

A VIKINGEK ÉGPOLARIZÁCIÓS NAVIGÁCIÓJA, AVAGY MILYEN ESÉLYEL ÉRHETTÉK EL GRÖNLANDOT, ÉS FEDEZHETTÉK FÖL AMERIKÁT?

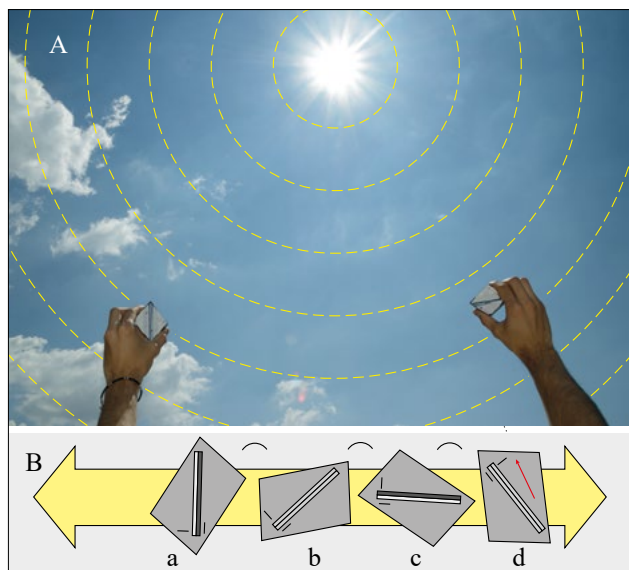
Horváth Gábor^{1,*}, Száz Dénes¹, Takács Péter¹, Farkas Alexandra¹, Blahó Miklós¹, Bernáth Balázs¹, Barta András¹, Egri Ádám²

¹ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Budapest; ²HUN-REN Ökológiai Kutatóközpont, Budapest

*E-mail: gh@arago.elte.hu

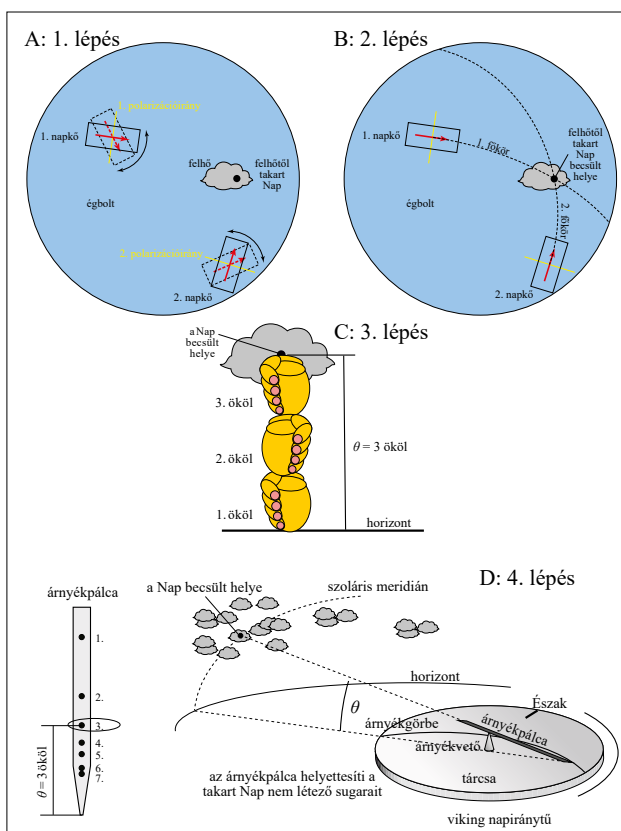
A viking napiránytű

Az i. sz. 900 és 1400 között az Észak-Atlanti-óceánt uraló vikingeknek nem volt mágneses iránytűjük. Régészeti leletekből ismert, hogy tengeri útjaikon egy speciális napiránytűt használtak, ami egy olyan vízszintes tárcsa, melynek közepén egy függőleges árnyékvető rudacska volt [1, 2]. Napsütéses időben a tárcsára rárajzolták azt a görbét, melyet a rudacska árnyékának vége leírt, miközben a Nap az égen haladt. Az így kapott hiperbolikus árnyékgörbe tükörszimmetria-tengelye mindig a földrajzi észak felé mutatott. Amikor tájékozódni akartak, akkor a tárcsát addig forgatták, mígnem a rudacska árnyékának csúcsa az árnyékgörbére esett, s ekkor a külön karcolással jelölt szimmetriatengely északra nézett. Kísérletek bizonyították, hogy a Norvégia és Dél-Grönland között a $60^{\circ} 21' 55''$ északi szélességen húzódó leghosszabb viking hajóúton e napiránytű kiválóan működött, ha sütött a Nap.



