

## ФАКТОРИ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ ИЗМЕНЧИВОСТТА НА ГЛОБАЛНИЯ КЛИМАТ НА ПЛАНЕТАТА

Цветелина Величкова<sup>1</sup>, Наталия Килифарска<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национален институт по геофизика, геодезия и география – Българска Академия на Науките  
<sup>2</sup>Институт за изследване на климата, атмосферата и водите – Българска Академия на Науките  
e-mail: tsvelichkova@geophys.bas.bg; natalya\_kilifarska@yahoo.co.uk

**Ключови думи:** Климатична изменчивост, движещи фактори, външни и вътрешни фактори

**Резюме:** Целта на настоящия доклад е да сравни степента на свързаност между приземната температура и предполагаемите движещи фактори на измененията в климата (въглеродния диоксид, озона в ниската стратосфера, интензитета на геомагнитното поле, галактическите космични лъчи и броя слънчеви петна). Оценката е направена с помощта на линейни и нелинейни статистически методи. Сравнението показва, че пренебрегването на нелинейния характер на климатичния ред и на въздействащите фактори води до надценяване приноса на тези от факторите, които в разглеждания период се изменят квазилинейно с времето. Такъв, например, е въглеродният диоксид (CO<sub>2</sub>) – считан за основен двигател на съвременното затопляне на климата. Нелинейният статистически анализ показва, че времевите изменения на геомагнитното поле са в състояние да „обяснят“ същия процент от изменчивостта на приземната температура за изследваните 110 години, както и CO<sub>2</sub> – а именно 76%. Съществуват и други „претенденти“ за съществен принос в климатичните промени – такива са галактическите космични лъчи и озона в ниската стратосфера.

## FACTORS RESPONSIBLE FOR THE GLOBAL CLIMATE VARIABILITY

Tsvetelina Velichkova<sup>1</sup>, Natalya Kilifarska<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – Bulgarian Academy of Sciences  
<sup>2</sup>Climate, atmosphere and water research institute – Bulgarian Academy of Sciences  
e-mail: tsvelichkova@geophys.bas.bg; natalya\_kilifarska@yahoo.co.uk

**Keywords:** Climate variability, driving factors, internal and external forcing

**Abstract:** The purpose of this article is to compare the degree of correlation between surface temperature and presumed factors driving its climatic scale variations (i.e. carbon dioxide, ozone, geomagnetic field intensity, galactic cosmic rays, and the number of sunspots). The estimation was made using linear and nonlinear statistical methods. The comparison showed that the neglect of the nonlinear nature of the climatic order and the influencing factors leads to an overestimation of the contribution of those of the factors that change quasi-linearly over time in the considered period. Such, for example, is carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) - considered the main engine of modern global warming. The non-linear statistical analysis showed that the temporal changes of the geomagnetic field are able to "explain" the same percentage of the variability of the surface temperature for the studied 110 years, as well as CO<sub>2</sub> - 76%. There are other potential contenders for significant contributions to climate change.

### Въведение

Линейните статистически методи обикновено са сред най-предпочитаните алгоритми за анализ на климатични редове от данни. Тези методи трябва да се използват за относително кратки периоди, когато връзката между въздействащите фактори и отклика на климатичната система е линейна и стационарна. Линейните методи, обаче, трябва да се използват много внимателно, тъй като тяхната надеждност зависи от три основни допускания: а) времевият ред е стационарен (т.е. средната му стойност и стандартното отклонение не зависят от времето);

б) връзките между въздействащите фактори и климатичния отговор са линейни; в) тези връзки са стационарни във времето.

Множество изследвания показват, че климатичните редове са определено нелинейни, особено за по-дълги интервали от време [1-4]. Това изисква прилагането на нелинейни методи за оценка на въздействието на факторите влияещи върху климата. В допълнение, климатичните редове са и нестационарни, което означава, че функционалните зависимости между климата и въздействащите фактори се променят във времето. Поради тази причина, прилагането на линейни методи за анализ на климатични редове не е подходящо, особено за дълги периоди от време. Прилагането на нелинейни статистически методи, обаче, изисква много по-задълбочени познания по статистика, което е основната пречка за по-широкото им използване в анализа на климатичните данни.

В следващите параграфи ще покажем сравнение между резултатите получени с използването и на двата подхода – линеен и нелинеен – анализирайки възможностите на всеки от тях.

