

ИНВЕРСИИ И ЭКСКУРСЫ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ: ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ВИДООБРАЗОВАНИЯ

Обсуждаются факторы, воздействующие на биоту Земли во время экскурсов и инверсий геомагнитного поля. При экскурсах, в отличие от инверсий, после смены полярности геомагнитное поле вскоре восстанавливает прежнюю полярность. Характерными свойствами этих событий, влияющими на биологические объекты, являются продолжительность периода пониженной интенсивности геомагнитного поля, повышение радиационного уровня и изменение климата. Синхронное воздействие на биоту обсуждаемых факторов во время экскурсов и инверсий создает в среде условия, которые обеспечивают либо появление новых видов, либо ему способствующие эволюционные изменения в популяциях организмов.

Ключевые слова: геомагнитное поле; экскурс; инверсия; видообразование.

В настоящее время причины видообразования широко дискутируются и есть данные, что оно происходит скачкообразно под воздействием резко меняющихся условий внешней среды [1, 2]. Используя генетические данные, авторы [1] проверили на пригодность несколько моделей видообразования к описанию так называемого эволюционного дерева – схемы, объединяющей родственными связями различные виды животных и растений. В результате этого анализа оказалось, что имеющиеся данные наиболее хорошо описываются моделью, согласно которой появление нового вида – редкое одиночное явление. Событием, по мнению авторов [1], запускающим образование нового вида, может быть географический барьер, изолирующий часть популяции, или генетический – такой, как хромосомные перестройки. В работе [2] обсуждается механизм, согласно которому при воздействии неблагоприятных условий окружающей среды у эукариот скачкообразно

реализуется ранее накопленная генетическая изменчивость, которая была скрыта благодаря активности белка шаперона HSP90. Эта реализация, по мнению автора, становится возможной, когда количества молекул шаперона перестает хватать для торможения мутаций. Корреляция событий в эволюции фауны и человека с резкими изменениями климата, когда климатические потепления и похолодания вызывают исчезновение одних видов и способствуют появлению новых, лучше адаптированных, рассматривается в [3, 4]. Однако оппоненты считают, что стресс от климатических изменений не дает механизма, согласно которому он мог бы оказывать селективное давление и приводить к появлению нового семейства или вида [5].

Сопоставив известные события в эволюции человека с установленными датами некоторых экскурсов и инверсий геомагнитного поля (ГМП), мы обнаружили их синхронность (табл. 1).

Таблица 1

Сопоставление событий в эволюции человека с экскурсами и инверсиями ГМП

Экскурсы и инверсии, млн лет назад	События в эволюции человека, млн лет назад
Laschamp [6] 0,041	0,042 – мутация гена <i>FOXP2</i> [7], 0,037 – мутация гена микроцефалина [8]
Norwegian – Greenland Sea [6] 0,070	0,070 – разделение предковой популяции на три группы, давших начало трем расам, африканской, монголоидной и европеоидной (по мтДНК) [9]
Blake [6] 0,120	0,1 – возраст общего предка современного человека (по Y-хромосоме) [10]
Pringle Falls [6] 0,211	0,23 – возраст общего предка современного человека (по мтДНК) [10]
Big Lost [6] 0,56–0,58 Stage 17 [6] 0,67 Matuyama – Brunhes [12] 0,78 Brunhes precursor [6] 0,797	0,66 ± 0,14 – разделение линий человека и неандертальцев (по мтДНК) [11]
Olduvai [13] 1,95–1,79	1,8 – появление <i>Homo erectus</i> [14]
Gauss – Matuyama [15] 2,6	2,4 ± 0,3 – мутация, обеспечившая увеличение объема головного мозга представителей линии <i>Homo</i> [16] 2,8 – мутация, инактивировавшая ген, кодирующий наработку сахаразы на поверхности клетки [17]
Gilbert – Gauss [18] 3,62	3,5 – разделение линии человека на грацильную и массивную [19]
Epoch 5 – Gilbert [20] 5,2	~ 5 – разделение линий человека и шимпанзе [21, 22]
Смена полярности [20] 6,90–6,95, 6,98–7,15, 7,18–7,25	~ 7 – разделение линий гориллы и человека [21]