1. ábra. A viking kalcit napkövek kalibrációja, amikor az égen látható a Nap (A). A sárga kettősfejű nyíl és a sárga pálcikák a helyi polarizáció-irányt mutatják. A lineárisan poláros ég egy felhőtlen pontját a napkövön át nézve (A) a napkövet addig forgatták (B), amíg az átlátszatlan fedőlapja résében a kettőstörés miatt látható két párhuzamos vonal (rész-kép) azonos intenzitásúvá nem vált. Mivel mindig két ilyen helyzet adódott (b és d), csak az egyiket választották (például d), amikor is a napkö fedőlapjára vésték egy nyilat (piros), aminek feje a Nap felé mutatott. E kalibrációt mindkét napkövel elvégezték (A). A B alába fekete pálcikái a két réskép fényének polarizációirányát szemléltetik [4]

De mi történt akkor, mikor a Napot felhő, köd takarta, vagy a horizont alatt volt? Pszichofizikai kísérleteink szerint [3] ekkor csupán szabad szemmel általában lehetetlen volt a navigációhoz szükséges pontossággal megbecsülni a felhők mögötti vagy a horizont alatti Nap helyét.



2. ábra. Az égpolarizációs viking navigáció négy lépése. (A) Az 1. lépésben a viking navigátor a részlegesen poláros ég két pontját napkövön át nézve két napkö szem előtti forgatásával meghatározta a Nap felé mutató két irányt, amelyeket a napkövekre karcolt piros nyilak jeleznek. (B) A 2. lépésben megbecsülte a két piros nyilon átmenő és azokkal párhuzamos két égi főkör metszéspontját, ami a felhőtől takart Nap szemmel becsült helye. (C) A 3. lépésben megmérte a Nap becsült helyének öklében és ujjban számolt horizont fölötti θ magasságát (most $\theta = 3$ ökl + 0 ujj). (D) A 4. lépésben az árnyékpálca θ -nak megfelelő (most 3.) lyukát a napiránytű vízszintes tárcsájára merőleges árnyékvető rudacska csúcsára húzva, az árnyékpálca hossztenegelyét a Nap becsült helye felé irányította, majd a tárcsát az árnyékvető függőleges tengelye körül addig forgatta, amíg a tárcsába karcolt tükörszimmetrikus hiperbolikus árnyékgörbe nem érintette az árnyékpálca tárcsán támaszkodó végét. Ekkor az árnyékgörbének a tárcsába karcolt nyíllal jelzett tükörszimmetria-tengelye a földrajzi észak felé mutatott [5–8]

Thorkild Ramskou dán régész 1967-es, széles körben elterjedt teóriája szerint ilyenkor a viking hajósok lineáris polárszűrőkhöz hasonlóan működő napkőkristályokkal határozták meg a nem látható Nap helyét (1. ábra) [4], majd a napiránytűjüket használva tájékozódtak.

A föltételezések szerint, az északi irány meghatározása négy lépésben történt ezen égpolarizációs viking navigációval (2. ábra): 1) a viking navigátor először két napkővel meghatározta a nem látható Nap felé mutató irányt az ég megfelelően poláros két pontjában (2A. ábra) [5], 2) e két iránnyal párhuzamos, a napköveken átmenő égi főkör metszéspontjaként megbecsülte a nem látható Nap helyét (2B. ábra) [6], 3) az ökleivel és ujjával megmérte a nem látható Nap horizont fölötti magasságát (2C. ábra) [7], 4) végül egy, a napazimut felé irányított árnyékpálcával helyettesítve a hiányzó napsugár irányát, a vízszintes tárcsát a Nap felé mutató árnyékpálca alatt addig forgatta, amíg a pálca tárcsát érintő alsó vége nem érintette a hiperbolikus árnyékgörbét, s ekkor leolvasta az északi irányt (2D. ábra) [8].