### **Данни и методи**

Настоящото изследване включва анализ на месечните данни за относителното съдържание на  $O_3$  на 70 hPa, специфичната влажност на 150 hPa и приземната температура на 2 m над земната повърхност, взети от реанализа ERA 20 век, за периода 1900-2010 г. За анализа на въглеродния диоксид взехме неговите средно годишни стойности от обсерваторията Мауна Лоа в Хавай, както и исторически записи, получени от сондажни ядки на ледници в Антарктида. Използвахме годишни стойности за галактическите космични лъчи, които взехме от [5], като след 2007 г. редът от стойности беше продължен въз основа на калибрирани стойности от Московския неутронен монитор. Годишните данни за геомагнитното поле взехме от International Geomagnetic Reference Field model. В изследването използвахме още годишни стойности за броя на слънчевите петна, които взехме от WDC-SILCO, Кралската обсерватория на Белгия в Брюксел.

За линеен метод избрахме *крос-корелационният анализ* за определянето на силата и посоката на зависимост между изследваните променливи величини. Коефициентите на корелация са статистическа мярка, представяща степента на свързаност между две случайни променливи. Избрахме неговият вариант с отнемстване назад във времето на независимата променлива, тъй като някой от изследваните климатични параметри реагират със закъснение на приложеното въздействие.

За да илюстрираме нелинейната техника, ще използваме нелинейна регресия. Нейната цел е да построи модел на предполагаемата зависимост между изследваните променливи. Тъй като това е трудна и често нееднозначна задача, точността на модела се основава на редица критерии, които ще покажем в следващия параграф. Използваните статистически техники са инструменти от статистическия пакет STATISTICA 8.

### **Резултати получени с линейни статистически методи**

Изследваните независими променливи са сезонните стойности на озона ( $O_3$ ) на 70 hPa, усреднени върху месеците декември-март, годишно усреднените стойности на въглеродния диоксид ( $CO_2$ ), годишно и пространствено усреднените стойности на земно магнитно поле ( $F$ ) и неговите векови вариации ( $F_c$ ), годишното средно на броя слънчеви петна ( $S_s$ ), както и изгладения ред с плъзгач се 11 и 22-годишен прозорец, средно-годишните стойности на галактическите космични лъчи (GCR), както и изгладения ред с 11- и 22- годишно плъзгащо се осредняване. Зависимата климатична променлива е приземната температура на въздуха, измерена на 2 m. над земната повърхност ( $T_{2m}$ ) през зимата (декември-март). Изчислените корелационни коефициенти, заедно с времезакъснението в реакцията на приземната температура, са представени в таблица 1.

Анализът на таблицата потвърждава общоприетото схващане, че  $CO_2$  има водещ принос за глобалното затопляне на Земята. Ролята на вариациите в годишните стойности на слънчевата активност (представена от броя на слънчевите петна) е незначителна. Малка е и ролята на неизгладените стойности на GCR. Корелацията на  $T_{2m}$  с изгладените  $S_s$  е значително по-силна, но времезакъснението в реакцията на температурата е много голямо и трудно за обяснение (освен ако не бъде привлечена на помощ инертността на световния океан. Въпреки това остава открит въпросът за механизма на пренос на слънчевата енергия от средната атмосфера (погълната основно от озона) до земната повърхност). Корелацията с дългопериодичните вариации на GCR (с квазипериодичност надхвърляща 22 години) е силна и с отнемстване във времето от една година. Това предполага съществуването на механизъм, чрез който GCR могат да влияят на климата.

Таблица 1. Линейни крос-корелационни коефициенти ( $r$ ) на зимната глобална (пространствено усреднена) приземна температура ( $T_{2m}$ ) с различни въздействащи фактори. Изчислените коефициенти са статистически значими при ниво на достоверност  $2\sigma$ . Числата на втория ред показват времето закъснение на отклика на температурата в години.

