УДК 551.461.8 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(1).5

ГЕОМАГНЕТИЗМ И БИОРАЗНООБРАЗИЕ В ФАНЕРОЗОЕ

М.С. Бараш

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: barashms@yandex.ru
Статья поступила в редакцию 13.02.2018, одобрена к печати 26.04.2018

Влияние изменений геомагнитного поля на эволюцию организмов является многосторонним. Понижение напряженности поля увеличивает космическое облучение поверхности Земли, что может активизировать мутагенез, ведущий к видообразованию. Поскольку выявляется корреляция напряженности геомагнитного поля с составом атмосферы, температурой, климатом, вулканизмом и другими условиями среды, предполагается его воздействие на эволюционные процессы в составе общего комплекса влияющих факторов. Источник геомагнитного поля находится у границы ядро-мантия, т.е. в той же области, где располагаются источники плюмообразования и, соответственно, вулканизма. Это объясняет корреляцию их изменений. Активизация импакт-событий в близких временных интервалах может быть объяснена воздействием тех же внешних по отношению к Солнечной системе факторов – галактических приливных сил или потоков темной материи при пересечениях Солнечной системой плоскости Млечного пути. Массовые вымирания вызываются совокупным воздействием вулканизма, импакт-событий и геомагнитных изменений.

Ключевые слова: геомагнетизм, эволюция, импакт-события, вулканизм, массовые вымирания

Разнообразие организмов на Земле в течение эволюции возрастало, пока не достигло современного уровня. Однако этот процесс не был постепенным. Он прерывался многочисленными эпизодами вымираний, когда в силу изменений условий среды некоторая часть организмов погибала и биоразнообразие сокращалось. Несколько вымираний были глобальными и катастрофическими, когда погибало более 70% биоты. Это так называемые «великие массовые вымирания». В течение фанерозоя (542 млн л.) выделяется пять таких событий: ордовикское (445 млн л.н.), девонское (две фазы: 372 и 359 млн л.н.), пермское (251 млн л.н.), триасовое (200 млн л.н.) и меловое (65.5 млн л.н.). Наиболее катастрофическое имело место на рубеже палеозоя и мезозоя, в конце пермского периода, когда вымерло около 95% морских организмов.

При вымираниях сокращалось как общее количество организмов, так и их видовое разнообразие, количество таксонов. Выжившие формы давали эволюционное начало новым таксонам. При благоприятных условиях возрастало и обилие организмов. Происходила смена комплексов, отразившаяся в палеонтологической летописи. В зависимости от масштаба изменений выделяются геохронологические подразделения разного масштаба, от крупнейших (эры) до мелких (биозоны), со-

ставляющие иерархическую шкалу. Кроме того, в геологических разрезах наблюдаются временные уровни появления, вымирания или массового развития отдельных видов организмов, так называемые «датировочные уровни» (от datum level – уровень отсчета). Они отражают минимальные эволюционные изменения.

Многочисленными исследованиями последних десятилетий показано, что великие массовые вымирания происходили, когда на фоне подходящей палеогеографической ситуации (взаиморасположения материков и океанов) имели место мощные вулканические извержения, которые в том же или близком временном интервале сочетались с бомбардировкой Земли крупными астероидами или кометами (импакт-событиями) (Бараш, 2013, 2015).

В результате гигантских базальтовых излияний, которые создавали обширные и мощные толщи траппов, происходили гибельные для биоты изменения среды. Так, в конце пермского периода, около 250 млн л.н., произошло извержение сибирских траппов – чередующихся пластов базальтов, вулканических пеплов, иногда с прослойками морских и наземных осадков. При извержении до 4×10^6 км^3 вулканического материала в течение короткого интервала времени (около 0.6 млн л.) большие количества CO_2, SO_2, фтора и хлора должны были выделиться достаточно быстро для разрушения систем атмосферы и биосферы. Выделение вело к глобальному потеплению, SO_2 и сульфатные аэрозоли – к глобальному похолоданию. Извержения вызывали «вулканическую зиму» с глобальным похолоданием из-за аэрозольного экранирования атмосферы частицами пепла, выделением газов и выпадением кислотных дождей, вредных для растений. После главного излияния базальтов следовало «вулканическое лето», задерживая восстановление биоразнообразия и усиливая стратификацию океана. Разложение газогидратов вело к выделению в атмосферу огромных количеств CO_2 и метана, и возникновению очень сильного губительного парникового эффекта. Быстрое глобальное потепление вызвало вредные для биосферы изменения: ослабление апвеллингов, стагнацию океана, падение продуктивности. Этот и другие этапы мощного вулканизма определялись движениями мантийных плюмов, которые инициируются у границы внешнего ядра и мантии и являются элементом динамики внутренних геосфер (рис.1).