Laboratóriumi és planetáriumi pszichofizikai kísérletekben meghatároztuk e négy lépés hibafüggvényeit bizonyos változók függvényében [5–8], valamint képalakító polarimetriával mértük 1296 különböző időjárási helyzetben a teljes égbolt polarizációfokának és -irányának mintázatait [9–13]. A mindezt bemeneti adatokként használó számítógépes modellezésekkel meg tudtuk határozni, hogy adott időjárási körülmények (napállás és felhőzettség) között mekkora hibával lehet égpolarizációs viking navigációval meghatározni a tengeri navigációhoz szükséges északi irányt a $60^\circ 21' 55''$ északi szélességen [14].

Milyen eséllyel érhették el a vikingek Grönlandot, és fedezhették föl Amerikát?

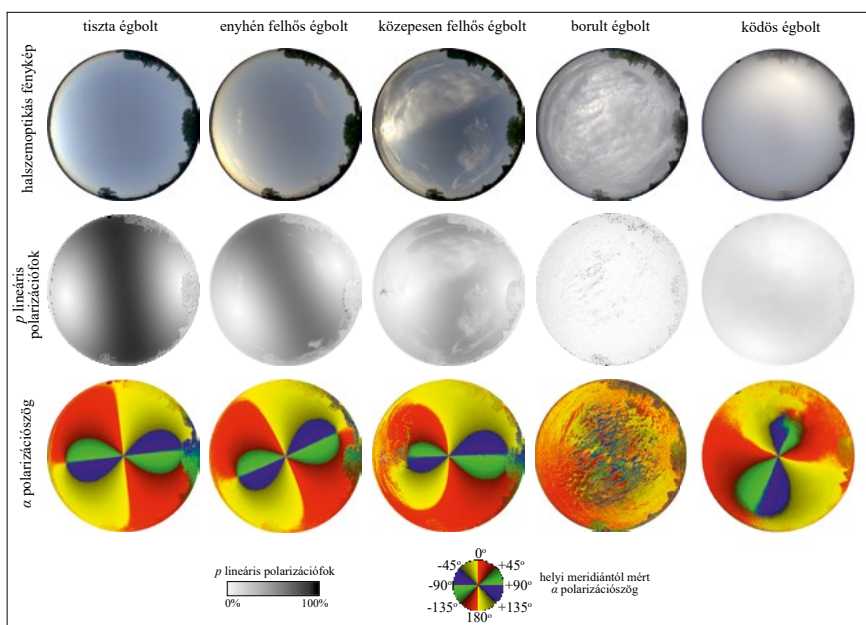
A légkörben szóródó napfény polarizációiránya majdnem mindig merőleges a Napon, a figyelt égponton és a megfigyelőn átmenő szórási síkra, miáltal az égfény rezgéssíkja merőleges az ég figyelt pontján és a Napon átmenő főkörre. Az égfény polarizációirányát a vikingek lineáris polárszűrőkhöz hasonlóan működő napkőkristályokkal (kalcit, kordierit, turmalin) határozhatták meg.

Kutatásunk első részében az égpolarizációs viking navigáció légköroptikai előfeltételeit derítettük ki a legkülönbözőbb meteorológiai viszonyok között [9–13]. Kiderült, hogy a felhős vagy ködös

ég polarizációirány-mintázata (eltekintve a felhős vagy ködös égterületek arányának növekedésével és a polarizációfok csökkenésével növekvő zajosságtól) gyakorlatilag megegyezik a tiszta égével, vagyis a Nap azimutirányával együttforgó mintázat tükröszimmetria-tengelye mindig a Napon megy át és a 3. ábra alsó sorában látható zöld-kék nyolcas alakzatok rövidebb (kisebb) része mindig a Nap felé mutat, miáltal elvileg szinte minden meteorológiai helyzetben alkalmas lehetne égpolarizációs viking navigációra [9–13].