	Зим. О <sub>3</sub>	2 * 5год. изгл. зим. О <sub>3</sub>	Ср.год СО <sub>2</sub>	Ср.год . F	Ср.год . F <sub>c</sub>	Ср.год . S <sub>s</sub>	11-год. изгл. S <sub>s</sub>	22-год. изгл. S <sub>s</sub>	Ср.год. GCR	11-год. изгл. GCR	22-год. изгл. GCR
<b>Зим. T<sub>2m</sub></b>	-0.5	-0.57	0.85	-0.72	0.39	–	0.59	0.57	0.30	-0.48	0.51
<b>Време закъснение</b>	-6	0	0	-1	-6	0	-48	-48	-16	-20	-1

Особено изненадваща, обаче, е ковариацията във времето на пространствено усреднените стойности на магнитното поле на Земята и приземната температура, в рамките на разглеждания период 1900-2010г. Независимо от силните пространствени вариации и на двете променливи, много високият корелационен коефициент -0.72, както и времезакъснението от 1 година, предпоставят съществено влияние на измененията на геомагнитното поле върху климата на Земята.

В следващия параграф ще проверим доколко нелинейността и нестационарността на климатичните редове се отразява върху оценката за ролята на различните въздействащи фактори в изменчивостта на климата. За целта ще използваме регресионен анализ, базиран върху нелинейни функционални зависимости.

#### Резултати получени с нелинейни статистически методи

Като илюстрация на нелинейната техника Non-linear estimation, предоставен в пакета STATISTICA 8, анализирахме отново посочените по-горе в параграфа климатични фактори, чието въздействие върху глобалната температура на въздуха на 2м над земната повърхност ( $T_{2m}$ ) беше моделирано с помощта на нелинейни функционални зависимости. Получените регресионни коефициенти са обобщени в таблица 2.

Таблица 2. Нелинейни регресионни коефициенти (R) на зимната глобална (пространствено усреднена) приземна температура ( $T_{2m}$ ) с различни въздействащи фактори. Квадратът на регресионния коефициент  $R^2$ , умножен на 100, отразява процента на изменчивост на моделираната променлива, който регресионният модел е в състояние да опише.

	О <sub>3</sub> + 2 * 5год. изгл. зим. О <sub>3</sub>	Ср.год СО <sub>2</sub>	Ср.год. F	11-год. + 22-год. изгл. S <sub>s</sub>	11-год. + 22-год. изгл. GCR
<b>R</b>	0.66	0.87	0.87	0.34	0.64
<b>R<sup>2</sup></b>	44%	76%	76%	12%	41%

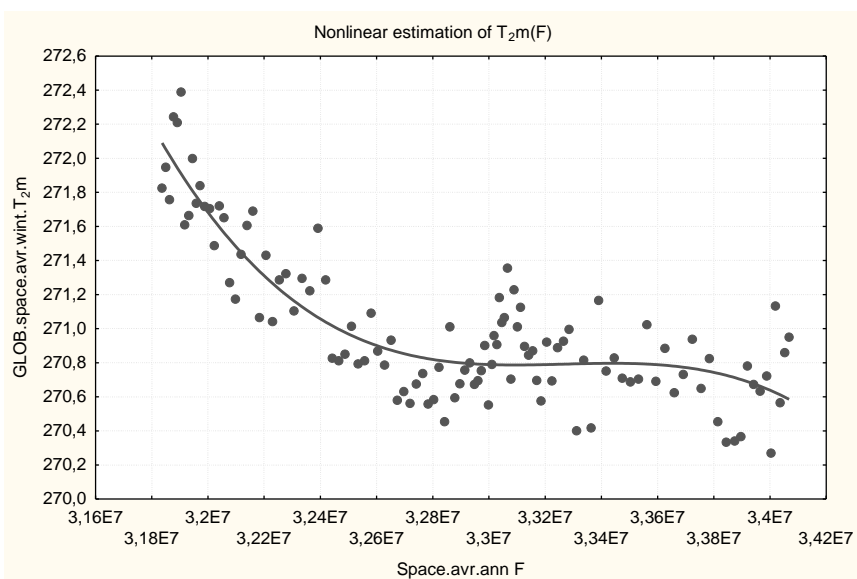
Изненадващо високата корелация между геомагнитното поле и приземната температура (виж Таблица 1) основателно възбужда интереса към възможността за „прогнозиране“ на изменчивостта на температурата въз основа на познанията ни за вариациите на магнитното поле. Предполагамата зависимост между геомагнитното поле и температурата моделирахме с нелинейна функция от вида:

