

Alexander von Humboldt és a földmágnesség mai szemmel

KOSZTA B.

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

Alexander von Humboldt a modern fizikai földrajz atyjának is tekinthető, aki a geofizikán belül a földmágnesség vizsgálatában ért el jelentős eredményeket. Írásomban ezt tekintem át történeti időrendben. Humboldt már bányaellenőrként is találkozott a földmágnességgel, amely később egyre fontosabb szerepet töltött be kutatásai során. A témán belül mindennel foglalkozott, ő vezette be a folyamatos, párhuzamos méréseket, mellyel mérőállomáshálózatot hozott létre. A földmágnességen belül statisztikai alapon jelentős eredményeket is elért: ő mutatta ki az inklináció és a totáltér erőssége között fennálló összefüggést. Ezt az eredményét ő maga is a legjelentősebbek közé sorolta.

Kosztá, B.: Alexander von Humboldt and geomagnetism today

Alexander von Humboldt can also be considered the father of modern physical geography, who achieved significant results in the study of earth magnetism within geophysics. In my article, I review this in historical chronological order. Humboldt already encountered geomagnetism as a mine inspector, which later played an increasingly important role in his research. He dealt with all aspects of the topic, he introduced the continuous, simultaneous measurements, with which he created a network of measuring stations. Within the geomagnetism, he also achieved significant results on a statistical basis: he showed the correlation between the inclination and the strength of the total field. He himself classified this result as one of the most significant.

1. Humboldt első találkozása a földmágnességgel

Alexander von Humboldt német polihisztor, természettudós 1769-ben gazdag porosz nemesi családba született. Ez meghatározta későbbi életét is, hiszen örökölt vagyonának jó részét a természettudományra, természettudományi kutatásokra költötte. Nem házasodott meg, hogy teljes egészében a tudománynak szentelhesse az életét.

Eleinte magántanárok útján, később számos német egyetemen szerezte meg az ehhez szükséges ismereteit. Különböző előadásokat hallgatott, majd 1789-ben a Göttingeni Egyetemen a geológia tudománya felé fordult. Itt jelent meg első műve is *Mineralische Beobachtungen über einige Basalte am Rheim* (Ásványtani megfigyelések néhány Rajna menti bazalton) címmel (Rupke, 2008).

Tanulmányai után a Fichtel-hegységben kezdett el a freiberger bányában bányaellenerőként dolgozni. Itt találkozott először a földmágnesség jelenségével, mikor egy szerpentinitömb dőlését akarta megmérni, és a várthoz képest szokatlanul nagy eltérést tapasztalt. Ez egy helyi mágneses anomáliára utalt, amelyet Humboldt villámcsapással magyarázott. Ez azért is érdekes, mert ekkoriban még nem volt bizonyított az elektromosság és a mágnesség kapcsolata (Korte, Mendea 2019). A valóságban ezt a jelenséget litoszférikus mágneses mező okozza, de ez így is egy nagyon figyelemre méltó és elgondolkodtató hipotézis a 18. század végén. Ezután, a következő években hasonló je-

lenségeket tapasztalt a Salzburg régió bányáiban is (Malin, Barraclough 1991).

2. Az 1799–1804-es dél- és közép-amerikai expedíció

2.1. A felfedezőút általános eredményei

Bányaellenőri tevékenysége után az örökölt vagyona jóvoltából Párizsba ment, amely akkor a tudományos élet központja volt, mivel ott dolgozott például Laplace és Lagrange is. Itt készült fel a nagy dél- és közép-amerikai útjára, amelyre Aimé Bonpland francia botanikus társaságában vállalkozott. Franciaországon és Spanyolországon keresztül jutottak el a mai Venezuela területén található Cumana-ba, ahonnan később bejárták Dél-Amerika belsőbb részeit, különösen az Amazonas-medencét. A kutatóexpedíció során az „új kontinens” teljes természeti megismerése volt a céljuk, ennek során a földmágneses mérések mellett számos botanikai, geográfiai, geológiai és népességföldrajzi felmérést, kutatást is végeztek. Eredményeiket számos esetben róluk nevezte el az utókor – például a Humboldt-ról elnevezett állatfajok esetében –, de hozzá kapcsolódik a Dél-Amerika nyugati partjainál húzódó Humboldt-áramlás elnevezése is.

Az ötéves utazás során számos tudománytörténeti eredményt értek el, például felfedezték az Orinoco és az Amazonas közötti átfolyást, a Cassiquiare-t, jártak a

Chimborazo oldalán, amelyet akkor a legmagasabb hegynek gondoltak, valamint felfedezték a hideg tengeráramlást Peru partjainál, amelyet először izotermás térképeken ábrázoltak.

2.2. A felfedezőit földmágneses eredményei

A földmágneses méréseket ekkor Humboldt leginkább az inklináció és a relatív erősség területén végezte. Már a ter-

vezetnél hosszabbra sikerült európai úton is végzett földmágneses méréseket, de nem ezek váltak igazán jelentőssé. A Kanári-szigetéről Cumanáig tartó hajóút során 12 jó minőségű mérést tudott elvégezni a Borda által továbbfejlesztett, minden addiginál jobb inklinációmérővel (1. ábra). Ebből a 12 mérésből már statisztikai következtetéseket tudott levonni.

