



GEOMAGNETIC EXCURSION RECORD PRESERVED IN THE SPELEOTHEM FROM WESTERN CAUCASUS: FIRST DATA

D.A. Gavriushkin ^{1,3✉}, A.M. Pasenko ¹, R.V. Veselovskiy ^{1,2}, D.V. Rud'ko ¹

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

² Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

³ RPO "Russian Union of Speleologists", Moscow, Russia

ABSTRACT. The study of the geomagnetic field evolution on minor timescales, in particular of such significant events as geomagnetic reversals and excursions, has acquired particular relevance nowadays due to the increased attention of mankind to the environment. The question of how exactly abrupt changes in the characteristics of the geomagnetic field affect the climate and biosphere remains largely debatable; the idea of the speed and dynamics of these changes is also very vague. "Classical" geological objects and existing methods provide limited opportunities for highly detailed reconstructions of geomagnetic field variations; therefore, paleomagnetologists are looking for new objects and approaches to solve this problem. The research that we have begun involves the use – for the first time in Russia – of speleothems to study secular variations of the geomagnetic field.

This brief communication presents paleomagnetic records of two drill-cores from the flowstone from Vorontsovskaya cave, located on the western flank of the Caucasus Mountains in the valley of the river Kudepsta. Preliminary results indicate the presence of a geomagnetic excursion record in both drill-cores. Further study of the samples from Vorontsovskaya cave will make it possible to compare the discovered event with known excursions, as well as to clarify its age, duration, and dynamics.

KEYWORDS: geomagnetic excursion; secular variations; speleothems; Quaternary; environmental magnetism; paleomagnetism; geomagnetic field evolution

FUNDING: This study was performed with the support from the Russian Science Foundation, grant 22-27-00453, and with the use of equipment from the Shared Research Facilities "Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism" of IPE RAS (Moscow).

SHORT COMMUNICATION

Received: December 30, 2021

Revised: January 27, 2022

Accepted: February 15, 2022

Correspondence: Dmitriy A. Gavriushkin, dmitry.gavriushkin@gmail.com

FOR CITATION: Gavriushkin D.A., Pasenko A.M., Veselovskiy R.V., Rud'ko D.V., 2022. Geomagnetic Excursion Record Preserved in the Speleothem from Western Caucasus: First Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0624. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0624

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ О ЗАПИСИ ГЕОМАГНИТНОГО ЭКСКУРСА, СОХРАНЕННОЙ В СПЕЛЕОТЕМЕ С ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

Д.А. Гаврюшкин^{1,3}, А.М. Пасенко¹, Р.В. Веселовский^{1,2}, Д.В. Рудько¹

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

³ ВОО «Российский союз спелеологов», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ. Изучение эволюции геомагнитного поля на малых временных масштабах, в частности таких характерных событий, как геомагнитные инверсии и экскурсы, в наши дни приобрело особую актуальность в связи с возросшим вниманием человечества к окружающей среде. В значительной мере дискуссионным остается вопрос о том, как именно резкие изменения характеристик геомагнитного поля отражаются на климате и биосфере; представления о скорости и динамике этих изменений также весьма расплывчаты. «Классические» геологические объекты и существующие методы исследований предоставляют ограниченные возможности для высокодетальных реконструкций вариаций геомагнитного поля, поэтому палеомагнитологи ищут новые объекты и подходы для решения этой задачи. Начатое нами исследование предполагает использование – впервые в России – спелеотемов для изучения вековых вариаций геомагнитного поля.

В настоящем кратком сообщении представлены палеомагнитные записи двух кернов из натечной плотины пещеры Воронцовской, располагающейся на западном крыле Кавказских гор в долине р. Кудепста. Предварительные результаты указывают на наличие записи геомагнитного экскурса в обоих кернах. Дальнейшее изучение образцов из пещеры Воронцовской позволит сопоставить выявленное событие с известными экскурсами, а также уточнить его возраст, продолжительность и динамику.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геомагнитный экскурс; вековые вариации; спелеотемы; четвертичный период; магнетизм окружающей среды; палеомагнетизм; эволюция геомагнитного поля

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, грант № 22-27-00453, с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» ИФЗ РАН (г. Москва).