Ha ugyanis az ég két tetszőleges pontjában a vikingek a napkőkristályokkal meghatározták az égfény polarizációirányát (2A. ábra) és meghúzták az e két irányra merőleges két éggömbi főkört (2B. ábra), akkor azok a Nap helyén metszették egymást. Márpedig az égpolarizációs viking navigáció alapja a Nap helyének ismerete, mert napsütésben a viking napiránytűvel meghatározható a földrajzi északi irány. Az égpolarimetriai mérések szerint azonban hiába független az égfény polarizációirány-mintázata a meteorológiai viszonyoktól, a szűk keresztmetszetet az égbolt túl alacsony p polarizációfoka jelentette. Ha p kisebb volt egy p^* küszöbértéknél, akkor a viking navigátor az eget nézve hiába forgatta szeme előtt a napkőkristályt, a poláros égfény szinuszos intenzitásváltozását nem észlelte, így nem volt képes a napkövet a rajta keresztül látott égfényesség valamelyik szélsőértékének megfelelő irányába forgatni, mely helyzetben a napkőre karcolt nyilacska mindig a Nap felé mutatott (1. ábra).

Ekkor kezdődött kutatásunk második része, amiben az égpolarizációs viking navigáció (ÉVN) négy lépésének sok tesztalanyra átlagolt hibafüggvényeit mértük laboratóriumi és planetáriumi pszichofizikai kísérletek-



3. ábra. A tiszta ég, valamint az enyhén és közepesen felhős és teljesen borult, továbbá a ködös égbolt halszemoptikával készült fényképei és 180° látószögű képalkotó polarimetriával a spektrum kék (450 nm) tartományában mért p lineáris polarizációfokának, valamint a helyi meridiántól az óramutató járásával azonos irányban mért α polarizációs szögének mintázatai [9–13]

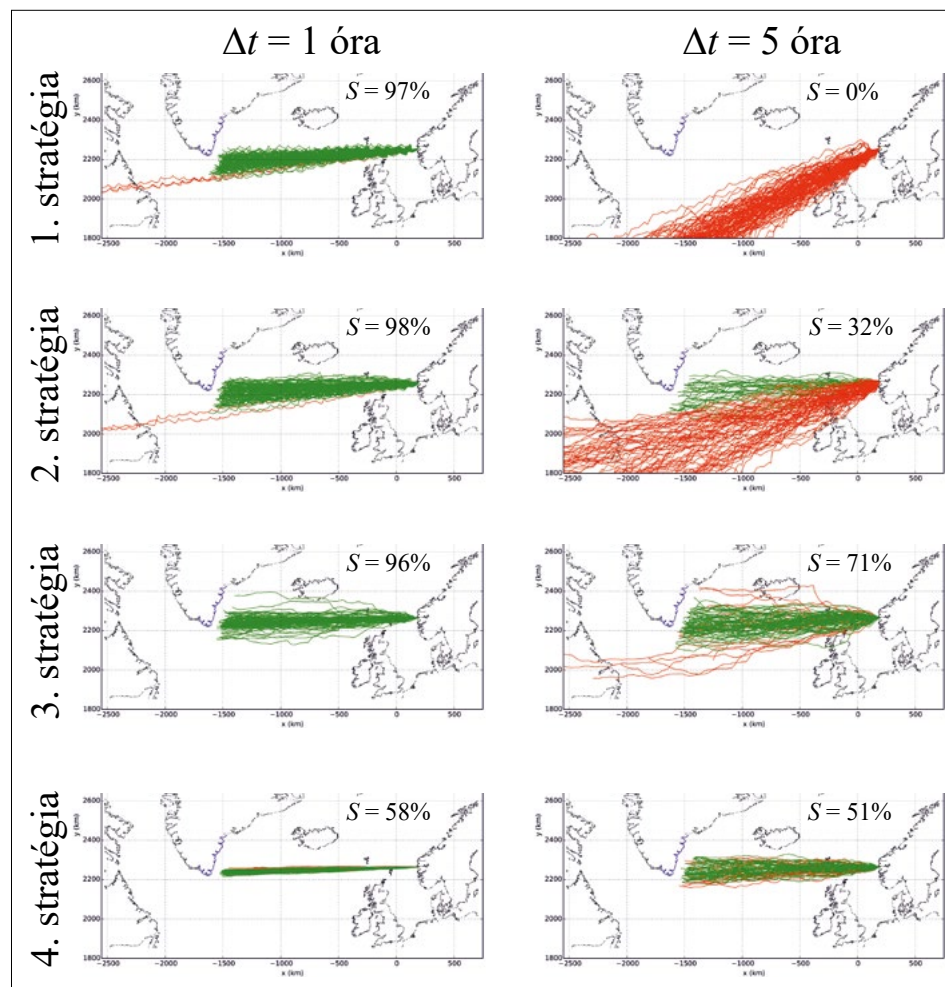
ben [5–8]. A mért égypolarizációs adatbázist és a három napkőtípusra mért négy hibafüggvényt számítógéphe táplálva, az ÉVN négy lépésében adódó hibák eredőjét meghatározva egy hibaterjedési szimulációs programmal számos különböző éghelyzetre kiszámoltuk, hogy a viking napiránytűvel milyen átlagos hibával és szórással mérhető az északi irány, ha a Nap helyét minden esetben valamely napkőkristállyal mérik. Ezzel arra a szintre jutott a kutatásunk, hogy már ismertté váltak a Norvégia–Grönland útvonal mentén előfordulható tetszőleges felhőfedettségek és napmagasságok mellett az északi irány ÉVN alapján történő meghatározásának hibái há-