Műszerében a függőleges tengely mentén tetszőlegesen tudott mozogni a tű, amely így beállhatott az inklináció szögére. A közepén rögzített tű egy kör alakú skalázott egységen mutatta a pontos szöget.

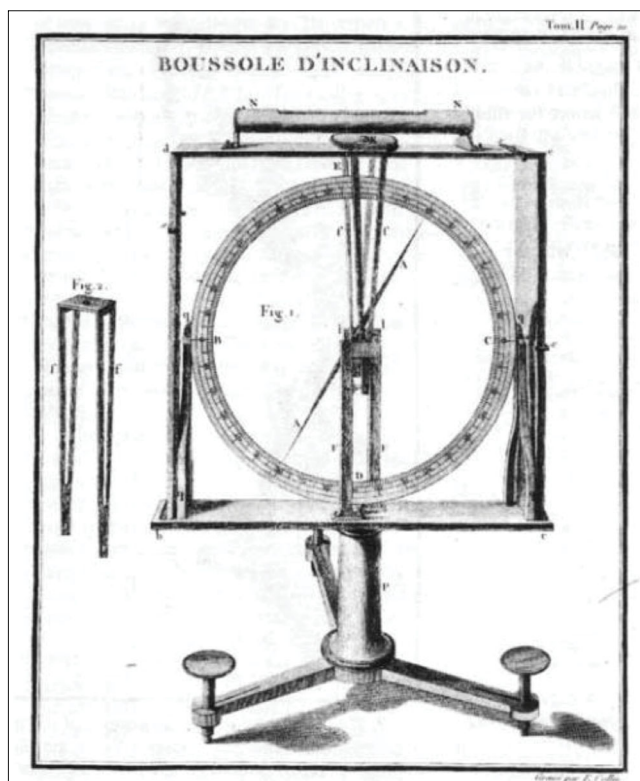
A relatív térerősséget egy függőleges tű adott idő alatti oszcillációinak száma alapján határozta meg. Abszolút erősséget nem tudott mérni, ez csak Carl Friedrich Gauss 1830-as matematikai modellje után vált lehetővé (Malin, Barraclough 1991). Addig csak az erő nagyságának és a periódusidő négyzetének a fordított arányosságát ismerték. A földmágneses erő, F meghatározása a tű oszcillációjának periódusidejéből, T -ből (1) alapján:

$$F = k^2/T^2, \tag{1}$$

ahol k egy adott konstans, melyet Gauss határozott meg 1830-ban (Malin, Barraclough 1991). (In Eqn. (1), the geomagnetic force is determined from the period time of the needle oscillation, k is a given constant defined by Gauss in 1830 (Malin, Barraclough 1991)).

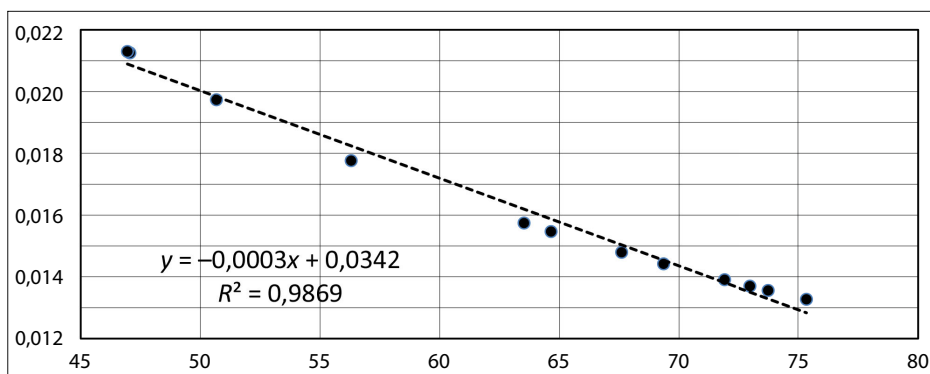
Az inklináció alapján mágneses szélességet definiált, és ebből a mágneses egyenlítőt, ahol az inklináció 0° . Ezekből a mérésekből Humboldt azt a következtetést vonta le, hogy az inklináció növekedésével általánosságban nő a relatív erősség is (2. ábra). Itt megemlíti Humboldt, hogy a pontos mágneses mérés mellé elegendően pontos földrajzi koordinátát is kell mérni, ami határozott kihívást okozott a tengeren (Humboldt, Bonpland 1822).