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение поведения геомагнитного поля на разных временных масштабах необходимо для понимания процессов во внешнем ядре Земли и на границе внешнего ядра и мантии, ответственных за его генерацию, а также для прогнозирования состояния земной магнитосферы в будущем. Несмотря на накопленные к настоящему времени знания об эволюции геомагнитного поля на протяжении геологической истории, остаются открытыми вопросы о его поведении во время глобальных геомагнитных событий на малых временных масштабах (десятки, сотни и тысячи лет), о геодинاميке этих процессов [Bogue, Merrill, 1992; Laj, Channell, 2007] и об их возможной связи с окружающей средой и климатом [Pospelova, 2000; Gallet et al., 2006; Courtillot, Olson, 2007], что обусловлено во многом нехваткой подходящих геологических объектов, способных сохранять высокодетальную и достаточно продолжительную палеомагнитную запись кратковременных геомагнитных событий. По ряду причин традиционно используемые для реконструкции вековых геомагнитных вариаций объекты – лавовые потоки, археологические артефакты, морские и озерные отложения – далеко не всегда отвечают предъявляемым для данной задачи требованиям. Лавовые толщи обычно надежно сохраняют термоостаточную намагниченность, однако

изливаются неравномерно, пульсами, что редко позволяет получить достаточно продолжительную и детальную палеомагнитную запись. Археологические артефакты часто предоставляют надежные данные о напряженности магнитного поля Земли в прошлом (палеонапряженности), но крайне редко по ним удается восстановить направление древнего геомагнитного поля. Кроме того, определения по археологическим объектам также имеют дискретное распределение во времени и покрывают лишь эпоху голоцена. Морские и озерные осадки накапливаются непрерывно, но ввиду особенностей своего формирования (скорость осадконакопления, диагенез, биотурбации, компакция) подвержены ряду нежелательных эффектов, которые искажают палеомагнитную запись. Все это побуждает палеомагнитологов обращаться к новым объектам исследований.

Одним из таких объектов в последние десятилетия зарекомендовали себя натечные образования пещер – спелеотемы. Как показано предыдущими исследованиями [Perkins, Maher, 1993; Perkins, 1996; Lascu, Feinberg, 2011; Font et al., 2014], естественная остаточная намагниченность в спелеотемах образуется преимущественно ориентационным (Detrital Remanent Magnetization, DRM) или, реже, химическим (Chemical Remanent Magnetization, CRM) путем и почти не подвержена

постседиментационным изменениям. В нескольких последних работах на основе спелеотемов ученым удалось расшифровать записи геомагнитных экскурсов и уточнить продолжительность и/или динамику изменения характеристик геомагнитного поля [Morinaga et al., 1992; Osete et al., 2012; Lascu et al., 2016; Chou et al., 2018; Pozzi et al., 2019]. Следует отметить, что за рубежом спелеотемы служат объектом палеомагнитных исследований уже несколько десятилетий, в то время как в отечественной палеомагнитной практике данный тип отложений опробуется впервые.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Объектом исследования послужила натечная плотина (flowstone) из карстовой пещеры Воронцовской (рис. 1, а), расположенной на хребте Ахцу (Адлерский район г.о. Сочи Краснодарского края) в 13 км от Черноморского побережья на высоте 500 м н.у.м. (43.61° с.ш., 39.94° в.д.). Пещера заложена в верхнемеловых слоистых известняках, подстилаемых некарстующимися аргиллитами и мергелями [Dublyansky, Ilyukhin, 1982], и служит водосбором долины р. Кудепста, воды которой пропускает через себя и частично перераспределяет в бассейн р. Хоста. В пещере действует современный водоток.

В южной части пещеры, в Очажном гроте, недалеко от места разгрузки южного водотока, расположена натечная плотина, сформированная кальцитом, выпадающим в осадок при падении ручья с трехметрового уступа, которая, по-видимому, продолжает свой рост в настоящее время.

Предварительное изучение нескольких образцов из этой плотины показало наличие в них качественной палеомагнитной записи [Bagdasaryan et al., 2019], поэтому в 2020 г. был произведен дополнительный отбор материала.

Из основания плотины было выбурено два керна – Vor14 и Vor15 – диаметром 25 мм и длиной 235 и 295 мм соответственно (рис. 1, в). Отбор производился с использованием портативного электрического пробоотборника Romeroy DE-T3, ориентировка кернов осуществлялась с помощью устройства Romeroy Orienting Fixture (США) и геологического компаса Brunton.

