

## Геомагнитное поле, космические лучи и климат Земли: связь изменений

В.А. Дергачев<sup>1</sup>, С.С. Васильев<sup>1</sup>, О.М. Распопов<sup>2</sup>, Х. Юнгнер<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им.А.Ф.Иоффе; Политехническая, 26., Санкт-Петербург 194021; v.dergachev@mail.ioffe.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, Мучной пер. 2, Санкт-Петербург 191023

<sup>3</sup>Хельсинский университет, P O Box 64 FIN-00014

### Аннотация

В последние годы широко обсуждается влияние изменений потока космических лучей, восстанавливаемого по результатам изучения космогенных нуклидов в земных образцах, на изменения климата. Недавние исследования показывают, что на временных шкалах различной продолжительности прослеживается связь между изменениями параметров геомагнитного поля и климата. В работе проведён анализ данных по изменению климата, геомагнитного поля и космических лучей, полученных из различных природных архивов.

### Введение

Климатические осцилляции являются одним из глобальных процессов на Земле. Изучение физических процессов, которые управляют изменчивостью земной климатической системы, являются одной из наиболее важных проблем в эпоху современного антропогенного вмешательства в природу. Несмотря на то, что предложено много механизмов изменения климата в течение последних тысячелетий, остаётся дискуссионной объяснение изменения глобальной температуры, наблюдаемой со второй половины прошедшего столетия.

В течение последних нескольких лет получены детальные реконструкции изменения климата на масштабах от десятков до сотен и тысяч лет, которые ясно указывают на то, что изменение климата можно связать с естественными причинами. Анализ как наблюдательных данных по изменению солнечной активности, интенсивности космических лучей и климатических характеристик, так и данных, получаемых из косвенных источников в природных архивах (кольца деревьев, слои льда, сталактиты и т.д.) об изменении этих природных явлений на временных масштабах в десятки-сотни-тысячи лет, даёт убедительное доказательство влияния на климат солнечной активности, о чём свидетельствуют анализ связи между реконструкциями солнечной активности в прошлом и косвенными данными климатической изменчивости (напр., [1]). В то же время экспериментальные данные по изменению интенсивности солнечного излучения имеют короткое время наблюдений и показывают относительно небольшие его изменения, что вызывает у скептиков негативное отношение к этому механизму влияния на климат. В последние годы разрабатывается теория непрямого солнечного воздействия на климат, связанная с усиливающим ее воздействием на климат потоком галактических космических лучей (ГКЛ), непрерывно бомбардирующих земную атмосферу (напр., [2]), и являющихся основным источником ионизации нижней атмосферы Земли [3].

Потоки ГКЛ, приходящие в земную атмосферу, модулируются и рассеиваются не только гелиомагнитными полями, но зависят и от параметров земного магнитного поля. Примечательно, что геомагнитное поле из-за изменений в дипольном моменте Земли по-разному экранирует поток ГКЛ, поступающий в низкие и высокие широты: максимально – на низких широтах и минимально – на высоких широтах. Как отмечено в работе [4], выпадение осадков на низких широтах представляет собой параметр климата, который близко связан с процессами в атмосфере, и который чувствителен к изменениям в потоке ГКЛ, модулируемом изменениями дипольного момента. Поэтому важно учитывать региональные эффекты космических лучей.

Для выяснения причинно-временной связи между изменением климата на различных временных масштабах и факторами, влияющими на это изменение, включая геомагнитный фактор, необходимо всестороннее изучение источников, содержащих климатическую информацию, с позиций различных научных дисциплин, связанных с изучением климата, и, в первую очередь, с позиций специалистов по изучению геомагнитного поля, поскольку изменение напряженности и направления геомагнитного поля влияют на скорости образования космогенных нуклидов.

<sup>1</sup>В.А.Дергачев поддерживается РФФИ, гранты 09-02-00083, 10-05-00083

<sup>2</sup>О.М.Распопов поддерживается РФФИ, грант 10-05-00083

В данной работе основное внимание уделяется анализу и сравнению данных высокого разрешения по изменению земного магнитного поля, интенсивности галактических космических лучей, климата на временной шкале, не превышающей примерно 10 тысяч лет. При этом основное внимание, кроме температуры, уделяется климатическому параметру – выпадению осадков на низких широтах.