В табл. 1 представлена датировка появления представителей линии *Homo*, а также революционных событий, внесших свой вклад в эволюцию человека. Так, две мутации, найденные у современных людей, произошли во время инверсии Гаусс – Матуяма, они предшествовали увеличению объема мозга у предков человека и появлению *Homo erectus* [17, 16]. Первая из обсуждаемых мутаций [17] инактивировала ген, кодирующий наработку сиаловой кислоты на поверхности клетки, а вторая [16] – ген миозина, в результате кото-

рой произошло значительное уменьшение объема и силы мощных жевательных мышц, характерных для человекообразных обезьян. По мнению авторов работы [16], были ликвидированы анатомические ограничения роста объема черепной коробки и, как следствие, произошло трехкратное увеличение объема головного мозга у представителей линии *Homo*. Творческие способности человека обусловлены мутацией гена *FOXP2* [7], обеспечивающего речевые способности человека, его коммуникабельность, и гена микроцефалина, отвечающего

за объем и строение головного мозга. Возраст этих мутаций близок к экскурсу Laschamp, и именно этим периодом археологи датируют изменения в поведении че-

ловека в виде появления искусства и использовании символов [8]. Эволюционные события фауны синхронны событиям в эволюции человека (см. табл. 2).

Таблица 2

События в эволюции африканской и европейской фауны

События в эволюции африканской и европейской фауны	Млн лет назад
Разделение слонов на африканских и азиатских	5,0 [23]
Разделение африканских слонов на два вида	2,6 ± 0,94 [23]
Разделение семейства африканской коровьей антилопы на виды	5,0; 0,5; 0,4; 0,2; 0,13 [3]
Разделение европейских зябликов на группы	0,06 [24]
Разделение европейских голубых сорок на два вида	0,070 [25]
Разделение африканской <i>Pediculus humanus</i> на два вида	0,070 [26]

В качестве примера приведем также результаты генетических исследований эволюции полярного медведя

[27]. Из схемы (рис. 1) видно, что разделение на виды происходило во время экскурсов и инверсий ГМП.

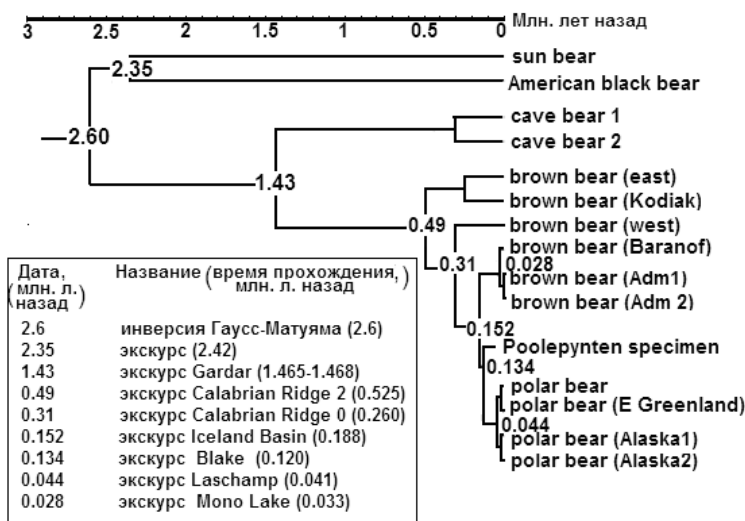


Рис. 1. Корреляция эволюции полярного медведя [27] с экскурсами и инверсиями ГМП

Чтобы понять, можно ли связывать эволюцию жизни с влиянием на биоту экскурсов и инверсий магнитного поля Земли, рассмотрим, какие факторы действуют в эти периоды.