Az inklináció méréséhez új, a relatív erősségen alapuló mérési módszert dolgozott ki, mivel alacsony mágneses szélességeken az inklinációs tű leolvasása komoly hibákhoz vezethet. Ezért ott a függőleges és a horizontális relatív erősség arányából határozta meg az inklinációs szöget. Ez



1. ábra E.P.E: de Rossel inklinációmérője. Ezt dolgozta át és műszakilag javította Borda. A javított műszert használta Humboldt (Forrás: Courtillet, Le Mouel, 2007)

Figure 1 E.P.E: de Rossel's inclinometer. It was reworked and technically improved by Borda. The improved instrument was used by Humboldt (Source: Courtillet, Le Mouel, 2007)



2. ábra A totális erővel egyenesen arányos érték ($1/s^2$ -ben) és az inklináció ($^\circ$) közti összefüggés (Forrás: Humboldt, Bonpland 1822)

Figure 2 Relationship between the value directly proportional to the total force (in $1/s^2$) and the inclination ($^\circ$). (Source: Humboldt, Bonpland 1822)

gyakorlatilag az iránytangens meghatározását jelentette. Ezzel nagyon alacsony mágneses szélességeken, a mágneses egyenlítő környékén is lehetett inklinációs szöveget mérni.

Ekkoriban még Humboldt nem foglalkozott komolyabban a deklináció mérésével, mivel az akkori eszköztára nem tette lehetővé a tudományos kutatáshoz elegendően pontos méréseket. Csupán néhány helyen, tájékoztatás céljából közölt deklinációs adatokat. A felfedezőútjai során kereste a mágneses egyenlítőt, melyet Dél-Amerikában több helyen is meghatározott, például a Chimborazo oldalán, valamint az Amazonas-medencében is. Ebben a térségben található a Dél-Atlanti-óceánon a mágneses minimum, ahol a legkisebb a földmágneses tér intenzitása.

3. A mágneses mérőállomások

Az expedícióról visszatérve Humboldt Párizsban telepedett le, ahonnan csak majd 1826-ban tér vissza hazájába, Poroszországba, azon belül Berlinbe. Ekkoriban a földmágnességen belül új témát választott: a napi, gyors változásokat vizsgálta. Ehhez eleinte Gay-Lussac társaságában 24 órás méréseket végzett, általában óránkénti, fél óránkénti gyakorisággal. Olaszországban észlelték a mágneses mező megfigyelhető napi periódusát is (éjszaka és nappal különbségei) (Humboldt, Bonpland 1822). Kimutatták továbbá az Alpok kismértékű módosító hatását a helyi mágneses mezőre. Ilyenkor deklinációt, inklinációt, relatív erősséget és horizontális komponenszt is mértek, hogy a legteljesebb képet kapják a földmágneses mezőről. Már ekkor dokumentált hirtelen változásokat, melyeket „magnetische Stürme”-nak, azaz mágneses viharoknak nevezett el. A tudomány máig a Humboldt által adott nevet használja erre a jelenségre, melyet az északi régióban sarki fény követ.

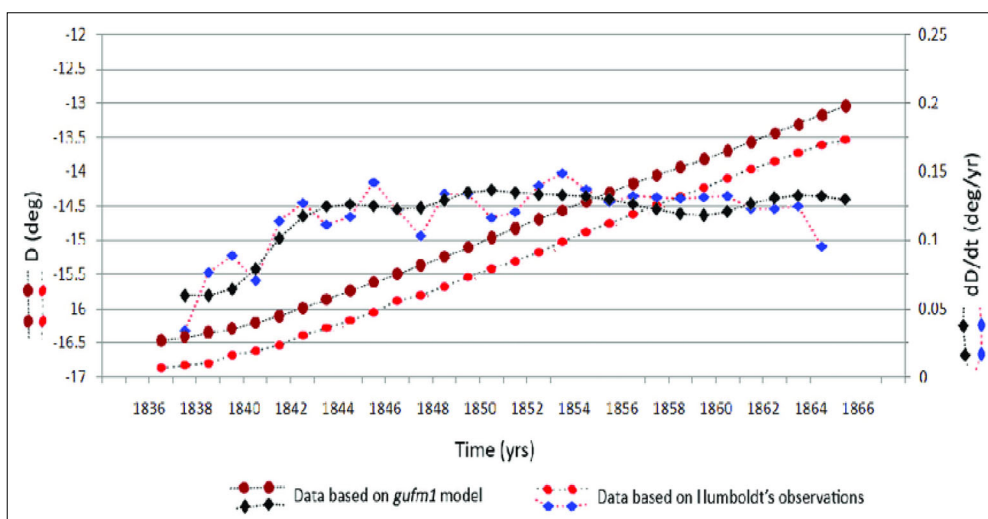
3.1. A mágneses mérőállomás és a műszer

Humboldt a mágneses mező hosszú távú folyamatos megfigyelésén gondolkodott, amihez mérőállomást kellett létrehoznia. Ilyet Párizsban, Greenwichben és Berlinben építettek először, ahol arra törekedtek, hogy a valós mágneses mezőt torzító mesterséges (épített) hatásokat kiküszöböljék. Ezért ezeket az épületeket teljesen egészében fából kellett létrehozni. Az illesztésekhez nem mágnesezhető fémeket (rezet) használtak (Kellner 1959). Figyeltek arra is, hogy állandó hőmérséklet és páratartalom legyen, hogy ezek se befolyásolhassák a mérés eredményét. Fontos volt, hogy a környék se legyen hatással a mérésekre, ami szintén elég jól sikerült.