Пермские изменения систем Земли начались около 265 млн л.н., когда после 50 млн л. стабильности геомагнитного поля (суперхрон) имело место иллаварское событие изменения полярности (Isozaki, 2009). После него начался длительный период частых изменений геомагнитного поля. Это событие, обусловленное изменениями состояния ядра и мантии Земли, через 5 млн л. проявилось на поверхности Земли серией событий, перечисленных выше.

Интервалы великих массовых вымираний, как правило, характеризуются также импакт-событиями. Так, в конце перми осадки разных регионов содержат свидетельства падения астероидов. Найдены и реальные крупные кратеры: структура Беду диаметром до 200 км на северо-западной материковой окраине Австралии, кратер Арагуайна (Araguainha) диаметром 40 км в Бразилии и др. В Антарктиде на Земле Уилкса по геофизическим данным под толщей льда обнаружен кратер

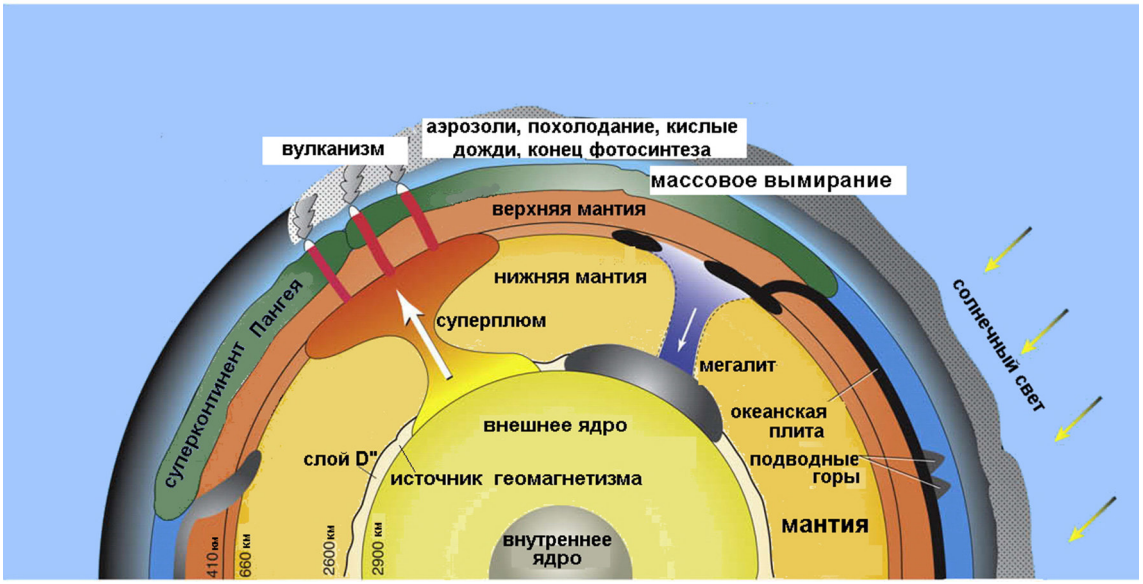

Рис. 1. Условия массового вымирания («вулканической зимы») в конце перми в результате вулканизма (по (Isozaki, 2009), с изменениями).

диаметром около 500 км, отражающий, возможно, крупнейшее импакт-событие в фанерозое (Бараш, 2012).

Удары крупных астероидов, тем более нескольких, произошедших в пределах узкого интервала времени, должны были оказать губительное воздействие на морские и наземные организмы. Последствия импакт-событий сходны с последствиями вулканизма. Происходило понижение освещенности, изменение температуры, кислотные дожди, бушевали пожары. Глобальное распространение облаков пыли, состоящей из частиц пород земной коры, выброшенных из кратера, и материала космического тела, снижало фотосинтез и нарушало всю пищевую цепь. Эффект должен был усиливаться пожарами. При падении астероида в океан выброс в атмосферу водяного пара должен был вызвать парниковый эффект. Удар астероида по карбонатным породам с большим содержанием $CaCO_3$ и $CaSO_4$ увеличивал содержание в атмосфере CO_2 и сернокислых аэрозолей. Это должно было приводить к выпадению кислотных осадков и повышению температуры на несколько градусов.