Как известно, экскурсы и инверсии ГМП проходят в условиях пониженной интенсивности геомагнитного поля. По данным работы [28], для экскурса Laschamp установлено десятикратное падение интенсивности геомагнитного поля. Частицы космических лучей (КЛ) ионизируют атомы атмосферы, рождают каскады частиц меньшей энергии и вызывают атмосферные ливни, что приводит к повышению радиационного фона на поверхности Земли. Ранее считалось [29], что толщина атмосферы настолько велика, что повышение радиационного фона на поверхности Земли во время экскурсов и инверсий ГМП практически ничтожно. Это было опровергнуто недавними результатами [30]. В этой работе наблюдения проводились в приполярных областях, где горизонтальная компонента ГМП имеет низкую величину. Во время мощных солнечных вспышек было зафиксировано увеличение радиационного фона на несколько порядков [31]. Этими экспериментами было показано, что вариации КЛ влияют на сопряженность феномена массового слияния клеток. На основании этих данных авторы делают вывод, что поскольку воз-

растание потока космических лучей может радикально менять свойства живых объектов, инициируя в них процессы реорганизации генетического материала, то это может иметь отношение к механизмам эволюции. Обсуждая связь плотности атмосферы с величиной уровня радиации на поверхности планеты во время солнечных вспышек, авторы [31] показали, что плотность земной атмосферы позволяет ожидать биологических эффектов вторичной радиации от проникающего космического излучения во время мощных протонных событий, поскольку более половины площади земной поверхности подвергается воздействию излучения.

В наших оценках радиационного фона во время экскурсов и инверсий мы исходим из того, что с разрушением магнитосферы Земли будет происходить разрушение ее радиационных поясов и высвобождение накопленных в них частиц. Учитывая эти обстоятельства, построим ориентировочную, феноменологическую зависимость радиационной дозы от величины модуля геомагнитного поля B . Энергия частиц, отклоняемых от попадания на Землю геомагнитным полем E (энергия обрезания), примерно пропорциональна величине модуля геомагнитного поля B : $E \sim B$. На заряженную частицу, попадающую в магнитное поле, как известно, действует сила Лоренца $F = Z evB$, равная центробеж-

ной силе mv^2/R , иначе: $mv = Z evR$. Если E – энергия частицы, МэВ; Z – заряд частицы; B – индукция магнитного поля, Тл; R – радиус кривизны траектории частицы, м; e – заряд электрона; v – скорость частицы; m – её масса, то получаем: $E = 300 ZBR$. Принято считать поток КЛ величиной фрактальной. Это означает, что число частиц потока КЛ N , обладающих энергией E : $N_{(E)} \sim E^{-d}$, где $1 < d < 2$; d – фрактальная размерность. И чем меньше величина магнитной индукции, тем частицы меньшей энергии способны преодолевать защитную магнитную оболочку Земли: $E \sim B$. Это соответствует тому, что плотность потока КЛ, попадающего на Землю, возрастает при уменьшении модуля ГМП. Доза ионизирующего излучения D на поверхности Земли определяется плотностью потока частиц J , коэффициентом передачи энергии L и временем действия ионизирующего излучения t : $D = JLt$. Очевидно, что если параметры Lt не меняются, то плотность потока $J \sim N_{(E)}$, следовательно, и $D \sim N_{(E)}$. Поскольку $N_{(E)} \sim E^{-d}$ и $E = 300 ZBR$, то $D \sim B^{-d}$. Эта зависимость показывает, что уменьшение величины интенсивности геомагнитного поля B приводит к росту дозы ионизирующего излучения D . Речь идет пока только об эффекте уменьшения отклонения заряженных частиц при уменьшении величины магнитной индукции Земли. Если учесть, что во время экскурсов и инверсий будут разрушаться радиационные пояса, то поток заряженных частиц на Землю возрастет ещё больше, что приведет к ещё большему возрастанию D .

Фрактальная размерность d , согласно нашей модели, может меняться от 1 до 2. При этом радиационная доза D , в зависимости от величины B , может меняться от $D \sim B^{-1}$ (линия 5 на рис. 2) до $D \sim B^{-2}$ (линия 6). На

рис. 2, на шкале $\lg D$ отмечены три характерных значения дозы: 0,4 мЗв/год – вклад галактического космического излучения [32]; 5 мЗв/год – предельно-допустимая доза для жителей России [33]; ~4 Зв – летальная доза, 50-процентное поражение населения [34].