A mérésekhez Humboldt mágneses teleszkópot használt, de 1828-tól a Berlinben felállított obszervatóriumában már Gambey mágneses teledoitjával végezte a méréseket, amely kettős tácsövével nagyobb pontosságot eredményezett. A beosztása milliméteres volt, és egy egység 22"-nek felelt meg. A műszer nagy előnye volt, hogy az optikai beállításoknak köszönhetően 0,1 mm pontossággal le lehetett olvasni az eltérést a kezdeti állapothoz képest a teodoliton, ami $\pm 2''$ szögelfordulás pontosságot eredményezett a torziós szálon, és így a valóságban is (Kellner 1959). Ezek Gauss fejlesztéseinek voltak köszönhetőek. Ily módon lehetővé vált továbbá az, hogy a megfigyelőnek ne kelljen nagyon közel mennie a műszerhez, ami befolyásolta volna a mérést.

3.2. A mérőállomások pontossága

A leolvasásnál rögzíteni kellett a mágneses adat mellett a hőmérsékletet, a páratartalmat, a szélirányt és az esetleges csapadékot is (Kellner 1959), mivel ezek mind befolyásol-



3. ábra Humboldt Berlinben mért deklinációs adatai és a matematikai modell által számított adatok. A grafikon mutatja a mért adatokat és azok változását, azaz az előző függvény differenciáhányados függvényét. (Forrás: Manda, Korte 2010)

Figure 3 Humboldt's declination data measured in Berlin and the data calculated by the mathematical model. The graph shows the measured data and their variation, i.e. the difference quotient function of the previous function (Source: Manda, Korte 2010)

ták a mérést. Ha a meteorológiai tényezők nagyon kirívóak voltak, a mérés értékelhetetlen volt. Ezt szemlélteti egy kutatás is, mely során vizsgálták Humboldt eredményeit és a matematikailag visszszámolt akkori mágneses mező adatait (Mandea, Korte 2010).

A grafikon adataiból megfigyelhető, hogy a vizsgált 30 éves időtartamon belül szinte végig állandó, 0.5°-os deklínációkülönbség figyelhető meg, míg a változásokat mutató görbe szinte párhuzamosan halad (3. ábra). Ennek oka vélhetően valamilyen szisztematikus hiba, melyet a mérési környezet, a mérőház és a mérőműszer hibájának összessége okoz. Feltételezhetően a környező épületek és az emberi tevékenység miatt jelent meg ez az eltérés.

3.3. A mérőállomás-hálózat gondolata és az első lépések

Humboldt hamar rájött, hogy egy-egy önmagában álló mágneses mérőállomás nem képes teljes képet nyújtani, hiszen a mágneses viharok is a földrajzi helyzettől függően máshogy hatnak, így nehéz ezeket teljesen megérteni. Ezért Humboldt nemzetközi mérőállomás-hálózatot igyekezett létrehozni, mely kiterjed az egész világra, és a párhuzamos, azonos módszerű méréseknek köszönhetően a földmágneses mező összehasonlíthatóvá válna ezáltal az egész Földön. Ez a feladat a 19. század első felének politikai, katonai helyzetében nem volt könnyű feladat, hiszen a mágneses adat nagyon fontos volt a tájékozódás szempontjából, így szinte mindig titkosan kezelték azt.

Először Francis Arago párizsi mágneses obszervatóriumában végzett párhuzamos méréseket a greenwichi mágneses mérőállomással, mely így a párhuzamos mágneses mérések prototípusának tekinthető. Ehhez csatlakozott Humboldt első oroszországi útja után Berlin, Kazany és Freiberg is, ahol a földfelszín alatt mértek, ami egy újabb perspektívát nyújtott. Ennek segítségével vizsgálhatták, hogyan befolyásolja a földfelszín a földmágneses méréseket, hiszen a mérőállomás a föld mélyén helyezkedett el. E mérések eredménye a földmágneses modellhez is hozzájárult, mivel jelentős eltérések nem voltak tapasztalhatóak, kizárhatták azt, hogy konkrétan a felszínen helyezkedik el a földmágnességet befolyásoló tényező. Továbbá, a tengerszint feletti magassággal kapcsolatos összefüggések kezdeti méréseire is jó lehetőséget biztosított ez a bányában felállított állomás.

Humboldt második oroszországi útja után – mely során Szibéria és Közép-Ázsia nagy részét is bejárta – további 11 orosz állomás csatlakozott a párhuzamos mérésekhez, valamint Pekingben is létesítettek mágneses egy obszervatóriumot. Ezáltal Eurázsia nagy részét lefedő hálózat jött létre (Malin, Barraclough 1991, Korte, Mendea 2019).

3.4. A „Humboldt Verein” és a „Göttingen Magnetische Verein”

Humboldt 1829-es oroszországi expedíciója után az orosz cár segítségével jelentős mérőállomás-hálózat alakult ki.

Ezekben az obszervatóriumokban ugyanakkor azonos módszerrel és eljárással történt az adatrögzítés, így összehasonlíthatóak voltak a mérések. Ekkor már körülbelül 20 állomás gyűjtötte folyamatosan az adatokat. Ezt nevezte Humboldt „Verein”-nek, azaz egyesületnek.