Не исключена косвенная связь крупных импакт-событий с геомагнетизмом (Muller, Morris, 1986). Импакт вызывает похолодание. В связи с перемещением тропических вод океана в полярные ледниковые щиты понижается уровень моря. Это приводит к более быстрому вращению коры и мантии. Сдвиг скорости в жидком ядре разрушает конвективные ячейки, с которыми связано «электромагнитное динамо» и понижает дипольный момент почти до нулевого значения.

Естественно, кроме упомянутых катастрофических изменений условий среды, происходили изменения других факторов: уровня моря, контуров морских бассейнов, климата, химического состава воды и атмосферы, температуры и гидрологической структуры вод океана и др., которые составляют последовательность соподчиненных явлений. Менее значительные изменения условий среды вызывали меньшие колебания биоразнообразия и количества организмов.

Однако возникновение и развитие жизни на Земле происходили в условиях существования магнитного поля. Оно экранирует Землю от смертоносных космических лучей, от «солнечного ветра», обеспечивает сохранение атмосферы. (Предполагается, что 3.5–4.0 млрд. лет назад объем атмосферы Марса был близок к объему атмосферы Земли, но, по данным изучения изотопов аргона, под действием «солнечного ветра» Марс потерял 80–90% своей атмосферы из-за слабого магнитного поля (исследования Марса зондом НАСА «Мэйвен» (Maven) и марсоходом «Кьюриосити» (NASA, 2017). Геомагнитное поле генерируется во внутренних сферах Земли. По широко принятой так называемой «динамо-модели», дипольный источник геомагнитного поля находится у границы ядро-мантия (слой D).

Состояние поля подвержено изменениям – колебаниям напряженности, перемещениям полюсов, которые фиксируются остаточной намагниченностью минералов в осадках океанов, морей, озер, в лессовых толщах, в лавовых потоках, а также другими признаками. Полюса перемещаются вплоть до смены знака на противоположный (инверсии), когда образуются относительно продолжительные интервалы преимущественно прямой (современной) или обратной полярности (хроны, субхроны). Устойчивые интервалы положительной или отрицательной полярности длительностью в десятки миллионов лет определяются как суперхроны. Кратковременные (обычно 5–10 тыс.лет) отклонения магнитных полюсов от географических на угол больше 40° определяются как экскурсы. Полагают, что во время инверсий и экскурсов происходит существенное уменьшение средней интенсивности дипольного поля до ~25% обычного значения, а в отдельных областях на поверхности Земли оно может вообще временно исчезать (Кузнецов, 2008). Уменьшение интенсивности поля должно вызывать усиление облучения поверхности Земли космическими лучами и способствовать утечке кислорода в космическое пространство. Индикатором такого процесса является бериллий. Поток космических лучей взаимодействует с верхними слоями атмосферы. При бомбардировке атомов азота космическими лучами образуется ^{10}Be. Его концентрация связана с интенсивностью космического облучения. При уменьшении напряженности геомагнитного поля космическое облучение Земли усиливается, концентрация бериллия в атмосфере возрастает, и наоборот. Поскольку бериллий накапливается в осадках, материковых льдах, костях животных, эти колебания фиксируются и могут быть реконструированы. Увеличение концентрации изотопа ^{10}Be в осадочных породах совпадает по времени с интервалами экскурсов и инверсий (Aldahan, Possnert, 2003). Экскурсы коррелируются с другими параметрами условий среды, которые оказывали влияние на эволюционные изменения. Обнаружена корреляция изменений климата и экскурсов геомагнитного поля. Связь между оледенениями и инверсиями проявляется при сравнении изотопно-кислородной кривой, отражающей в основном колебания объема материковых льдов, с событиями изменений геомагнитного поля.