## 1. Воздействие магнитного поля Земли на космические лучи и климат

Резкое повышение глобальной температуры на поверхности Земли с конца 19-го столетия стимулировало увеличение интереса к пониманию механизмов изменения климата, связанных с множеством естественных явлений. Как антропогенный фактор этого возможного потепления, так и отдельные естественные факторы, влияющие на климат, имеют трудности в объяснении наблюдаемой картины. Тем не менее, в настоящее время нельзя пренебречь ни одним фактором без тщательного исследования. До сих пор в целом магнетизм редко включается в доказательство для связей его с климатом.

Подобно солнечной модуляции ГКЛ, поток ГКЛ также модулируется магнитным полем Земли, поэтому представляет интерес тщательно изучить потенциальную связь между изменениями характеристик магнитного поля Земли и климатом на различных по длительности временных шкалах, что позволит разделить эффекты солнечного и геомагнитного воздействия на климат. Кроме прямых измерений характеристик магнитного поля на магнитных обсерваториях, данные об изменении поля получают с помощью археомагнитных и палеомагнитных методов. В косвенных данных одной из основных проблем является уменьшение точности временной привязки палеомагнитных данных по мере углубления в прошлое.

До недавнего времени основное внимание к влиянию геомагнитного поля Земли на климат было сосредоточено на вариациях дипольного момента Земли на климат в прошлом (напр., [5]). Имеющиеся к настоящему времени данные по изменению солнечной активности, записанной в данных концентрации космогенных нуклидов (вариации  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$ ) в хорошо датированных природных архивах (кольца деревьев, слои льда, слои сталактитов и сталагмитов) для последних 10 тысяч лет имеют временное разрешение от года до 10-20 лет. Данные же по изменению дипольного момента Земли на 10-тысячелетнем интервале из-за неопределенностей в определении возраста исследуемых образцов группируют во временные окна от 500 лет для первых 4-5 тысяч лет от современности и 1000 лет – для последующих временных интервалов. Сопоставление данных по изменению концентрации  $^{14}\text{C}$  (Рис. 1а) и  $^{10}\text{Be}$  (Рис.1б) с изменением дипольного момента (Рис.1в,г,д –шкалы инвертированы) показывает одинаковые долговременные тенденции в их изменениях.

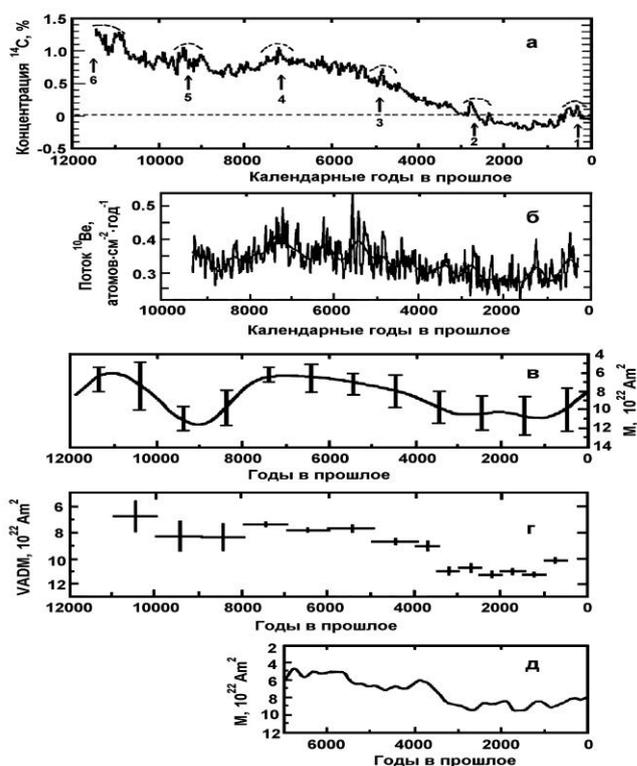


Рис. 1. Сравнение изменений во времени:

а) концентрации радиоуглерода в образцах колец деревьев известного возраста по 10-20 лет [6], стрелками указаны наиболее значительные повышения;

б) потока бериллия-10, полученного из слоев льда в шапках Гренландии [7];

в) сглаженные данные об изменении магнитного момента Земли [8], вертикальные линии указывают на неопределенность данных;

г) данных по изменению VADM по результатам работы [9];

д) оценки для геомагнитного дипольного момента, основанные на сферическом гармоническом анализе для последних 7000 лет [10].