Az adatok összegyűjtését és statisztikai kiértékelését Humboldt vállalta magára. Ebben viszont az aktuális politika helyzet miatt nem volt annyira sikeres. Csúpan a kezdeti adatokat tudta kiadni 1829-ben és 1830-ban, később Kupffer adta ki az orosz állomások adatait részleteiben. A többi adatnak viszont sajnos nyoma veszett, így nem nevezhető teljesen sikeresnek a kezdeményezés (Malin, Barraclough 1991). Végül ez fektette le a mérőállomás-hálózatok alapjait, melyek még a mai napig működnek a Földön.

Később a Göttingeni Egyetem két tudósa is érdeklődni kezdett a földmágnesség iránt. Carl Friedrich Gauss (1777–1855) és Wilhelm Eduard Weber (1804–1891) vették át a mágneses mérőállomás-hálózat működtetését. Innentől lehet Humboldt egyesületét „Göttingen Magnetische Verein”-nek nevezni. Gaussnak sikerült az 1836 és 1841 közötti adatokat összegyűjteni és kiadni „Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins” címmel, több évben is (Gauss, Weber 1837, 1840).

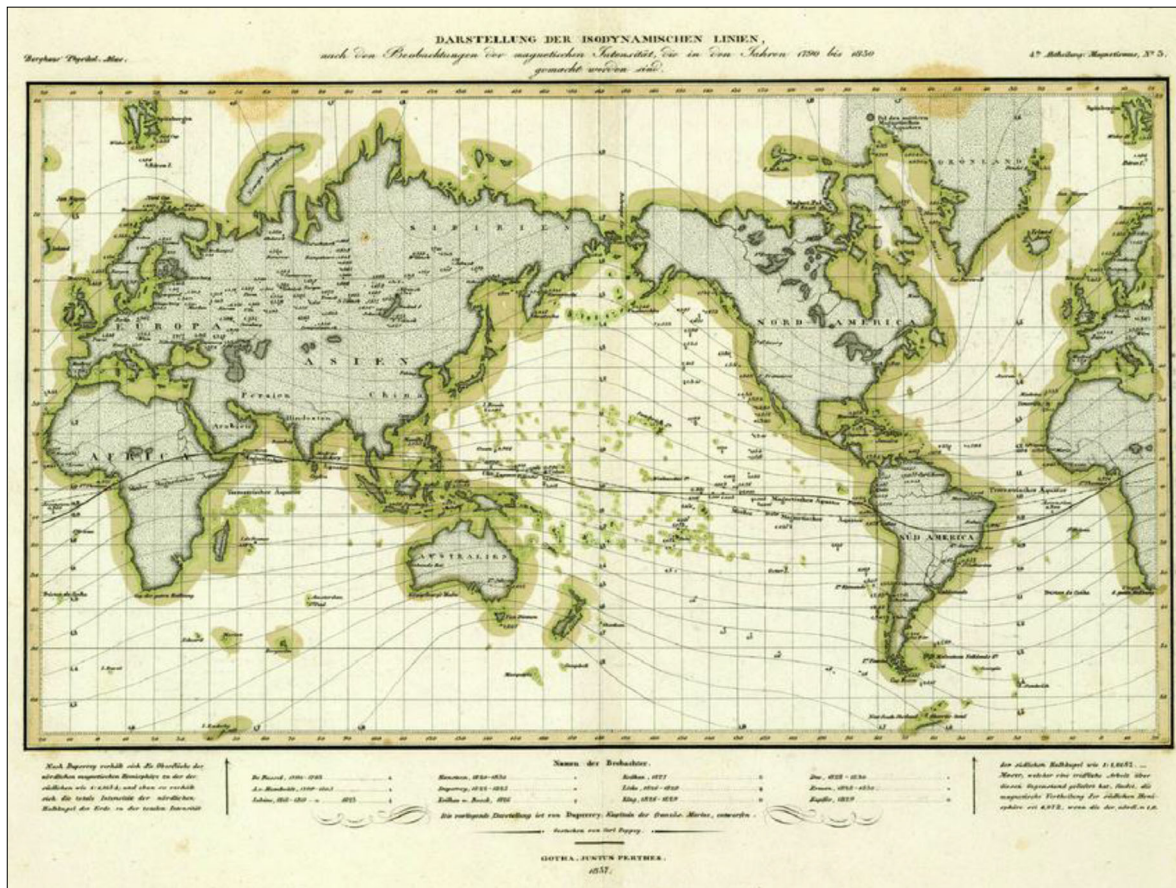
3.5. Humboldt és a Royal Society

Humboldt átlátta, hogy az eddigi mérőállomások ugyan csak Euráziában helyezkednek el, azonban azt elég jó arányban fedik le. Fontosnak érezte, hogy az Egyenlítő környékéről és a déli félgömből is álljanak rendelkezésre adatok, mivel ezáltal lehetne teljes képet alkotni. Ezt a legegyszerűbben a Brit Birodalom és így a Royal Society közbenjárásával lehetett elérni, minthogy a brit gyarmatok lefedték a Föld déli féltékének egészét. Ezért levelet írt a sussexi hercegnek, aki akkor a Királyi Társaság elnöki posztját is betöltötte, melyben kérte, hogy a britek is csatlakozzanak a nemzetközi földmágneses együttműködéshez (Malin, Barraclough 1991).

