно наблюдение са с ограничена резолюция с дължина на вълната от около 5000 km новите комбинирани сателитни модели разлагат основното поле и неговата секулярна вариация до 3000 km – по-късите дължини на вълните на главното поле се маскират от магнитното поле на земната кора.

С ниската си кръгова полярна орбита CHAMP е особено подходящ за картографиране на полето, причинено от магнитните минерали в земната кора. Първият модел на CHAMP за полето на земната кора е разширяващ се до 80-та степен на сферичната хармоника и съответства на дължина на вълната 500 km, показва, че магнитното поле на земната кора е по-слабо, отколкото е посочено от по-ранните наблюдения на Magsat.

Потокът на електропроводимата морска вода през магнитното поле на Земята действа като глобално динамо, предизвиквайки електрически полета, които движат електрически токове и по този начин водят до вторични магнитни полета. CHAMP ясно идентифицира периодичните магнитни сигнали от океанския поток, фокусирайки се върху доминиращата полудневна лунна вълна.

Диамагнетичният ефект на йоносферичната плазма реагира на приложеното магнитно поле с кръгови токове, които предизвикват магнетизация, противоположна на приложеното поле. Такъв отговор, който е известно свойство на плазмата във външната магнитосфера и в слънчевия вятър, е смятан за незначителен в йоносферата. Все пак се установява, че ленти с повишена плътност на плазмата от двете страни на магнитния екватор предизвикват депресии от порядъка на 5 nT в интензитета на геомагнитното поле. Данните за магнитното поле на CHAMP могат да бъдат коригирани за този ефект. Сходно явление е образуването на повърхностни токове върху плазмените кухни. Мисията CHAMP за пръв път дава възможността тези токове да се наблюдават директно в следите на магнитното поле.

## 4. Заключение

Магнитното поле на Земята представлява огромен интерес за научната общност. Отговорите от неговото изучаване водят до по-точно и подробно разбиране на голяма част от земните явления и процеси.

Всяка мисия от MAGSAT до SWARM има за цел прецизно измерване на магнитното поле с висока резолюция и елиминиране до максимална степен факторите, които го смущават. Мисията SWARM е в състояние да покаже фините детайли в един от най-трудните слоеве на магнитното поле, както и магнитната история на планетата, отпечатани върху земната кора. Триумфът на SWARM е способността му да картографира магнитните сигнали на литосферно магнитно поле, което е изключително трудно за засичане от космоса. Последните карти, получени от съзвездие SWARM, дават безпрецедентна представа за магнитните ивици, свързани с тектониката на земните плочи, отразени в средноокеанските хребети. Тези карти представят доказателства за обръщането на полю-

сите, спомагат за анализирането на магнитните отпечатьци и позволяват реконструкции на промените, настъпвали в земното ядро.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Langel, R. A., Benson, B. J.* The Magsat Bibliography, 1987.
2. *Robert, C. Snare.* History of Vector Magnetometers in Space, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles.
3. *Hulot, G., Eymon, C., Langlais, B., Manda, M., Olsen, N.* "Small-scale structure of the geodynamo inferred from Oersted and Magsat satellite data". *Nature*. 416 (6881): 620–3, April 2002.
4. *Langel, R., Ousley, G., Berbert, J., Murphy, J., and Settle, M.* The MAGSAT Mission. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 9, NO. 4, 1982.
5. *Acuna, M. H.* MAGSAT – Vector Magnetometer Absolute Sensor Alignment Determination. NASA technical Memorandum 79648. Goddard Space Flight Center, NASA, September 1981.
6. *Primdahl, F., Luhr, H. and Lauridsen, E. K.* The Effect of Large Uncompensated Transverse Fields on the Fluxgate Magnetic Sensor Output, Danish Space Research Institute Report 1-92, 1992.
7. *Lundahl Thomsen, P., Hansen, F.* "Danish Ørsted Mission In-Orbit Experiences and Status of the Danish Small Satellite Program". Proceedings of the 13th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Aug. 23-26, 1999.
8. *Donaldson, P.* "Mapping Magnetism". *Space*, April, 1993.
9. *Stauning, P.* "Ørsted Satellite – The Danish Miracle in Space". *Nordic Space*, Vol. 15, No 2, pp. 4-8, 2007.
10. *Olsen, N., Holme, R., Hulot, G., Sabaka, T., Neubert, T., Tøffner-Clausen, L., Primdahl, F., Joergensen, J., Leger, J.-M., Barraclough, D., Bloxham, J., Cain, J., Constable, C., Golovkov, V., Jackson, A., Kotze, P., Langlais, B., Macmillan, S., Manda, M., Merayo, J., Newitt, L., Purucker, M., Risbo, T., Stampe, M., Thomson, A., Voorhies, C.* "Ørsted Initial Field Model". *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No 22, pp. 3607-3610, Nov. 15, 2000.
11. *Purucker, M., Langlais, B., Olsen, N., Hulot, G., Manda, M.* "The Southern Edge of Cratonic North America: Evidence from New Satellite Magnetometer Observations". *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 15, Aug. 1, 2002.
12. *Reigber, Ch., Schwintzer, P. and Lühr, H.* The CHAMP geopotential mission, *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, Vol. 40, N. 3-4, pp. 285-289, 1999.
13. *Alonso, C.* "SAC-C Mission," presented at the Euro-Latin-American Space Days in Mexico DC, November 1997.
14. *Colomb, R., Alonso, C., Nollmann, I.* "SAC-C Mission and the International AM Constellation for Earth Observation". III International Symposium of IAA, Berlin, April 2-6, pp. 433-437, 2001.
15. *LaBreque, J. L.* CONAE-NASA Workshop, Volume I and II, Dec. 1-2, 1993.
16. *Colomb, F. R., Alonso, C., Hofmann, C., Nollmann, I.* "SAC-C mission, an example of international cooperation". *Advances in Space Research*, Volume 34, Issue 10, pp. 2194-2199, 2004.