На рис. 2, справа, показан энергетический спектр КЛ. В нижней атмосфере (тропосфере) радиационные условия практически полностью определяются первичными космическими лучами сравнительно низких энергий (1 – 1 000 ГэВ) и продуктами их взаимодействия с ядрами атомов атмосферы [35. С. 782]. Модулю поля B , равному единице, соответствует энергия КЛ, равная энергии обрезания, примерно в 10 ГэВ [31] и радиационная доза D , равная 0,4 мЗв/год (рис. 2, слева), создаваемая в результате воздействия КЛ. Как видно из рис. 2, уменьшение модуля поля B в два раза обеспечивает повышение радиационной дозы до 5 мЗв. Эта цифра близка к значению радиационной дозы, измеренной в районе Бразильской мировой аномалии (БМА) [36]. Область БМА характеризуется примерно двукратным уменьшением общей интенсивности ГМП по сравнению с районами, примыкающими к БМА [37], и авторы [36] связывают повышение радиационного фона в этом районе с увеличением потока КЛ. При уменьшении модуля ГМП B в десять раз, что характерно, например, для экскурса Laschamp [28], увеличение потока КЛ (галактических, солнечных, частиц из разрушенных радиационных поясов Земли) [38. С. 186]) вызовет увеличение плотности потока частиц КЛ J на несколько порядков, а наведенная радиационная доза D при этом может вырасти на три порядка, что, по данным [31], оказывает существенное воздействие на биологические объекты.

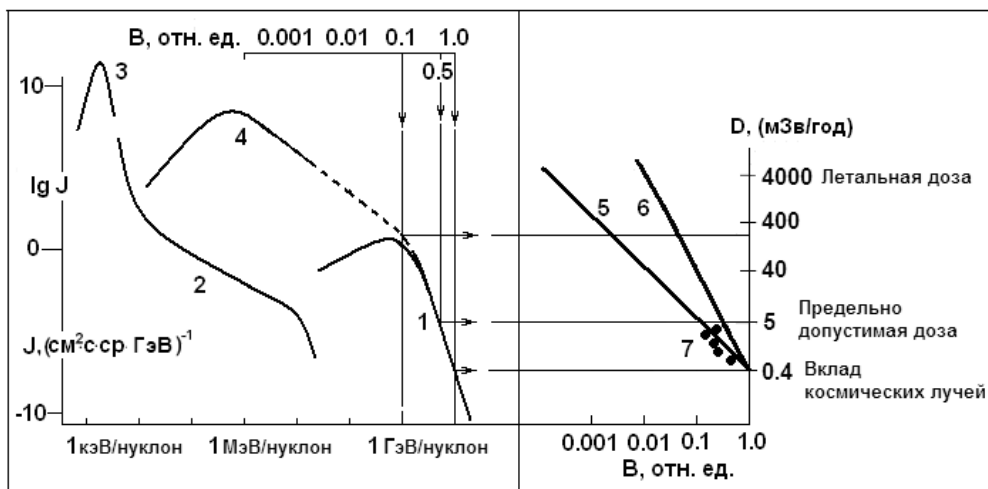


Рис. 2. Плотность потока КЛ J (слева [38. С. 186]) и наведенная ими на поверхности Земли доза D (справа)

в зависимости от энергии КЛ E : 1 – галактические; 2 – солнечные; 3 – солнечный ветер; 4 – частицы из радиационного пояса.

Шкала сверху: величина модуля геомагнитного поля (модуль современного поля $B = 1$), соответствующая энергии обрезания КЛ с энергией E ($B = 1$ соответствует $E = 10$ ГэВ). Справа – увеличение радиационной дозы на Земле (D) при уменьшении модуля поля (B): 5 – зависимость $D \sim B^{-1}$; 6 – зависимость $D \sim B^{-2}$; 7 – экспериментальные данные [39]; 0,4 мЗв/год – вклад галактического космического излучения [32]; 5 мЗв/год – предельно допустимая доза для жителей России [33]; ~4 Зв – летальная доза [34]

Следующим установленным фактором является изменение климата. В работе Пospelовой [40] сопоставлением палеомагнитных и палеоклиматических данных аргументируется различный характер климатических изменений во время экскурсов, однако, по мнению ав-

тора, невозможно объяснить его изменениями прозрачности атмосферы в результате воздействия космических лучей. С другой стороны, есть мнение [41, 42], что в результате усиления ионизирующего воздействия КЛ во время экскурсов должно развиваться похолодание за