A Királyi Társaság által üzemeltetett mérőállomásokon a brit hadsereg katonái végeztek méréseket, és ezeket Edward Sabine (1788–1883) irányította, akinek a mágnesesség iránti érdeklődését Humboldt szintén jelentősen befolyásolta. Ő is publikálta e mérések eredményeit. Emellett Edward Sabine még statisztikai alapú földmágneses megfigyelést is tett. Észrevette, hogy van összefüggés a napfoltok és a mágneses viharok száma között, így rájött a naptevékenység fontos szerepére a mágneses mező gyors változásai eredményeként (Malin, Barraclough 1991).

4. Humboldt mágneses térképei

A Humboldt által létrehozott mérőállomás-hálózat a világ jelentős részéről nyújtott mágneses adatokat, ami lehetővé tette, hogy pontos, az egész világra kiterjedő mágneses térképek készüljenek mind a totáltér, mind pedig az inkliná-



4. ábra | Az 1837-ben megjelent totáltérerősség izovonalas térképe. Relatív egységeket (Humboldt-egységeket) ábrázol (Forrás: Manda, Korte 2010)

Figure 4 | Isolated map of total space strength published in 1837. It shows relative units (Humboldt-units) (Source: Manda, Korte 2010)

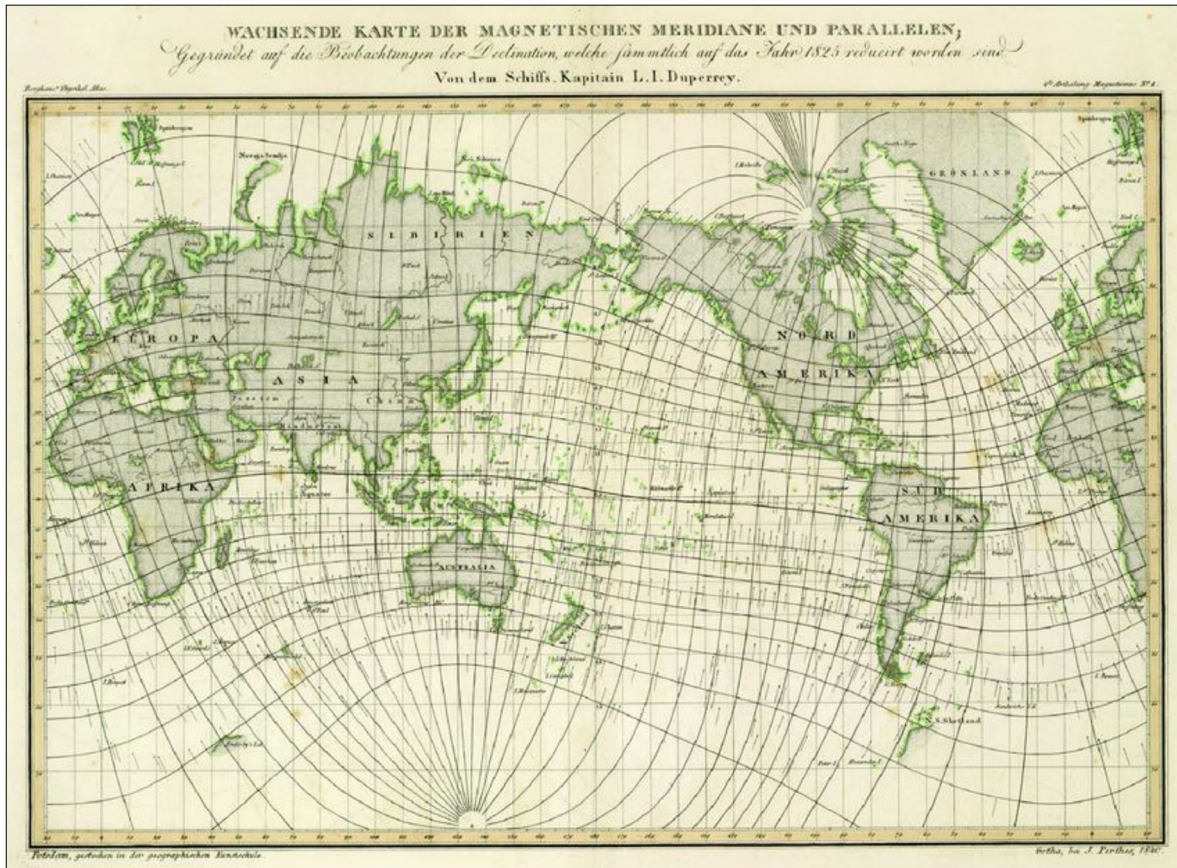
ció és a deklináció bemutatásáról. Ezek a földmágneses kutatásait összefoglaló, szemléltető térképek Gothában jelentek meg 1837-ben, 1840-ben, és 1841-ben a Berghaus kiadónál (Manda, Korte 2010). A térképek közös jelentősége, hogy kora kifejezetten fejlett és pontos alkotásainak számítottak. Egy 2010-es kutatás során megvizsgálták ezek pontosságát (Manda, Korte 2010). Matematikai modell segítségével visszszámolták a szekuláris változást, és ez alapján hasonlították össze a Humboldt korabeli térképeken tapasztaltakkal. A visszszámolás pontosságát növelte a 19. század elejétől hirtelen nagymértékben megnövekedő mágneses adatmennyiség, melyekkel a modellt korrigálni lehetett. Az adatok egy 1510-ig visszamenő adatbázisból érhetőek el, mely tartalmazza az azóta történt deklináció-, inklináció- és totáltéréréseket egészen a 20. század közepéig (Jonkers, et al. 2003).