Связаны ли эти изменения с процессами эволюции, с вымираниями и возникновениями таксонов, с колебаниями биоразнообразия, с биотическими катастрофами – великими массовыми вымираниями? Усиление облучения поверхности Земли

космическими лучами может способствовать мутациям и активизировать эволюцию организмов. Однако вопрос о связи изменений геомагнитного поля с эволюцией организмов является дискуссионным. Возможность влияния космического излучения на генетический материал была подтверждена экспериментально (Белишева, 2002). Исследование проводилось во время интенсивной активности вспышек на Солнце в октябре 1989 г. в приполярной области, где геомагнитное поле мало противодействует проникновению излучения. На клеточных структурах была обнаружена корреляция массового слияния клеток с вариациями активности облучения, что, по мнению авторов, показывает процессы реорганизации генетического материала, которые могут приводить к эволюционным изменениям.

Сравнение обширных данных о стратиграфических подразделениях – биозонах, веках и максимумах массовых вымираний биоты в фанерозое с хронологией геомагнитных инверсий привело авторов (Печерский и др., 2010, 2012) к выводу, что непосредственная связь между ними отсутствует, что эволюционное развитие жизни на Земле не зависит от изменений геомагнитного поля. Однако была подтверждена корреляция процессов на поверхности Земли, в частности изменений органического мира с процессами на границе ядро/мантия. Эта связь не причинно-следственная, а является результатом действия общего для этих процессов механизма в глубинных геосферах. Авторы полагают, что согласованность смен геомагнитной полярности и границ биозон логично связать с длительными изменениями скорости вращения мантии Земли и угла наклона оси вращения относительно внутреннего ядра

Однако имеются основания для противоположной точки зрения. Великие массовые вымирания морской биоты, когда биоразнообразие сокращалось на 70–95%, показывают сложные связи с изменениями геомагнитного поля. Великим вымираниям фанерозоя предшествуют три геомагнитных суперхрона. Меловой суперхрон положительной полярности (Cretaceous Long Normal Superchron) продолжительностью около 35 млн л. имел место перед мел-палеогеновым вымиранием. Пермский суперхрон обратной полярности (Permian Kiaman Long Reversed Superchron) продолжительностью около 50 млн л. предшествовал пермо-триасовой катастрофе. Ордовикский суперхрон обратной полярности (Ordovician Moyero Long Reversed Superchron) продолжительностью около 30 млн л. был перед великим вымиранием в конце ордовика.

Великие массовые вымирания ассоциируются с крупнейшими трапповыми излияниями базальтов. Вымирания происходили через 10–20 млн л. после суперхронов (Courtillot, Olson, 2007). Авторы предполагают, что на оба эти явления влияли изменения конвекции мантийного вещества, которые индуцировали пространственно-временные вариации теплового потока на границе ядра и мантии. Частота инверсий геомагнитной полярности была высокой при высоком тепловом потоке и низкой при пониженном. Термальная нестабильность мантии повышает тепловой поток, приводит к завершению магнитных суперхронов и генерирует мантийные плюмы. Поднимающиеся плюмы вызывают на поверхности Земли трапповые излияния базальтов, климатические изменения и вымирания биоты.

Какова же причина корреляции изменений геомагнитного поля и активности вулканизма? Предполагается, что непосредственно над границей ядро/мантия на глубине 2600–2900 км располагается слой D. Из него поднимается мантийный суперплюм, который уравновешивает по массе нисходящий холодный плюм или мегалит – погружающуюся океаническую плиту (Isozaki, 2009). Таким образом, согласно этим представлениям, движения в активном мантийном слое D, расположенном у границы ядро/мантия, инициируют как вулканизм, так и изменения геомагнитного поля. Проявления их на поверхности Земли могут не совпадать по времени, но важно подчеркнуть единый их источник и единую причину активизации.

Массовые вымирания коррелируются с увеличением частоты инверсий и с падением концентрации кислорода. Потеря кислорода земной атмосферой в интервалах частых и многократных инверсий было показана моделированием событий на рубеже триаса и юры, когда концентрация кислорода в атмосфере снизилась с 23% до 14% (Wei et al., 2014). Утечка кислорода была одним из существенных факторов вымираний. Такие интервалы повышенной частоты инверсий наступали после длительных суперхронов однонаправленного поля.

Так, пермский суперхрон обратной полярности завершился иллаварским событием прямой полярности и последовавшим периодом частых изменений геомагнитного поля. Резко снизилось содержание кислорода в атмосфере (рис. 2), на рубеже перми и триаса произошло наиболее катастрофическое великое массовое вымирание.