счет интенсивного образования облаков, имеющих высокое альbedo. Однако были зафиксированы и потепления, приуроченные к экскурсам. Из тренда уровня мирового океана [43] на рис. 3 видно, что прохождению экскурсов Gothenburg [39], Laschamp [6] и Blake [6] сопутствовало потепление, в это время уровень океана возрастал, а экскурсы Mono Lake [6] и Norwegian-Greenland Sea [6] сопровождалось похолоданиями и падением уровня мирового океана. На врезке рис. 3 представлены кривые относительного содержания изотопа ^{18}O и концентрации радионуклида ^{10}Be в кернах гренландского льда в период экскурса Laschamp [44].

Ход первой кривой показывает изменение температуры, вторая позволяет судить об интенсивности геомагнитного поля, поскольку ^{10}Be является космогенным нуклидом, и скорость его образования определяется потоком КЛ и их модуляцией ГМП. Видно (рис. 3, врезка), что период экскурса Laschamp характеризуется пиками обеих кривых и минимумом интенсивности ГМП (т.е. максимум содержания ^{10}Be) соответствует максимуму температуры (высокие значения δ для изотопа кислорода ^{18}O соответствуют более теплым климатическим условиям) на поверхности Земли, т.е. потеплению.

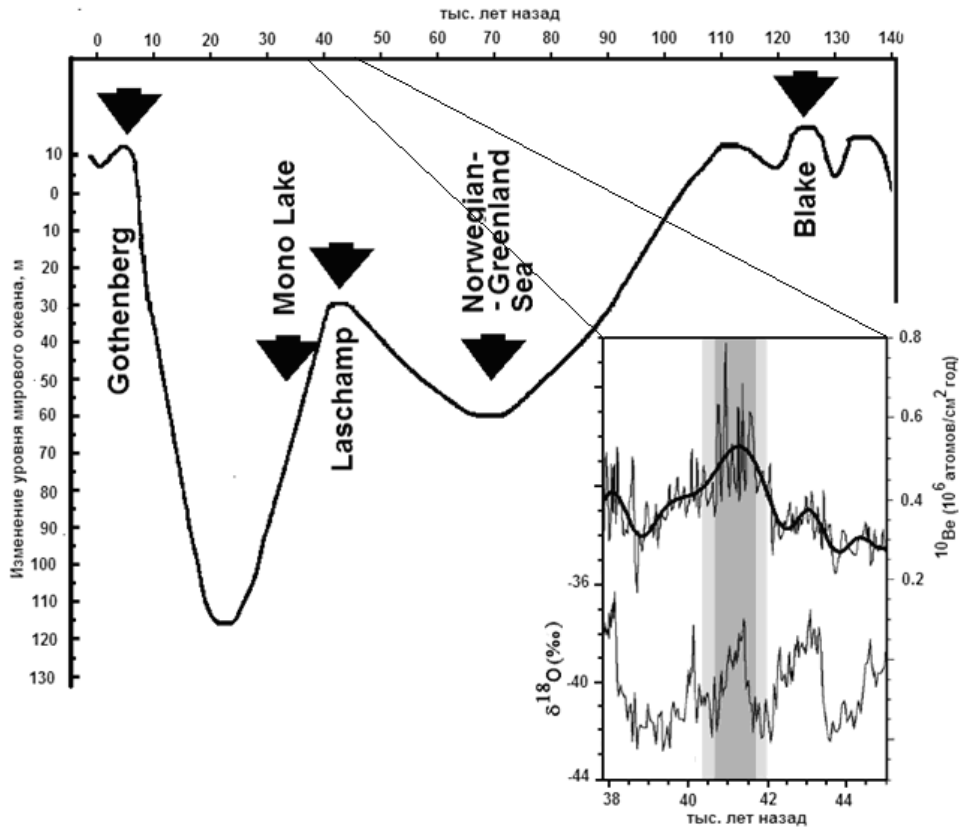


Рис. 3. Изменения климата во время экскурсов Gothenburg, Mono Lake, Laschamp, Norwegian-Greenland Sea и Blake. Кривая представляет изменение уровня мирового океана за последние 140 тыс. лет [43], стрелками отмечено время прохождения экскурсов Gothenburg [40], Mono Lake [6], Laschamp [6], Norwegian-Greenland Sea [6] и Blake [6]. Врезка – характеристика экскурса Laschamp [44] (ширина серой вертикальной полосы показывает продолжительность экскурса), верхняя кривая – изменение содержания ^{10}Be в кернах льда, нижняя – изменение ^{18}O