Először a totáltérkép jelent meg, melyen 1790 és 1830 között mért adatok szerepelnek, ami meglehetősen tág időtartam a mágneses mérések esetén, hiszen ez idő alatt már a szekuláris változás értékei is jelentékenyek lehetnek, melyeket korrigálni, egy időpontra kell átszámítani. Ez a térkép csak relatív totál térerősséget ábrázol, mivel ekkor még nem volt meg az abszolút értékekhez szükséges matematikai modell. Az ábrázoláshoz arányosi-

tás és egy egység bevezetése szükséges volt, hogy informatív, összehasonlítható elemzések, térképek készülhessenek. Ezt az egységet tiszteletből Humboldt-egységnek (Hu) nevezték el később, amely (későbbi méréseknek köszönhetően) megegyezik 34 941 nT-val. A térkép minimumot mutat a dél-atlanti térségben, illetve maximumot Kanada és Szibéria területén (4. ábra). A térkép kiemeli továbbá a mágneses egyenlítőt, amelynek környékén jelennek meg a minimális értékek (és amelyen 0° az inklináció). Ezek az aktuális kutatások alapján akkoriban helytálló információk voltak (Manda, Korte 2010), azaz a visszszámított modellel jelentős egyezést mutatnak.

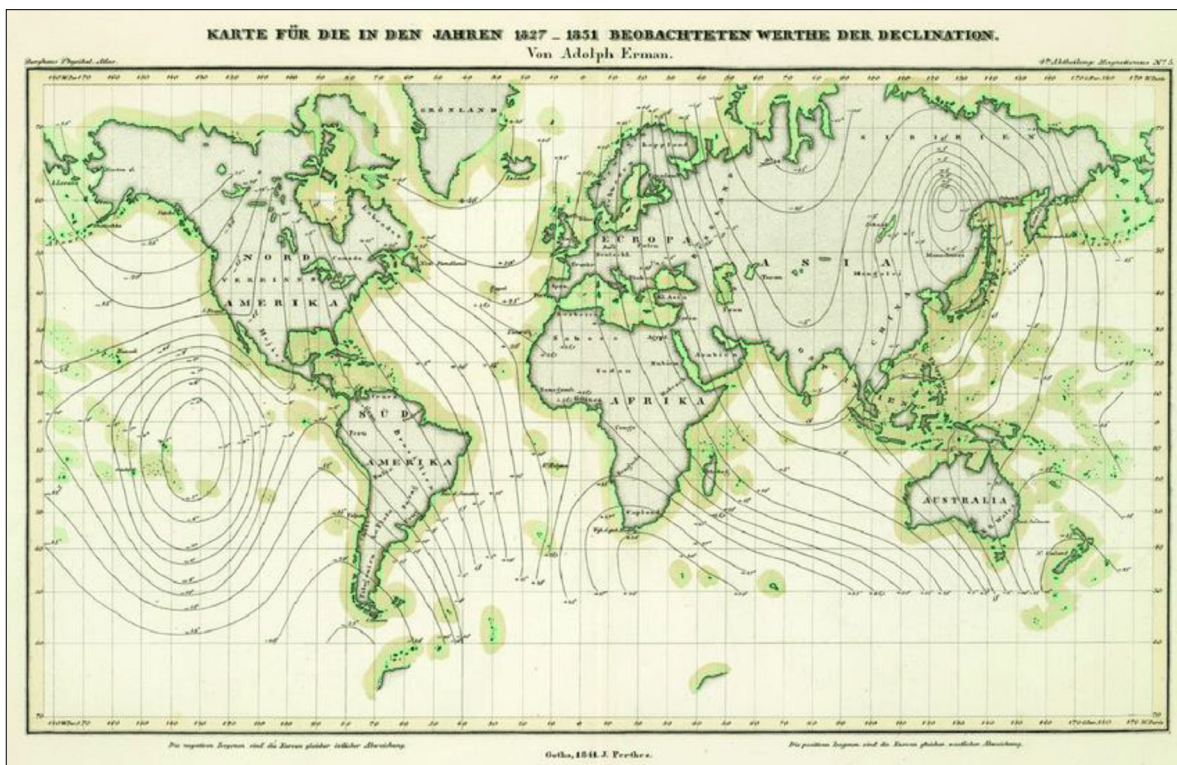
Az inklinációtérképen – mivel a mágneses szélesség az inklinációval van definiálva – látható Humboldt legnagyobb mágneses felfedezése: a mágneses szélesség és a földrajzi szélesség közti közelítő összefüggés. Viszonylag pontosan ábrázolja a mágneses sarkokat, a mágneses egyenlítőt (melyet vastagon is kiemeli). Érdekes és szokatlan mágneses hosszúságoknak az ábrázolása, melyek a mágneses pólusokból indulnak ki, és végig merőlegesek a mágneses szélességekre, ezáltal kvázi az inklináció gradiensirányát adják meg.