Фактически систематические измерения магнитного поля Земли, как и глобальной температуры, имеют одинаково короткую временную шкалу, всего около 150 лет, и напряженность поля уменьшается со временем. Магнитные полюса испытывают колебания от года к году. Магнитное поле Земли влияет на

скорости переноса энергии от солнечного ветра к атмосфере земли, а движение полюсов изменяет географическое распределение галактических и солнечных космических лучей. В аннотации статьи [11] указано на анализ вариаций в температуре и положениях магнитных полюсов Земли с 1900 г. до настоящего времени и установление сильных корреляций, предполагающих связь между ними. Однако физический механизм такой связи пока не ясен.

Систематические археомагнитные исследования, проводимые в последние десятилетия на археологических материалах, позволили получить детальные кривые вариаций направления и археонапряженности магнитного поля в отдельных регионах, позволяющие восстанавливать главные региональные особенности вариаций напряженности геомагнитного поля продолжительностью в десятки-сотни лет в течение прошедших 2-3 тысячелетий. Анализ наборов данных для Франции, проведенный в работе [12], показал повторяющиеся систематические совпадения резких вариаций направления и максимумов напряженности в ~800 г. до н.э., ~200 г., ~800 г., ~1400 г., и возможные – в ~500-600 гг. и ~1600 г., названные «археомагнитными джерками». Интересно, что доказательство для первых четырех археомагнитных джерков получено по результатам археомагнитных исследований в Корее [13].

Совпадение джерков поднимает важный вопрос о глобальном или региональном их характере. Примечательно, что в работе [12] установлено и повторяющееся временное совпадение археомагнитных джерков с похолоданиями, продолжительностью в несколько десятков лет, в Северной Атлантике и Восточной Европе, что может быть связано с влиянием изменения морфологии геомагнитного поля на поток ГКЛ, взаимодействующий с атмосферой. Источник этих джерков ещё остаётся не ясным. Недавно авторы [14] установили, что археомагнитные джерки, по-видимому, связаны с некоторой динамикой на поверхности ядра Земли от средних к высоким широтам в северном полушарии. В работе [15] по результатам исследования происхождения археомагнитных джерков на шкале трёх последних тысячелетий авторы пришли к выводу, что археомагнитные джерки соответствуют эпизодам максимальной асимметрии геомагнитного поля по полушариям, что является важным для объяснений некоторых свойств долговременного изменения магнитного поля. Из поведения исследованного магнитного поля на исторической шкале авторы интерпретировали эволюцию центра эксцентричного диполя, что в конечном счете, может влиять на путь космических лучей, входящих в атмосферу [4], и археомагнитные джерки в таком случае, могут быть проявлением необычных воздействий на атмосферу космических лучей. Это воздействие может быть сопоставимо, или даже доминировать над солнечным сигналом в средних широтах, укрепляя предположения, что некоторые регионы на земном шаре могут быть особенно климатически чувствительными к изменениям в магнитном поле.

Хотя отдельные климатические ряды данных для последних 10 тысяч лет имеют достаточно высокое пространственной и временное разрешение, сложность климатической системы не позволяет ещё создавать модели, позволяющие объяснить многие особенности изменчивости климата. К каждому новому пониманию некоторых аспектов климатической системы приходится идти от сравнений между получаемыми косвенными рядами климатических данных высокого разрешения и потенциальными факторами, воздействующими на климат, которые зафиксированы в этих данных.