17. *Christensen, E. F.* "Scientific Goals of Swarm". Proceedings of the First Swarm International Science Meeting, Nantes, France, May 3-5, WPP-261, 2006.
18. *Lesur, Manda, M.* "The Swarm End-to-End mission simulator study: A demonstration of separating the various contributions to Earth's magnetic field using synthetic data". *Earth Planets Space* (special issue on Swarm), Vol. 58, No 4, pp. 359-370, April, 2006.
19. *Maus, S., Lühr, H., Purucker, M.* "Simulation of the high-degree lithospheric field recovery for the Swarm constellation of satellites". *Earth Planets Space*, Vol. 58, No 4, pp. 397-407, April, 2006.
20. *Thébault, E.* "Global lithospheric magnetic field modelling by successive regional analysis". *Earth Planets Space* (special issue on Swarm), Vol. 58, No 4, pp. 485-495, April, 2006.
21. *Manoj, C., Kuvshinov, A., Maus, S., Lühr, H.* "Ocean circulation generated magnetic signals". *Earth Planets Space* (special issue on Swarm), Vol. 58, No 4, pp. 429-437, April, 2006.
22. *Wickert, J., Arras, C., Ao C.O., Beyerle, G., Falck, C., Grunwaldt, L., Healy, S. B., Heise, S., Helm, A., Huang, C. Y., Jakowski, N., König, R., Mannucci, T., Mayer, C., Michalak, G., Poli, P., Rothacher, M., Schmidt, T., Stosius, R., and Tapley, B.* CHAMP, GRACE, SAC-C, TerraSAR-X/TanDEM-X: Science results, status and future prospects, GRAS SAF Workshop on Applications of GPSRO Measurements, 16-18 June 2008.
23. *Gubbins, D., Herrerobervera, E.* *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, Springer, 2007.
24. *Jager, T., Léger, J-M., Bertrand, F., Fratter, I. and Lalaurie, J-C.* SWARM Absolute Scalar Magnetometer accuracy: analyses and measurement results, *SENSORS*, IEEE, 2010.

## METHODS OF MEASURING EARTH MAGNETISM. SWARM SATELLITE

**V. Yordanova<sup>1</sup>**

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

### ABSTRACT

The main purpose of this paper is to track the evolution of Earth's magnetic field exploration methods, the results obtained from them and to analyze the models. The main focus is on the International Space Agency's latest mission, based on the experience of the missions of Ørsted and CHAMP – SWARM. Its main goal is to provide the best magnetic field measurements so far, to help understand its evolution over time and the accumulation of new information about the Earth, using a better understanding of the Earth's interior and the climate.

---

<sup>1</sup> Violeta Yordanova, Eng., 25 Tsar Boris III Blvd., ap. 2; Sofia 1612,  
e-mail: violeta.yordanova91@gmail.com