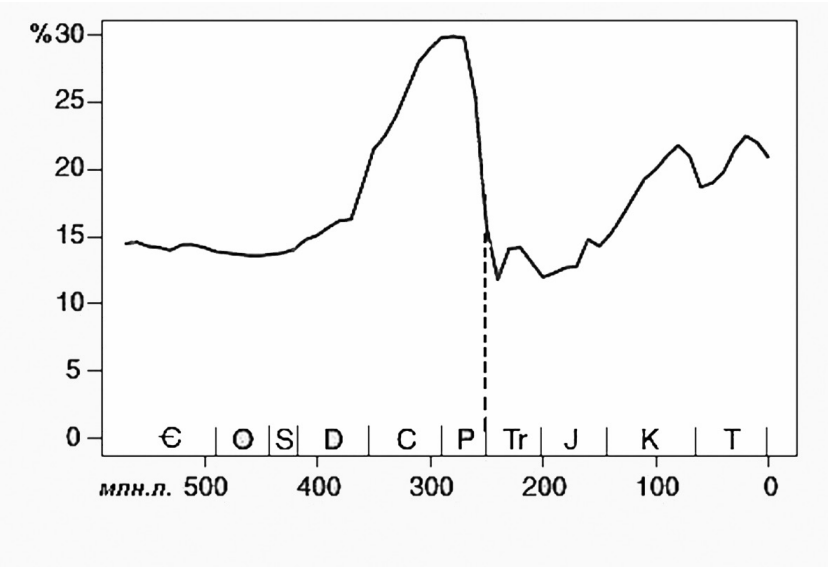

Рис. 2. Изменение концентрации O_2 (%) в атмосфере Земли в течение фанерозоя (по (Berner, 2002), с изменениями). На шкале времени расположены стандартные символы геологических периодов. Вертикальная штриховая линия на рубеже перми и триаса показывает резкое падение концентрации кислорода во время великого массового вымирания.

Связь небольших эволюционных изменений с изменениями геомагнитного поля была выявлена при исследовании распределения «датировочных уровней» в составе океанского микропланктона на протяжении 2 млн л. (Бараш, 1984) (рис. 3). В составе массовых групп микропланктона, скелетные остатки которых сохраняются в отложениях океана (фораминиферы, кокколитофориды, диатомеи, радиолярии), было выявлено более 140 датировочных уровней. Их количественное распределение на хронологической шкале с шагом 0,1 млн л. показывает связь с изменениями геомагнитного поля. Три максимума соответствуют началу интервалов прямой полярности (Олдувей – 23 уровня, Харамильо – 12 уровней и Брюнес – 17 уровней). После максимума, приуроченного к началу Олдувея, количество датировочных уровней последовательно сокращается и в середине периода обратной полярности между субхронами Олдувей и Харамильо (1.4–1.2 млн л.н.) опускается до минимума (2 уровня). Другой минимум (2 уровня) отмечается также в период обратной полярности (0.9–0.8 млн л.н.) между субхроном Харамильо и хроном Брюнес.