Пробоподготовка и лабораторные измерения проводились в ИФЗ РАН на базе ЦКП «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм». Перед распиловкой на образцы для палеомагнитных измерений от каждого керна был отрезан тонкий продольный сегмент для последующих микроскопических исследований. Оставшиеся керны были затем распилены на тонкие (4–5 мм) диски, которые были подвергнуты магнитной чистке.



Рис. 1. Общий вид натечной плотины в пещере Воронцовской с обведенным желтым овалом местом отбора палеомагнитных образцов (а, б) и общий вид выбуренного керна спелеотема (в).

Fig. 1. Common view of the flowstone in the Vorontsovskaya cave and the place of paleomagnetic sampling marked by yellow oval (a, b), and the view of drill-core from the flowstone (c).

Магнитная чистка проводилась на SQUID-магнитометре 2G Enterprises 755 SRM переменным магнитным полем (АF-чистка) с пошаговым (25 шагов) увеличением переменного поля от 0 до 130 мТл. Применение криогенного магнитометра позволило успешно измерять слабомагнитные образцы из практически чистого кальцита с величиной естественной остаточной намагниченности (ЕОН) порядка 10^{-6} А/м. Результаты магнитной чистки были подвергнуты компонентному анализу с использованием ПО PMGSC [Enkin, 1994].

В ходе АF-чистки большая часть ЕОН (до 80 %) разрушалась при амплитуде переменного поля 35–40 мТл, что предполагает преобладание относительно низкокоэрцитивных магнитных минералов в изученных образцах. Компонентный анализ выявил, что вектор ЕОН всех образцов характеризуется двухкомпонентным составом. Низкокоэрцитивная компонента намагниченности удаляется при величине размагничивающего поля 5–10 мТл и имеет, по всей видимости, вязкую природу. Относительно высококоэрцитивная компонента