rom napkőtípusra és az atlanti-óceáni viking hajózás két fontos dátumára, a tavaszi napéjegyenlőségre (március 20–21.) és a nyári napfordulóra (június 20–21.) [14].

Mindezeket követte egy olyan számítógépes modellezés, amivel az égviszonyoktól, napkőtől és dátumtól függő navigációs irányhibák felhasználásával 36 ezer viking hajóutat szimuláltunk a 60° 21' 55" északi szélességi kör mentén lévő norvégiai Bergentől a dél-grönlandi Hvarf célállomásig, miközben a navigátornak állandóan a földrajzi nyugati irányt kellett meghatároznia és tartania [14]. Megmutattuk, hogy az ÉVN S hajózási sikere meglepően nagy volt (92–100%) az égfény polarizáció-

irányának meghatározására használt napkőkristálytól és a hajózás dátumától szinte függetlenül, ha a navigátor $\Delta t = 1, 2$ vagy 3 órás navigációs periodicitással határozta meg a tartandó menetirányt, és a hajózás sikeressége csak ennél nagyobb Δt esetén csökkent annyira (1–6%), hogy a vikingek nem érték el Dél-Grönlandot, hanem messze délre elkerülték azt az Atlanti-óceánon, ahova belevesztek, vagy szerencsés esetben ennek köszönhetően fedezhették fel Amerikát (Kanada észak-keleti részét), jóval Kolumbusz előtt. Ha kellően gyakran határozták meg az északi irányt, akkor a hibák kompenzálták egymást, ugyanis délelőtt a hibák többnyire észak felé térítették el a hajót, délután pedig dél felé [14].

Ezután megvizsgáltuk az ÉVN S hajózási sikerének érzékenységét a releváns hajózási, meteorológiai és navigációs paraméterekre [15]. Arra jutottunk, hogy az ÉVN hajózási sikere érzékeny az éjjeli továbbhajózásra, a navigációs periodicitásra és a hajózási dátumra, míg robusztus (szinte érzéketlen) a napkőtípussal, a felhőzettség változékonyságával és az erősen, közepesen vagy gyengén felhős ég dominanciájával szemben [15].



4. ábra. Norvégia és Dél-Grönland között számítógéppel modellezett viking hajóutak nyári napfordulókör (június 21.) négy különböző navigációs stratégia esetén. 1. Mindig az égypolarizációs viking navigáció (ÉVN) alapján. 2. Napsütésben szoláris viking navigáció (SzVN), felhős időben pedig ÉVN. 3. (SzVN megállás nélkül): napsütésben SzVN, amikor pedig a Napot felhők takarták, akkor folytatták a hajózást a SzVN segítségével meghatározott legutolsó haladási irányban. 4. (SzVN megállással): napsütésben SzVN, amíg pedig a Napot felhők takarták, addig megállt a hajó. Amikor éjjel nem haladt a hajó, nappal a navigátor kalcit napkövet használt $\Delta t = 1$ és 5 óra navigációs periodicitással, $m = 0$ felhődominancia, $\sigma = 2$ felhőváltozékonyság és a tengeráramlatok hatását szimuláló 4-es Brown-paraméter mellett. A sikeres (Grönlandot elérő) vagy sikertelen (Grönlandot el nem érő) utak zöldek, illetve pirosak. Minden egyes térkép 1000 hajóutat szemléltet adott Δt és navigációs stratégia esetén, aminek S (%) hajózási sikere a jobb felső sarokban látható. A térképek kék vonala a láthatósági határvonal, ahonnan Grönland délkeleti hegyei már láthatók a viking hajóról. Egy hajóút szimulációja akkor fejeződött be, ha a navigátor megpillantotta Grönland délkeleti partvonalát a pillanatnyi látástávolság mellett, amit a ρ felhőzettség aktuális értéke határozott meg. Ha egy hajóút átment Izlandon vagy Észak-Skócián, akkor azt feltételeztük, hogy a vikingek folytatták útjukat Grönland felé. S kisebb (51%, 58%) értékeinél a zöld hajóutak zöme fedeti a pirosakat, ezért tűnik a sikerráta látszólagosan nagyobbak [16]