$$(1) \quad T_{2m} = a_0 + a_1 * F + a_2 * (F)^2 + a_3 * (F)^3$$

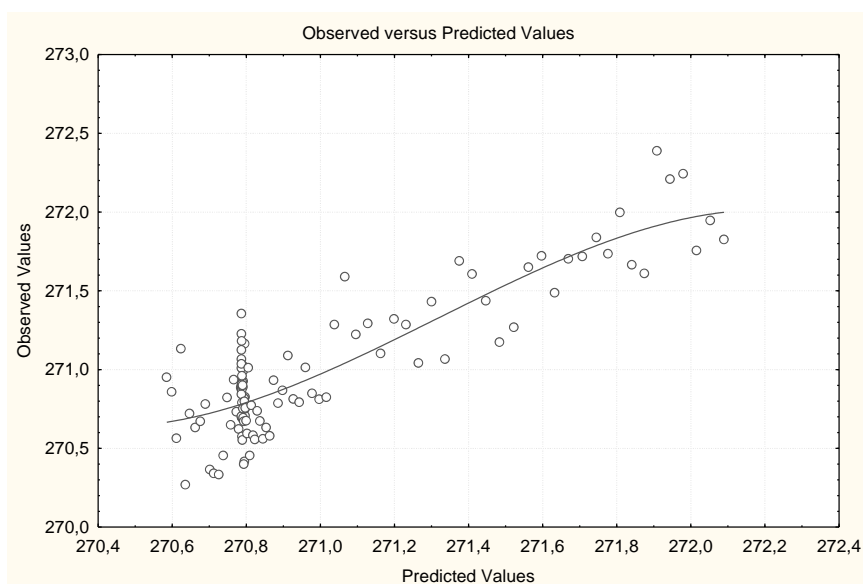
където с F сме означили пространствено усреднения интензитет на геомагнитното поле, а коефициентите  $a_i$  се уточняват посредством регресионната процедура. Прилагането на кубична функция, за моделиране на свързаността между двете променливи, води до увеличаване на коефициента на регресия до  $R = 0,87$ , което е съществено повишение в сравнение с линейния

корелационен коефициент ( $r = -0,72$ , виж Таблица 1). Сравнението с коефициента на регресия между температурата и въглеродния диоксид ( $R = 0,87$ ) показва, че измененията на геомагнитното поле са алтернативно обяснение на наблюдаваното затопляне в глобалната температура (поне в рамките на изследвания период: 1900-2010 г.).

Точността на избрания от нас модел ще илюстрираме с помощта на графичните критерии диагностика, предоставяни от пакета STATISTICA. Зависимостта на приземната температура от интензитета на геомагнитното поле (сините точки) е представена на Фиг. 1. Червената линия показва графиката на функцията (1), интерполиращата, зависимостта между геомагнитното поле и температурата. От фигурата се забелязва, че усилването на интензитета на  $F$ , води до понижаване на  $T_{2m}$  – резултат, който съответства на заключенията направени на базата на анализа на палеоклиматични и палеомагнитни данни [6-8]. За възможностите на подбраната функционална зависимост да моделира ковариацията на геомагнитното поле и приземната температура говори не само високия коефициент на регресия, но и доброто съответствие между моделните и реално измерените стойности, което е още една от характеристиките за добрия статистически модел (Фиг. 2).