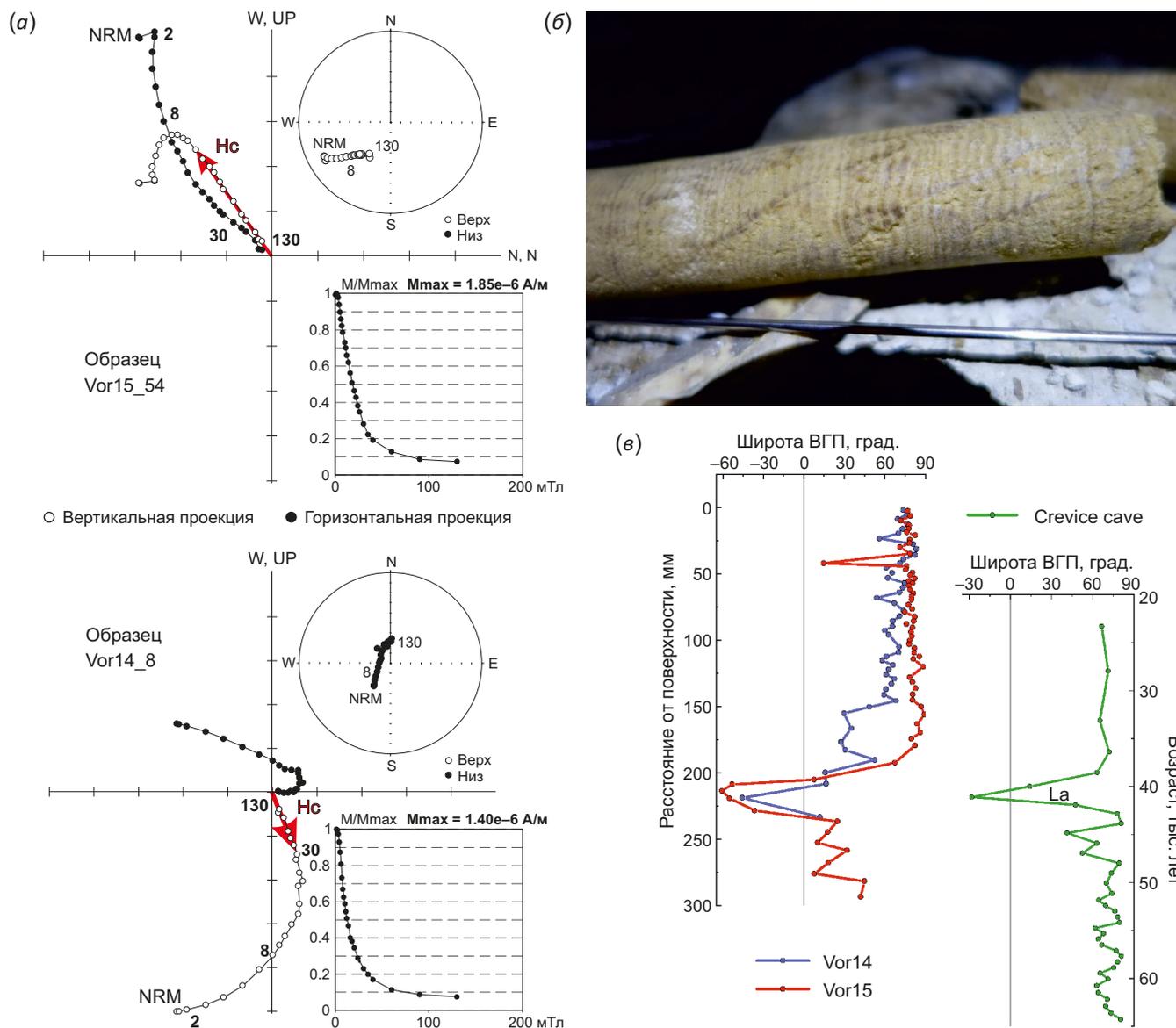


Рис. 2. Результаты магнитных чисток образцов спелеотема.

(а) – диаграммы Зийдвервельда, стереограммы и диаграммы размагничивания, характерные для изученных образцов; (б) – общий вид образца керна; (в) – диаграмма изменения широты виртуального геомагнитного полюса (ВГП) для кернов Vor14 и Vor15 (слева) и для спелеотема из Crevice Cave [Lasclu et al., 2016] (справа); кривые приведены в разном масштабе (длина и время). Литерами La отмечен интервал кривой в записи спелеотема из Crevice Cave, соответствующий экскурсу Лашамп.

Fig. 2. Results of AF-demagnetization of speleothem samples.

(а) – representative Zijderveld plots, stereograms and demagnetization curves; (б) – view of the drill-core; (в) – diagram of virtual geomagnetic pole (VGP) latitude change for Vor14 and Vor15 drillcores (left) and speleothem from the Crevice Cave [Lasclu et al., 2016] (right); curves are not scaled. Letters La mark the interval of the curve in the speleothem record from the Crevice Cave, corresponding to the Laschamp excursion.

намагниченности разрушается в полях 35–130 мТл и интерпретируется нами как характеристическая и первичная (рис. 2, а). В пользу ее первичности свидетельствуют консервативные условия карстовой пещеры и сохранность достаточно хрупкого кальцитового спелеотема, исключающие возможность его тектонических смещений и перемагничивания температурой или вследствие химических преобразований, а также сходство полученных палеонаправлений с ожидаемыми. В дальнейшем планируется проверить надежность полученных палеомагнитных данных подробными петромагнитными и микроскопическими исследованиями.

На основе результатов компонентного анализа для каждого ядра построены кривые вариаций широт ВГП, которые и представляют основной интерес в нашем исследовании (рис. 2, в). В своей верхней части, от поверхности спелеотема до глубины примерно 140 мм (Vor14) и 180 мм (Vor15), полученные величины широт ВГП соответствуют современному значению – примерно 80–85° (согласно модели IGRF-12 [Thébault et al., 2015]). Согласно расчетам, выполненным на основе моделей геомагнитного поля голоцена CALS10k.1b [Korte et al., 2011], pfm9k1 [Nilsson et al., 2014] и SHA.DIF.14k [Pavón-Carrasco et al., 2014], для данной географической точки значения наклона, соответствующие указанному широтному положению ВГП (с колебаниями в пределах $\pm 10^\circ$), были характерны на протяжении, по крайней мере, последних 10–12 тыс. лет. С глубины примерно 140 и 180 мм, соответственно, и до нижних границ ядер Vor14 и Vor15 наблюдается резкое смещение ВГП в южном направлении вплоть до перехода его в Южное полушарие с последующим возвратом в Северное.