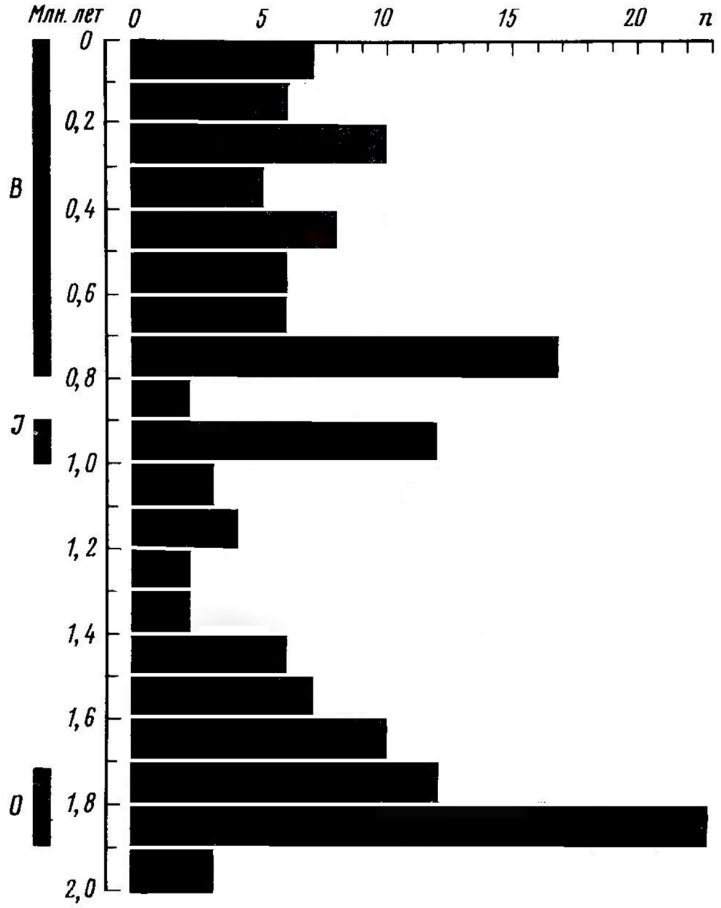

Рис. 3. Количественное распределение датировочных уровней океанского микропланктона в течение 2.0 млн л. (по (Бараш и др.,1984), упрощено): n – число уровней; интервалы положительной геомагнитной полярности: B – Брюнес, J – Харамильо, O – Олдувей.

Заключение. Таким образом, влияние изменений геомагнитного поля на эволюцию организмов является многосторонним. Понижение напряженности поля увеличивает космическое облучение поверхности Земли, что может активизировать мутагенез, ведущий к видообразованию. Кроме того, поскольку выявляется корреляция напряженности геомагнитного поля с составом атмосферы, температурой, климатом, вулканизмом и многими другими условиями среды, можно предположить его воздействие на эволюционные процессы в составе общего комплекса влияющих факторов.

Причиной земных изменений является, вероятно, возбуждение мантийной активности при периодических пересечениях Солнечной системой плоскости Млечного пути (Gillman, Erenler, 2008; Rampino, 2015). Пересечения Землей скоплений темной материи в плоскости Галактики могут приводить к нагреву внутренних сфер планеты. Источник геомагнитного поля находится у границы ядро-мантия, т.е. в той же области, где располагаются источники плюмообразования и, соответственно, вулканизма. Периодическая активизация обоих процессов, согласно этим представлениям, вызывается единой внешней причиной. Поэтому корреляция изменений геомагнитного поля и активности вулканизма представляется закономерной.

Рис. 4. Взаимосвязь космических и земных процессов, влияющих на биоразнообразие и вызывающих массовые вымирания.

Активизация импакт-событий в близких временных интервалах может быть объяснена воздействием тех же внешних по отношению к Солнечной системе факторов – галактических приливных сил или потоков темной материи при вертикальных осцилляциях Солнечной системы и пересечениях плоскости Млечного пути. При этом могут изменяться орбиты комет и астероидов, составляющих облако Оорта, что может приводить к их падению на Землю и оказывать вредное влияние на биоразнообразие.

Таким образом, общая первопричина, которая находится вне пределов Солнечной системы, объясняет корреляцию изменений геомагнитного поля с активизацией импакт-событий, вулканизмом и тектоническими движениями, которые в совокупности вызывают изменения условий среды и приводят к массовым вымираниям . Изменения геомагнитного поля являются элементами сложной системы изменений среды (вулканизма, климата, последствий импакт-событий и др.), которые приводят к вымираниям и стимулируют эволюцию (рис. 4).

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (темы № 0149-2014-0027 и № 0149-2018-0016) при частичной поддержке программы № 0149-2015-0042.

Литература

Бараш М.С. Массовая гибель организмов океана на рубеже палеозоя и мезозоя: следствия и причины // Океанология. – 2012. – Т. 52. – № 2. – С. 258–269.

Бараш М.С. Взаимодействие причин массовых вымираний биоты в фанерозое // Океанология. – 2013. – Т. 53. – № 6. – С. 825–837.

Бараш М.С. Причины катастрофических массовых вымираний в фанерозое. – Saarbrüken: Lambert Academic Publishing, 2015. – 143 с.

Бараш М.С., Дмитренко О.Б., Казарина Г.Х., Кругликова С.Б., Мухина В.В. Стратиграфия четвертичных отложений океанов // 27 Междунар. геол. конгресс. Четвертичная геол. и геоморфология. Секция С.03: Доклады. – Т. 3. – М.: Наука, 1984. – С. 36–48.

Белишева Н.К., Гак Е.З. Значение вариаций космических лучей для функционирования биосистем // Сб. науч. докл. VII Межд. конф. Экология и развитие севера-запада России. – СПб., 2002. – С.118–129.

Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. – Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Беринга, 2008. – 336 с.

Печерский Д.М., Гурарий Г.З., Щербаков В.П. Геомагнитное поле и эволюция жизни на Земле // Земля и Вселенная. – 2010. – № 4. – С. 50–60.

Печерский Д.М., Гурарий Г.З., Щербаков В.П. К вопросу о согласованности изменений биоты и полярности геомагнитного поля в фанерозое // Физика Земли. – 2012. – № 1. – С. 44–62.

Aldahan A., Possnert G. Geomagnetic and climatic variability reflected by 10Be during the Quaternary and late Pliocene // *Geophys*. – 2003. – Vol. 30. – doi: 10.1029/2002GL016077.

Berner R.A. Examination of hypotheses for the Permo-Triassic boundary extinction by carbon cycle modeling // *PNAS*. – 2002. – Vol. 99. – No. 7. – P. 4172–4177. – doi:10.1073/pnas.032095199

Courtillot V., Olson P. Mantle plumes link magnetic superchrons to Phanerozoic mass depletion events // *Earth and Planet*: Sci. Lett. – 2007. – Vol. 260. – P. 495–504.

Gillman M., Erenler H. The galactic cycle of extinction // *Intern. J. Astrobiology*. – 2008. – Vol. 7. – No. 1. – P. 17–26.

Isozaki Y. Integrated «plume winter» scenario for the double-phased extinction during the Paleozoic-Mesozoic transition: The G-LB and P-TB events from a Panthalassan perspective // *Jour. Asian Earth Sc*. – 2009. – Vol. 36. – P. 459–480.

Muller R.A., Morris D.E. Geomagnetic reversals from impacts on the Earth // *Geophysical Res. Lett*. – 1986. – Vol. 13. – N 11. – P. 1177–1180.

NASA. March 30, 2017. Release 17-033. NASA's MAVEN Reveals Most of Mars' Atmosphere Was Lost to Space. https://www.nasa.gov/press-release/nasas-maven-reveals-most-of-mars-atmosphere-was-lost-to-space

Rampino M.R. Disc dark matter in the Galaxy and potential cycles of extraterrestrial impacts, mass extinctions and geological events // *Mon'a\thly Notices of the Royal Astron. Soc.* – 2015. – Vol. 448. – P. 1816–1820.

Wei Y., Pu Z., Zong Q., Wan W., Ren Z., Fraenz M., Dubinin E., Tian F., Shi Q., Fu S., Hong M. Oxygen escape from the Earth during geomagnetic reversals: Implications to mass extinction // *Earth and Planet*: Sci. Lett. – 2014. – Vol. 394. – P. 94–98.

GEOMAGNETISM AND BIODIVERSITY IN THE PHANEROZOIC

M.S. Barash

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: barashms@yandex.ru

Submitted 13.02.2018, accepted 26.04.2018

Keywords: geomagnetism, evolution, impact events, volcanism, mass extinctions

The influence of changes in the geomagnetic field on the evolution of organisms is multifaceted. Lowering of the field strength increases cosmic irradiation of the Earth's surface, which can activate mutagenesis leading to speciation. Since the correlation of the geomagnetic field intensity with the composition of the atmosphere, temperature, climate, volcanism and other environmental conditions is revealed, its effect on the evolutionary processes within the general complex of influencing factors is assumed. The source of the geomagnetic field is at the core-mantle boundary, i.e. in the same area where sources of plume formation and, accordingly, of volcanism are located. The activation of impact events in close time intervals can be explained by the influence of the same factors external to the solar system, such as the galactic tidal forces or the fluxes of dark matter when the solar system crosses the plane of the Milky Way. Mass extinctions are caused by the combined effects of volcanism, impact events and geomagnetic changes.

References

Aldahan A. and Possnert G. Geomagnetic and climatic variability reflected by 10Be during the Quaternary and late Pliocene. *Geophys. Res. Lett.,* 2003, Vol. 30, No. 6.

Barash M.S. Massovaya gibel' organizmov okeana na rubezhe paleozoya i mezozoya: sledstviya i prichiny (Mass Extinction of Ocean Organisms at the Paleozoic–Mesozoic boundary: Effects and Causes). *Oceanology*, 2012, Vol. 52, No. 2, pp. 238–248.