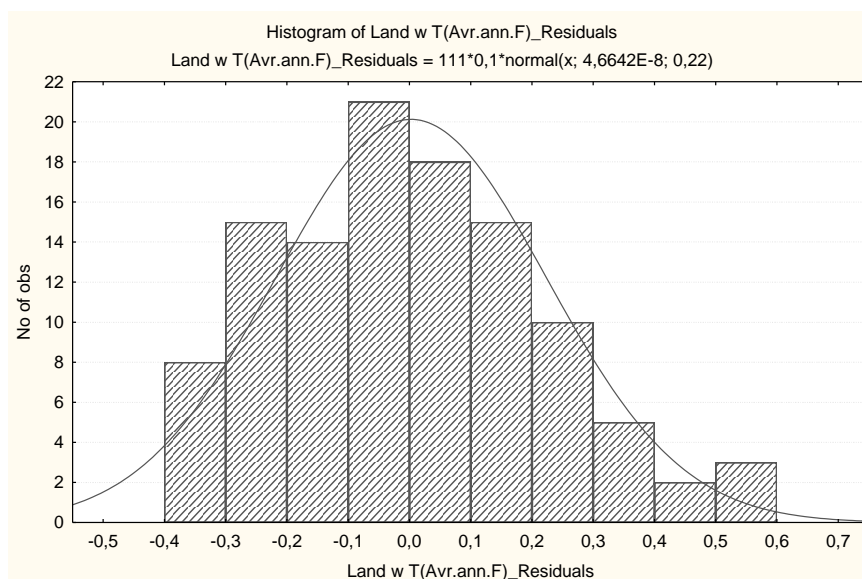


Фиг. 1. Графика на зависимостта между интензитета на геомагнитното поле ( $F$ ) и приземната температура (пространствено усреднени) в рамките на изследвания период



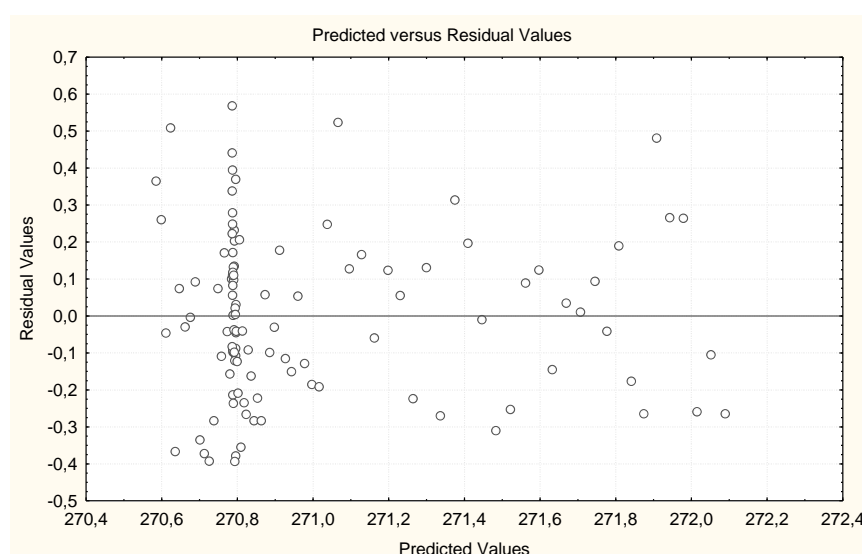
Фиг. 2. Диаграма на разсейване между прогнозите (използвайки функционалната зависимост (1)) спрямо наблюдаваните стойности

Потвърждение за високата точност на модела дава хистограмата на разпределението на остатъците (т.е. разликите между измерените и моделираните стойности на зависимата променлива), която доказва, че те са разпределени нормално (друг критерий за качеството на модела).

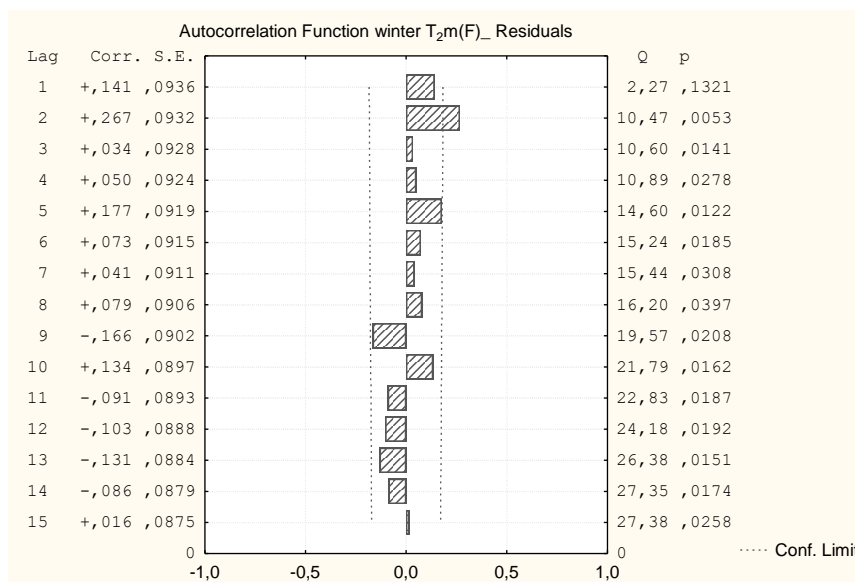


Фиг. 3. Хистограма на разпределението на грешките от модела (1)