Figyelemre méltó, hogy e navigációs módszer pontosságára (sikerére) alig van hatással a felhőzsítság dominanciája és változékonysága.

Legutóbb számítógépes modellezéssel tanulmányoztuk a szoláris (napos) viking navigáció (SzVN) és a kombinált navigáció (SzVN-ÉVN) S hajózási sikerét (4. ábra) [16]. A legvalószínűbb kombinált módszer napsütésben csak a közvetlen napfényt használja (SzVN), míg mikor a Napot felhők takarják, akkor az ÉVN-t. Meghatároztuk az SzVN, az ÉVN és a kombinált SzVN-ÉVN S hajózási sikerét három navigátortípusra (akik a tartandó nyugati hajózási irányt nagy, közepes vagy kis navigációs periodicitással határozgatták meg), tavaszi napéjegyenlőségkor és nyári napfordulókor, éjjeli továbbhajózással és anélkül, a következő négy navigációs stratégia mellett: 1. (ÉVN: csak égpolárizáció): mindig csak az égpolárizáció alapján. 2. (SzVN vagy ÉVN): napsütésben SzVN, felhős időben ÉVN. 3. (SzVN megállás nélkül): napsütésben SzVN, amikor pedig a Napot felhők takarták, akkor folytatták a hajózást az SzVN segítségével meghatározott legutolsó haladási irányban. 4. (SzVN megállással): napsütésben SzVN, amíg pedig a Napot felhők takarták, addig megállt a hajó.

Azt találtuk, hogy a navigációs periodicitástól függően az S hajózási siker maximalizálása érdekében különböző navigációs stratégiát kell választani. A legnagyobb navigációs siker záloga az égpolárizáció sűrű navigációs periódus melletti használata [16]. Ekkor volt a legnagyobb esély arra, hogy a Norvégia és Grönland közti háromhetes hajóutat túléljék a vikingek.

Végül hangsúlyozzuk, hogy a 15 évig tartó kutatásunk eredményeivel nem azt bizonyítottuk, hogy a vikingek valóban az égpolárizációs módszert használták a navigálásukhoz, csupán arra mutattunk rá, hogy ha igen, akkor milyen eredményesen vagy eredménytelenül tájékozódhattak az időjárástól és egyéb környezeti tényezőktől függően.

A cikkünkben szemlézett kutatási téma eredményeit és azok szintézisét részletesen ismerteti a 174 oldalas [17] könyvfejezet.

Köszönetnyilvánítás

Kutatásunkat az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok „Égbolt-polarimetria a felhők felismerésére és a polarimetrikus viking navigációnak kedvező meteorológiai viszonyok vizsgálatára” című, OTKA K-105054 számú, 2012–2016 (48 hónap) futamidejű pályázata támogatta.

Irodalom

1. Bernáth B., Blahó M., Egri Á., Barta A., Horváth G. (2013): An alternative interpretation of the Viking sundial artefact: An instrument to determine latitude and local noon. *Proceedings of the Royal Society A* 469, 20130021.
2. Bernáth B., Farkas A., Száz D., Blahó M., Egri Á., Barta A., Åkesson S., Horváth G. (2014): How could the Viking sun compass be used with sunstones before and after sunset? Twilight board as a

new interpretation of the Unartog artefact fragment. *Proceedings of the Royal Society A* 470, 20130787.