## **2. Магнитное поля Земли, ГКЛ и выпадение осадков на низких широтах**

Горячие дебаты о потенциальной связи между космическими лучами и климатом, как указано выше в ряде работ (напр., [3], [4], [15] и др.), указывает на необходимость дальнейшего исследования этой интересной темы. Палеоклиматические реконструкции высокого разрешения в сталагмитах и сталактитах, полученные к настоящему времени из карстовых пещер, дают ключ к пониманию муссонного выпадения осадков на низких широтах. В первых работах [16, 17 и др.] была установлена связь между солнечной активностью, космическими лучами и событиями талой воды в Северной Атлантике. Поскольку данные из таких пещер позволяют проводить измерение климатических параметров с высокой точностью датирования и надёжностью, стало возможным оценивать время и продолжительность климатических событий на временных шкалах от десятилетий-столетий до тысячелетий.

Учитывая важную роль влияния магнитного поля Земли на поток ГКЛ, попадающий на различные широты, в работе [18] были детально изучены вариации геомагнитного дипольного момента в течение последних ~10 тысяч лет, основываясь на данных напряженности поля исключительно из обожженных археологических материалов и потоков лав, т.е. материалов, не подверженных климатическим смещениям. Для того, чтобы изучать потенциальную связь между геомагнитным дипольным моментом и климатом, рассмотрим данные измерения  $\delta^{18}\text{O}$  высокого разрешения, собранных в пещерах в окрестности океана и характеризующих выпадения осадков на низких широтах: сталагмит Q5 из пещеры Qunf в южном Омане (17°10'N, 54°18'E [17]) и сталагмит DA из пещеры Dongge в южном Китае (25°17'N, 108°5'E [19]; Оба набора данных основаны на корреляциях к ГКЛ, основанных на скорости образования  $^{14}\text{C}$ , т.е. на корреляции с солнечной активностью. Следует заметить, что, как было отмечено в работе [4], наблюдаемая связь между ГКЛ и облачным покрытием наиболее сильна в низких широтах, и как

результат этого, на низких широтах должны быть более высокие концентрации водяного пара в земной атмосфере. Важно также подчеркнуть для установления связи между геомагнитным полем и выпадением осадков, что поток ГКЛ на низких широтах максимально заэкранирован геомагнитным полем. К сожалению, данные по геомагнитному дипольному моменту ограничены, главным образом, из-за недостаточного охвата данных по напряженности поля по широте.

На рис. 2 сравнены реконструкции а) геомагнитного дипольного момента [18] и данные измерений концентрации  $^{18}\text{O}$  из б) сталагмита пещеры Qunf, южный Оман [17] и в) сталагмита пещеры Dongge, южный Китай [19]. Для сравнения данные как по концентрации  $^{18}\text{O}$ , так и изменениям дипольного момента были сгруппированы и усреднены в окнах по одинаковой процедуре. Опираясь на скользящие окна для изменения геомагнитного дипольного момента в 500 лет для 4000-летнего интервала от современности и 1000 лет для данных после 4000 лет, авторы [20] установили высокие коэффициенты корреляции между сталактитовыми данными  $\delta^{18}\text{O}$  в пещерах южного Омана и южного Китая на первых 5 тысячах лет от современности, соответственно 0.83 и 0.87. Оказалась высокой и корреляция между изменениями в выпадении осадков и дипольным моментом на разрешении масштаба столетия (рис. 2б и 2в), соответственно 0.81 и 0.86. Чтобы понять, влияет ли инсоляционный тренд на выпадение муссонных осадков, он вычитался из данных на рис. 2б и 2в, используя летнюю (июнь-июль) инсоляцию на  $30^\circ$  с.ш. [21]. Правда, при этом возникает вопрос: а может ли орбитальная инсоляция контролировать выпадение осадков на тысячелетней шкале? Коэффициент корреляции для столетнего окна для данных из пещеры южного Китая на 5000-летнем интервале оказалась высокой, 0.71. Для пещеры из южного Омана корреляция здесь была высокой на первых 1500 лет, после которых следует разрыв в данных. При этом, при увеличении дипольного геомагнитного момента уменьшается выпадение муссонных осадков (стрелки на рис. 2а и 2б).