Друг критерий за доброто качество на модела е случайното разпределение на точките около нулевата линия (без наличието на структурни нееднородности) в графиката на зависимостта между моделните стойности и грешките (Фиг. 4). Особено важно изискване към добрия статистически модел е грешките на модела (т.е. разликите между измерените и моделните стойности да не корелират помежду си. Като критерий за диагностика използвахме автокорелационната функция на грешките, представена на Фиг. 5. Анализът показва, че грешките, допуснати при моделирането на функционалната зависимост между геомагнитното поле и температурата, не корелират помежду си, т.е. те са случайно разпределени. Следователно, изпълнението на изискванията за „нормалност“ на грешките на модела, случайното им разпределение около нулата, липсата на корелация между тях, както и високия регресионен коефициент потвърждават, че използваната функционална зависимост между приземната температура и геомагнитното поле (1) описва достатъчно добре тяхната ковариация във времето.



Фиг. 4. Диаграма на разсейване на прогнозните стойности спрямо остатъците, илюстрираща случайното разпределение на грешките от интерполирането на ковариацията между температурата и геомагнитното поле посредством функционалната зависимост (1)



Фиг. 5. Автокорелация на остатъците на модела  $T_2m=f(F)$

Сравнението на приноса на разглежданите фактори в изменчивостта на приземната температура показва, че вариациите с времето на пространствено усредненото геомагнитно поле е равностойна алтернатива на увеличението на антропогенните газове в следствие от развитието на човешката цивилизация – поне за разглеждания период 1900-2010 г. Другите два фактора с потенциално голям дял в съвременното затопляне на климата са дългопериодичните стойности на галактическите космически лъчи и озона на 70hPa.

### Заклучение

Направените експерименти с линейни и нелинейни статистически методи имат за цел да илюстрират преимуществата и недостатъците на различните статистически подходи при анализа на климатичните редове. Трябва да отбележим, че нелинейните методи в определени случаи позволяват по-точно описание на функционалните зависимости между изследваните променливи. Приложението им, обаче, има по-скоро познавателен характер, отколкото използването им като прогностичен инструмент на предстоящите промени на климата, поради нестационарността както на климатичните променливи, така и на въздействащите фактори.

### Благодарности

Авторите изказват своята благодарност на Фонд научни изследвания - договор No. ДН 14/1 11.12.2017 и Министерство на образованието и науката – Национална програма “ Млади учени и постдокторанти”, DCM # 577 / 17.08.2018, с чиято помощ бе осъществено изследването.

### Литература:

1. King, T., 1996, Quantifying nonlinearity and geometry in time series of climate, *Quat. Sci. Rev.*,15, 247–266, [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0277-3791(95)00060-7).
2. Miksovsky , J., Raidl, A., 2006, Testing for nonlinearity in European climatic time series by the method of surrogate data, *Theor. Appl. Climatol.*, 83, 21–33, <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0130-7>.
3. Wu, Z., Huang, N.E., Long, S.R., Peng, C.-K., 2007q On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 104, 14889–14894, <https://doi.org/10.1073/pnas.0701020104>.
4. Halko, G. and Tsilika, K., 2014, Nonlinear time series analysis of annual temperatures concerning the global Earth climate, <http://mpr.ub.uni-muenchen.de/59140/> MPRA Paper No. 59140.
5. Usoskin, I.G., Mursula, K., Solanki, S. K., Schuessler, M., Kovaltsov, G.A., 2002, A physical reconstruction of cosmic ray intensity since 1610, *J. Geophys. Res.*, 107(A11), doi:10.1029/2002JA009343.
6. Valet, J., Meynadier, L., 1993, Geomagnetic field intensity and reversals during the past four million years, *Nature*, 366, 234. <https://doi.org/10.1038/366234a0>.
7. Worm, H.-U., 1997, A link between geomagnetic reversals and events and glaciations, *Earth and Planetary Science Letters*, 147, 55–67, [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00008-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00008-3).
8. Knudsen, M. F., Riisager, P., 2009, Is there a link between Earth's magnetic field and low-latitude precipitation?, *Geology* 37, 71–74. <https://doi.org/10.1130/G25238A.1>.