Barash M.S. Vzaimodeistvie prichin massovykh vymiranii bioty v fanerozoe (Interaction of the

Reasons for the Mass Biota Extinctions in the Phanerozoic), *Oceanology,* 2013, Vol. 53, No. 6, pp. 739–749.

Barash M.S. Prichiny katastroficheskikh massovykh vymiranii v fanerozoe (The reasons of catastrophic mass extinctions in the Phanerozoic). Saarbrüken: Lambert Academic Publishing, 2015, 143 p.

Barash M.S., Dmitrenko O.B., Kazarina G.Kh., Kruglikova S.B., and Mukhina V.V. Stratigrafiya chetvertichnykh otlozhenii okeanov (Stratigraphy of Quaternary Oceanic deposits). Proceedings of 27 Mezhdunar. Geol. Kongress, Chetvertichnaya geol. i geomorfologiya, Sektsiya Sekciya 03, Doklady, Vol. 3, Moskva.: Nauka, 1984, pp. 36–48, (27 Int. Geol. Congress. Quaternary Geology and Geomorphology, Section C.03, Reports, Vol. 3, Moscow: Nauka, 1984, pp. 87–108).

Belisheva N.K. and Gak E.Z. Znachenie variatsii kosmicheskikh luchei dlya funktsionirovaniya biosistem (Significance of cosmic rays variations for functioning of biosystems). *Sb. nauchnykh dokladov VII Mezhd. konf. «Ekologiya i razvitie Severo-Zapada Rossii»,* (Proceedings of VII Intern. Conf. «Ecology and development of the North-West of Russia», Reports), Sankt- Peterburg, 2002, pp. 118–129.

Berner R.A. Examination of hypotheses for the Permo–Triassic boundary extinction by carbon cycle modeling. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2002, Vol. 99, No. 7, pp. 4172–4177.

Courtillot V. and Olson P. Mantle plumes link magnetic superchrons to Phanerozoic mass depletion events. *Earth and Planet. Sci. Lett.,* 2007, Vol. 260, pp. 495–504.

Gillman M. and Erenler H. The galactic cycle of extinction. *Intern. J. Astrobiology,* 2008, Vol. 7, No. 1, pp. 17–26.

Isozaki Y. Integrated «plume winter» scenario for the double-phased extinction during the Paleozoic-Mesozoic transition: The G-LB and P-TB events from a Panthalassan perspective. *Jour. Asian Earth Sc.*, 2009, Vol. 36, pp. 459–480.

Kuznetsov V.V. Vvedenie v fiziku goryachei Zemli (Introduction to physics of hot Earth). Petropavlovsk-Kamchatskii: KamGU im. Beringa, 2008, 336 p.

Muller R.A. and Morris D.E. Geomagnetic reversals from impacts on the Earth. *Geophys. Res. Lett.,* 1986, Vol. 13, No. 11, pp. 1177–1180**.**

NASA. March 30, 2017. Release 17-033. NASA's MAVEN Reveals Most of Mars' Atmosphere Was Lost to Space, available at: https://www.nasa.gov/press-release/nasas-maven-reveals-most-of-mars-atmosphere-was-lost-to-space, last updated October 26, 2013; last accessed in October 2017.

Pecherskii D.M., Gurariy G.Z., and Shcherbakov V.P. Geomagnitnoe pole i evolyutsiya zhizni na Zemle (The geomagnetic field and evolution of life on Earth). *Zemlya i Vselennaya,* 2010, No. 4, pp. 50–60.

Pecherskii D.M., Lyubushin A.A., and Sharonova Z.V. K voprosu o soglasovannosti izmenenii bioty i polyarnosti geomagnitnogo polya v fanerozoe (To a question of coherence of biota changes and polarity of the geomagnetic field in the Phanerozoic). *Fizika Zemli*, 2012, No. 1. pp. 44–62.

Rampino M.R. Disc dark matter in the Galaxy and potential cycles of extraterrestrial impacts, mass extinctions and geological events. *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc.,* 2015, Vol. 448, No. 2, pp. 1816–1820.

Wei Y., Pu Z., Zong Q., Wan W., Ren Z., Fraenz M., Dubinin E., Tian F., Shi Q., Fu S., and Hong M. Oxygen escape from the Earth during geomagnetic reversals: Implications to mass extinction. *Earth and Planet. Sci. Lett.,* 2014, Vol. 394, pp. 94–98.