Обращает на себя внимание небольшое расхождение кривых Vor14 и Vor15 в интервале глубин 50–150 мм и значительное – в интервале 150–180 мм. Первое можно объяснить погрешностью при выбурировании уже ориентированных ядер, второе требует отдельного объяснения, которое мы планируем получить в ходе будущих подробных исследований.

Мы предполагаем, что подобное поведение ВГП, рассчитанного на основе палеомагнитной записи спелеотема Vor, соответствует геомагнитному экскурсу. На рис. 2, в, приводится предварительное сравнение полученных результатов с наиболее близким к нашему времени и достоверно известным экскурсом Лашамп, который имел место 39–42 тыс. лет назад и длился около 2.5 тыс. лет (по данным [Lascu et al., 2016]). В первом приближении характер широтной миграции ВГП во время экскурса схож в записях спелеотемов Vor и Crevice Cave, что может служить доводом в пользу того, что обнаруженный нами эпизод действительно соответствует экскурсу Лашамп. Однако наблюдаются и различия в записях: например, крайнее южное положение ВГП в записи Vor15 достигает 60° ю.ш., в то время как в записи Crevice Cave – только 30° ю.ш. Очевидно, что полноценное сравнение и обсуждение должны быть выполнены после определения возраста изучаемых ядер.

Если предположить, что скорость роста спелеотема Vor в интервале глубин ядер Vor14 и Vor15 была примерно одинаковой, то полученная запись не соответствует этому экскурсу: в случае равномерного непрерывного роста на экскурс должна была бы приходится примерно 1/16 часть интервала. В реальности же на неполную запись экскурса приходится примерно 1/3 (85 из 235 мм для Vor14 и 125 из 345 мм для Vor15) длины ядер. Следовательно, либо в спелеотеме Vor запечатлено более молодое событие (неизвестный экскурс или один из неподтвержденных экскурсов голоцена, например Этруссия или Соловки), либо за последние 40 тыс. лет спелеотем Vor формировался со значительными перерывами или с существенно разной скоростью. Оценка скорости роста спелеотема будет осуществлена с помощью U-Th метода датирования в ближайшем будущем.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали наличие в спелеотеме Vor подробной палеомагнитной записи хорошего качества. Анализ этой записи выявил присутствие в нижней ее части эпизода пониженных, вплоть до смены полярности, магнитных наклонов, что характерно для геомагнитного экскурса. Корреляция полученной записи с известными геомагнитными экскурсами будет выполнена после получения U-Th изотопных возрастов, а надежность полученного результата будет подтверждена подробными петромагнитными и микроскопическими исследованиями.

4. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Российскому союзу спелеологов и лично Н.С. Сизиковой за содействие в организации отбора образцов в Воронцовской пещере. Авторы признательны С.А. Писаревскому за ценный комментарий и совет по улучшению статьи, который был нами учтен в финальном варианте текста.

5. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

6. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Bagdasaryan T.E., Gavrushkin D.A., Veselovskiy R.V., Usanova O.I., 2019. Speleothems as a Source of Paleomagnetic Records by the Example of Vorontsovskaya Cave, Western

Caucasus. Proceedings of KSC RAS (Geology and Geophysics) 1, 32–37 (in Russian) [Багдасарян Т.Э., Гаврюшкин Д.А., Веселовский Р.В., Усанова О.И. Спелеотемы как источник палеомагнитной записи на примере Воронцовской пещеры, Западный Кавказ // Труды КНЦ РАН (Геология и геохимия). 2019. Вып. 1. С. 32–37]. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.004>.

Bogue S.W., Merrill R.T., 1992. The Character of the Field during Geomagnetic Reversals. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 20, 181–219.

Chou Y.-M., Jiang X., Liu Q., Hu H.-M., Wu Ch.-Ch., Liu J., Jiang Zh., Lee T.-Q. et al., 2018. Multidecadally Resolved Polarity Oscillations during a Geomagnetic Excursion. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (36) 8913–8918. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720404115>.

Courtillot V., Olson P., 2007. Mantle Plumes Link Magnetic Superchrons to Phanerozoic Mass Depletion Events. *Earth and Planetary Science Letters* 260 (3–4), 495–504. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.06.003>.