A deklinációtérkép volt talán a tájékozódásban a legfontosabb, így annak volt a legtöbb gyakorlati haszna. A 19.



5. ábra
Figure 5

1840-es mágneses szélesség- és hosszúságtérkép (Forrás: Manda, Korte 2010)
Magnetic latitude and longitude map published in 1840 (Source: Manda, Korte 2010)



6. ábra
Figure 6

1841-es deklinációtérkép (Forrás: Mande, Korte 2010)
Declination map published in 1841 (Source: Mande, Korte 2010)

században leginkább hajózott világot alaposan ábrázolja izogonokkal, viszont a sarkok környékén nem jelez semmit, vélhetően azért, mert kevesebb és megbízhatatlanabb adat állt onnan rendelkezésre, valamint ott sokkal nagyobb és gyorsabb eltérések lehetnek a mágneses pólusok közelsége miatt. A térképen előjelesen vannak ábrázolva a szögek melyek a nyugatias (pozitív) és a keleties (negatív) deklinációt jelzik.

A térkép pontosságának ellenőrzésekor érdemes az agonális (0°-os deklinációs) vonalakat megnézni. Ezekből kettő figyelhető meg: az egyik Észak- és Dél-Amerika keleti részén fut végig, a másik pedig Kelet-Európán, majd egy távol-keleti kanyarulat után Ausztrálián fut végig. Itt a Kínán és Japánon átfutó 0°-os izogonnánál jelentősebb eltérés tapasztalható a számított értékekhez képest (Mandea, Korte 2010).

Összességében kijelenthető, hogy Humboldt a korszak elvárásait, pontosságát meghaladó mágneses térképeket készített, melyek a saját korukban megállták a helyüket, de ma már kurióznak számítanak.

5. Humboldt jelentősége

Alexander von Humboldt a mai napig az egyik leginkább tisztelt természetföldrajzi szakember, akinek a kutatásai szinte minden területre kiterjedtek, átfogó már-már polihisztori munka jellemezte. Ebben az írásban a geofizikához legjobban kapcsolódó földmágneses kutatásait, munkáit tekintettük át, egyéb munkáiról csak rövid említés esett. Tiszteletét az utókor is megőrizte például azzal, hogy róla nevezte el a relatív mágnesestotáltér-mérésekhez használatos egységet.

Születésének és halálának kerek évfordulóin rendszerint komoly, akár egész éves megemlékezéssorozatot szentelnek Humboldt emlékére. Legutóbb például 2019-ben – születésének 250. évfordulójára – szeptember 14-ét az International Biogeography Society Nemzetközi Humboldt-napnak nyilvánította.

Ugyanakkor fontos megemlíteni, hogy a berlini Humboldt Egyetemet (Humboldt Universität zu Berlin) nem ő, hanem a bátyja, Wilhelm von Humboldt alapította. Ma-

napság viszont az egyetem a két Humboldt-testvér nevét közösen viseli, ezzel emléket állítva mind a két férfinak.

Készült a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-6 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával.



A cikk szerzője: Koszta Benedek

Hivatkozások

- Courtillet V., Le Mouël J.-L. (2007): The study of Earth's magnetism (1269–1950): A foundation by Peregrinus and subsequent development of geomagnetism and paleomagnetism. *Reviews of Geophysics*, 45/3. <https://doi.org/10.1029/2006RG000198>
- Gauss C. F., Weber W. (1837): *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1836*. Leipzig
- de Humboldt A., Bonpland A. (1822): *Personal Narrative of Travels to the Equinoctial Regions of the New Continent, during the Years of 1799–1804*. Vol. I–II, London.
- Gauss C. F., Weber W. (1840): *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1839*. Leipzig
- Kellner L. (1959): Alexander von Humboldt and the organization of international collaboration in geophysical research. *Contemporary Physics*, 1/1, 35–48.
- Korte M., Mandea M. (2019): Geomagnetism: From Alexander von Humboldt to current challenges. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20/8, 3801–3820.
- Malin S. R. C., Barraclough D. R. (1991): Humboldt and the Earth's magnetic field. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 32/3, 279–293.
- Mandea M., Korte M. (2010): Alexander von Humboldt's charts of the Earth's magnetic field: An assessment based on modern models. *History of Geo- and Space Sciences*, 1, 63–76.
- Rupke N. A. (2008): *Alexander von Humboldt: A metabiography*. The University of Chicago Press, Chicago.
- T. Jonkers A. R., Jackson A., Murray A. (2003): Four centuries of geomagnetic data from historical records. *Reviews of Geophysics*, 41/2. <https://doi.org/10.1029/2002RG000115>