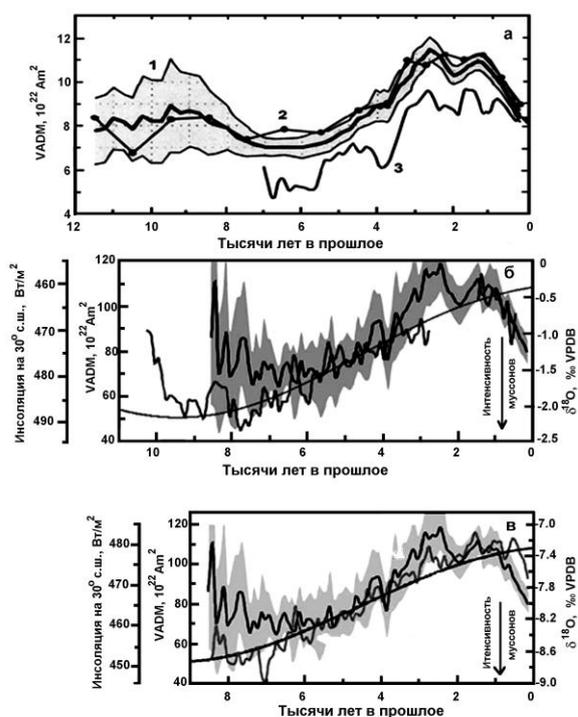


Рис. 2. Сравнение между

а) реконструкциями дипольного момента - 1 [18], 2 [9], 3 [10] (заштрихованная область –  $2\sigma$  оценка ошибки для данных [18]). VADM (центральная сплошная линия) определялся путем усреднения данных по напряженности поля окнами 500 лет в прошлое до 4000 лет от современности и 1000 лет после 4000 лет;

б) измеренными концентрациями  $\delta^{18}\text{O}$  в сталагмите из пещеры Qunf, южный Оман [17]. На временном интервале 0-5000 лет коэффициент корреляции между  $\delta^{18}\text{O}$  магнитным моментом  $M_r = 0.81$ .

в) измеренными концентрациями  $\delta^{18}\text{O}$  в сталагмите из пещеры Dongge, южный Китай [19]. На временном интервале 0-5000 лет коэффициент корреляции между  $\delta^{18}\text{O}$  магнитным моментом  $M_r = 0.86$ .

Плавными кривыми на рис. 2б и 2в на данные  $\delta^{18}\text{O}$  наложены вариации инсоляции на  $30^\circ$  с.ш. в летние месяцы: июнь, июль, август.

Из рис. 2 следует, что при уменьшении напряженности магнитного поля увеличивается поток ГКЛ и увеличивается интенсивность муссонов, что может быть следствием различий солнечной и геомагнитной модуляции ГКЛ.

Долгосрочное уменьшение в выпадении осадков на низких широтах, наблюдаемое в представленных данных, находится в хорошем соответствии с результатами новых работ (напр., [22, 23]).

## Заключение

Проблема заметного изменения климата в последние сотни лет поднимает вопрос возможности взаимодействия между климатом и геомагнитным полем на масштабах времени от десятилетий до сотен и более лет. Магнитное поле Земли изменяется очень динамично. Анализ данных между изменениями магнитного момента Земли в течение последних  $\sim 10$  тыс. лет и косвенными данными по выпадению осадков на низких широтах, представленных выше, и новых результатов, полученных к настоящему времени и не включенных в данную работу, показывает, что изменения во времени геомагнитного дипольного момента могут играть важную роль в контроле выпадения осадков в низких широтах в

некоторых регионах земного шара. В целом, эти результаты свидетельствуют в пользу ранее выдвинутой Свенсмарком гипотезы о сильном влиянии галактических космических лучей, проникающих в атмосферу, на климат Земли. Таким образом, геомагнитное поле через эти процессы в земной атмосфере могло оказывать влияние на изменение климата Земли в прошлом. Конечно, мы ещё не понимаем всех аспектов этой сложной проблемы.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ: 09-02-00083, 10-05-00129 и Программы ОФН РАН «Плазменные процессы в солнечной системе» (VI-15).