Dublyansky V.N., Ilyukhin V.N., 1982. The Largest Karst Caves and Mines of the USSR. Nauka, Moscow, 137 p. (in Russian) [Дублянский В.Н., Илюхин В.В. Крупнейшие карстовые пещеры и шахты СССР. М.: Изд-во Наука, 1982. 137 с.].

Enkin R.J., 1994. A Computer Program Package for Analysis and Presentation of Paleomagnetic Data. *Geological Survey of Canada, Sidney*, 16 p.

Font E., Veiga-Pires C., Pozo M., Carvalho C., de Siqueira Neto A.C., Camps P., Fabre S., Mirão J., 2014. Magnetic Fingerprint of Southern Portuguese Speleothems and Implications for Paleomagnetism and Environmental Magnetism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119 (11), 7993–8020. <https://doi.org/10.1002/2014JB011381>.

Gallet Y., Genevey A., Le Goff M., Frédéric F., Eshraghi S., 2006. Possible Impact of the Earth Magnetic Field on the History of Ancient Civilizations. *Earth and Planetary Science Letters* 246 (1–2), 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.04.001>.

Korte M., Constable C., Donadini F., Holme R., 2011. Reconstructing the Holocene Geomagnetic Field. *Earth and Planetary Science Letters* 312, 3–4, 497–505. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.10.031>.

Laj C., Channell J.E.T., 2007. Geomagnetic Excursions. In: B. Romanowicz, A. Dziewonski (Eds), *Treatise on Geophysics*. Vol. 5: Geomagnetism. Elsevier, p. 373–416. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00095-X>.

Lascu I., Feinberg J.M., 2011. Speleothem Magnetism. *Quaternary Science Reviews* 30 (23–24), 3306–3320. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.08.004>.

Lascu I., Feinberg J.M., Dorale J.A., Cheng H., Edwards R.L., 2016. Age of the Laschamp Excursion Determined by U-Th Dating of a Speleothem Geomagnetic Record from North America. *Geology* 44 (2), 139–142. <https://doi.org/10.1130/G37490.1>.

Morinaga H., Horie I., Yaskawa K., 1992. A Geomagnetic Reversal Recorded in a Stalagmite Collected in Western Japan. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity* 44 (8), 661–675. <https://doi.org/10.5636/jgg.44.661>.

Nilsson A., Holme R., Korte M., Suttie N., Hill M., 2014. Reconstructing Holocene Geomagnetic Field Variation: New Methods, Models and Implications. *Geophysical Journal International* 198 (1), 229–248. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu120>.

Osete M.-L., Martin-Chivelet J., Rossi C., Edwards R.L., Egli R., Munoz-Garcia B., Wang X., Pavón-Carrasco F.J., Heller F., 2012. The Blake Geomagnetic Excursion Recorded in a Radiometrically Dated Speleothem. *Earth and Planetary Science Letters* 353–354, 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.07.041>.

Pavón-Carrasco F.J., Osete M.L., Torta J.M., De Santis A., 2014. A Geomagnetic Field Model for the Holocene Based on Archaeomagnetic and Lava Flow Data. *Earth and Planetary Science Letters* 388, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.046>.

Perkins A.M., 1996. Observations under Electron Microscopy of Magnetic Minerals Extracted from Speleothems. *Earth and Planetary Science Letters* 139 (1–2), 281–289. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00013-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00013-1).

Perkins A.M., Maher B.A., 1993. Rock Magnetic and Palaeomagnetic Studies of British Speleothems. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity* 45 (2), 143–153. <https://doi.org/10.5636/jgg.45.143>.

Pospelova G.A., 2000. Geomagnetic Excursions of the Brunhes Chron and Global Climate Oscillations. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 36 (8), 619–629 (in Russian) [Поспелова Г.А. Геомагнитные экскурсы хрона Брюнес и глобальные климатические осцилляции // Физика Земли. 2000. № 8. С. 3–14].

Pozzi J.-P., Rousseau L., Falguères C., Mahieux G., Deschamps P., Shao Q., Kachi D., Bahain J.-J., Tozzi C., 2019. U-Th Dated Speleothem Recorded Geomagnetic Excursions in the Lower Brunhes. *Scientific Reports* 9, 1114. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38350-4>.

Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T. et al., 2015. International Geomagnetic Reference Field: The 12th Generation. *Earth, Planets and Space* 67, 79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>.