3. Barta A., Horváth G., Meyer-Rochow V. B. (2005): Psychophysical study of the visual sun location in pictures of cloudy and twilight skies inspired by Viking navigation. *Journal of the Optical Society of America A* 22, 1023–1034.
4. Bernáth B., Blahó M., Egri Á., Barta A., Kriska G., Horváth G. (2013): Orientation with a Viking sun-compass, a shadow-stick, and two calcite sunstones under various weather conditions. *Applied Optics* 52, 6185–6194.
5. Száz D., Farkas A., Blahó M., Barta A., Egri Á., Kretzer B., Hegedüs T., Jäger Z., Horváth G. (2016): Adjustment errors of sunstones in the first step of sky-polarimetric Viking navigation: Studies with dichroic cordierite/tourmaline and birefringent calcite crystals. *Royal Society Open Science* 3, 150406.
6. Farkas A., Száz D., Egri Á., Blahó M., Barta A., Nehéz D., Bernáth B., Horváth G. (2014): Accuracy of sun localization in the second step of sky-polarimetric Viking navigation for north determination: a planetarium experiment. *Journal of the Optical Society of America A* 31, 1645–1656.
7. Száz D., Farkas A., Barta A., Kretzer B., Egri Á., Horváth G. (2016): North error estimation based on solar elevation errors in the third step of sky-polarimetric Viking navigation. *Proceedings of the Royal Society A* 472, 20160171.
8. Száz D., Farkas A., Barta A., Kretzer B., Blahó M., Egri Á., Szabó G., Horváth G. (2017): Accuracy of the hypothetical sky-polarimetric Viking navigation versus sky conditions: revealing solar elevations and cloudinesses favourable for this navigation method. *Proceedings of the Royal Society A* 473, 20170358.
9. Suhai B., Horváth G. (2004): How well does the Rayleigh model describe the E-vector distribution of skylight in clear and cloudy conditions? A full-sky polarimetric study. *Journal of the Optical Society of America A* 21, 1669–1676.
10. Hegedüs R., Åkesson S., Wehner R., Horváth G. (2007): Could Vikings have navigated under foggy and cloudy conditions by skylight polarization? On the atmospheric optical prerequisites of polarimetric Viking navigation under foggy and cloudy skies. *Proceedings of the Royal Society A* 463, 1081–1095.
11. Horváth G., Barta A., Pomozi I., Suhai B., Hegedüs R., Åkesson S., Meyer-Rochow B., Wehner R. (2011): On the trail of Vikings with polarized skylight: Experimental study of the atmospheric optical prerequisites allowing polarimetric navigation by Viking seafarers. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 366, 772–782.
12. Barta A., Farkas A., Száz D., Egri Á., Barta P., Kovács J., Csák B., Jankovics I., Szabó G., Horváth G. (2014): Polarization transition between sunlit and moonlit skies with possible implications for animal orientation and Viking navigation: anomalous celestial twilight polarization at partial moon. *Applied Optics* 53, 5193–5204.
13. Horváth G., Takács P., Kretzer B., Szilasi S., Száz D., Farkas A., Barta A. (2017): Celestial polarization patterns sufficient for Viking navigation with the naked eye: Detectability of Haidinger's brushes on the sky versus meteorological conditions. *Royal Society Open Science* 4, 160688.
14. Száz D., Horváth G. (2018): Success of sky-polarimetric Viking navigation: Revealing the chance Viking sailors could reach Greenland from Norway. *Royal Society Open Science* 5, 172187.
15. Takács P., Száz D., Pereszlényi Á., Horváth G. (2022): Sensitivity and robustness of sky-polarimetric Viking navigation: Sailing success is most sensitive to night sailing, navigation periodicity and sailing date, but robust against weather conditions. *Public Library of Science One* 17, e0262762.
16. Takács P., Száz D., Pereszlényi Á., Horváth G. (2023): Speedy bearings to slacked steering: Mapping the navigation patterns and motions of Viking voyages. *Public Library of Science One* 18, e0293816.
17. Horváth G. (2024): Chapter 26: Sky-polarimetric Viking navigation: An extended update. pp. 563–737. In: Horváth G. (ed.) (2024): *Polarization Vision and Environmental Polarized Light*. Springer Nature Switzerland AG: Cham, Switzerland.