## Список литературы

- [1] *Lohman G. Rimbu G.N., Dima M.* Climate signature of solar irradiance variations: analysis of long-term instrumental, historical and proxy data. // *Int. J. Climatol.* 2004. V. 24. P. 1045–1056.
- [2] *Scherer K, Fichtner H., Borrmann N. et al.* Interstellar-terrestrial relations: variable cosmic environments, the dynamic heliosphere, and their imprints on terrestrial archives and climate. // *Space Science Reviews.* 2006. V. 127. P. 327-465.
- [3] *Kirkby J.* Cosmic rays and climate. // *Surveys in Geophysics.* 2007. V. 28. P. 333-375, doi:10.1007/s10712-008-9030-6.
- [4] *Usoskin I.G., Korte M., Kovaltsov G.A.* Role of centennial geomagnetic changes in local atmospheric ionization. // *Geophysical Research letter.* 2008. V. 35, L05811, doi: 10.1029/2007GL033040.
- [5] *Дергачев В.А., Думрпиев П.Б., Распопов О.М., Юнгнер Х.* Вариации потоков космических лучей, модулированные солнечным и земным магнитными полями и климатические изменения. Часть I: Временной интервал до 10000-12000 лет назад (эпоха голоцена). // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2006. Т. 46(1). С. 123-144.
- [6] *Stuiver M., Raimer R.J., Braziunas T.F.* High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples // *Radiocarbon.* 1998. V. 40(3). P. 1127-1151.
- [7] *Vonmoos M., J. Beer J., R. Muscheler R.* Large variations in Holocene solar activity: constraints from <sup>10</sup>Be in the Greenland Ice Core Project ice core. // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. A10105, doi:10.1029/2005JA011500.
- [8] *Teanby N., Gubbins D.* The effects of aliasing and lock-in processes on paleosecular variation records from sediments // *Geophys. J. Int.* 2000. V. 142. P. 563-570.
- [9] *Yang S., Odah H., Shaw J.* Variations in the geomagnetic dipole moment over the last 12000 years. // *Geophysical Journal International.* 2000. V. 140. P. 158–162.
- [10] *Korte M., Constable C.* The geomagnetic dipole moment over the last 7000 years - new results from a global model. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. V. 236. P. 348–358.
- [11] *Kerton A.K.* Climate change and the Earth's magnetic poles, a possible connection. // *Energy & Environment.* 2009. V. 20(1-2). P. 75-83.
- [12] *Gallet Y., Genevey A., Fluteau F.* Does Earth's magnetic field secular variation control centennial climate change? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. V. 236. P. 339–347.
- [13] *Yu Y., Doh S.-E., Kim W. et al.* Archaeomagnetic secular variation from Korea: Implication of the occurrence of global archaeomagnetic jerks. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010. In press.
- [14] *Dumberry M., Finlay C.C.* Eastward and westward drift of the Earth's magnetic field for the last three millennia. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. V. 254. P. 146–157.
- [15] *Gallet Y., Hulot G., Chulliat A., Genevey A.* Geomagnetic field hemispheric asymmetry and archeomagnetic jerks. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009. V. 284. P. 179-186.
- [16] *Neff U., Burns S.J., Mangini A. et al.* Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago. // *Nature.* 2001. V. 411. P. 290–293.
- [17] *Fleitman D., Burns S.J., Manfred Mudelsee M. et al.* Holocene Forcing of the Indian Monsoon in a Stalagmite from Southern Oman. // *Science.* V. 300. P. 1737–1739.
- [18] *Knudsen, M.F., Riisager, P., Donadini, F. et al.* Variations in the geomagnetic dipole moment during the Holocene and the past 50 kyr: *Earth and Planetary Science Letters*, 2008. V. 272. P. 319–329.
- [19] *Wang Y.J., Cheng H., Edwards R.L. et al.* The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. // *Science.* 2005. V. 308. P. 854–857.
- [20] *Knudsen M., Riisager P.* Is there a link between Earth's magnetic field and low-latitude precipitation? // *Geology.* 2009. V. 37. p. 71-74.
- [21] *Berger A.L.* Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes. *J. Atmosph. Sci.* 1978. V. 35. P. 2362–2367.
- [22] *Cai Y., Tan L., Cheng H. et al.* The variation of summer monsoon precipitation in central China since the last deglaciation. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010. V. 291. P. 21–31.
- [23] *Griffiths M.I., Drysdale R.N., Michael K., Gagan M.K. et al.* Evidence for Holocene changes in Australian–Indonesian monsoon rainfall from stalagmite trace element and stable isotope ratios. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010. V. 292. P. 27–38.