По нашим предварительным оценкам [45, 46], характер изменения климата, сопровождающего экскурс, определяется оптическими свойствами атмосферы, а именно ее прозрачностью, в период, предшествующий экскурсу, и поэтому в период экскурса или инверсии может развиваться как потепление, так и похолодание. Увеличение плотности потока КЛ на 4–6 порядков в случае запыленной атмосферы вызывает очищение атмосферы за счет коагуляции аэрозольных частиц и последующего их осаждения. Атмосфера становится прозрачной, пропускает солнечную радиацию, что приводит к потеплению климата. Если экскурс начинается в условиях прозрачной атмосферы, которая наблюдается в настоящее время, тогда возросший поток КЛ действует, как ионизирующий агент, генерируя ядра конденсации с образованием аэрозо-

лей, которые отражают солнечное излучение, и развивается похолодание.

Наши оценки получили подтверждение результатами недавних экспериментов в области БМА, где, как сказано выше [37], общая интенсивность поля в два раза ниже, чем в соседствующих регионах. Наблюдаемый эффект похолодания во внутренней области БМА примерно на 18 Вт/м^2 авторы [47] приписывают именно возрастанию интенсивности облачности за счет влияния КЛ. В областях, примыкающих к БМА, в это же время отмечается эффект нагревания [47] примерно на 20 Вт/м^2 . Эти данные подтверждают наши оценки: в условиях прозрачной атмосферыхождение экскурса будет сопровождаться похолоданием, и его степень, по видимому, будет зависеть от интенсивности падения поля. Важным моментом является продолжительность

экскурсов и инверсий. Как видно из рис. 4, период изменения векторных характеристик ГМП значительно короче,

чем вариация интенсивности поля от начала ее падения до восстановления исходного уровня.

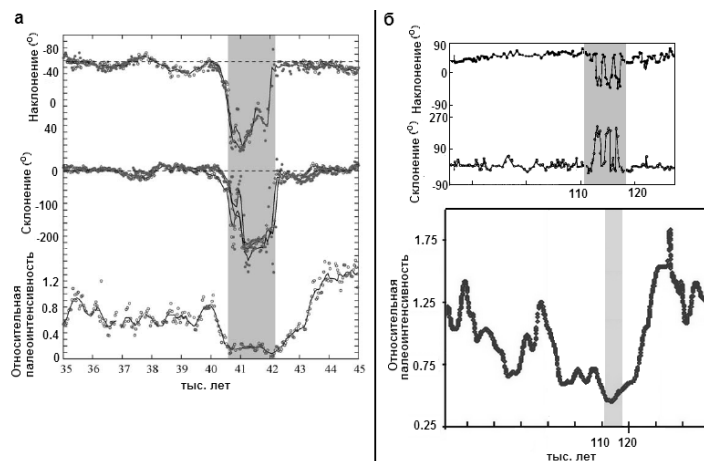


Рис. 4. Характеристика экскурсов Laschamp (а) [48] и Blake (б) [49, 50].

Серыми вертикальными полосами отмечены временные интервалы изменения векторных характеристик ГМП

Так, для экскурса Laschamp (рис. 4) эти характеристики различаются примерно в три раза [48], а для экскурса Blake [49, 50] – почти в десять раз и, следовательно, в условиях пониженной интенсивности поля в период Blake биологические объекты находились около 50 тыс. лет. Казалось бы, отрицательная сторона этого фактора налицо, если иметь в виду повышение радиационного фона и возможное изменение климата в сторону похолодания.

Однако изучение экранирования геомагнитного поля на животных [51] показало, что чем больше уровень экранирования ГМП и длиннее срок нахождения в гипомангнитных условиях, тем выше уровень выживания животных после последующего воздействия летального ионизирующего облучения. На основании этих экспериментов авторы работы делают вывод о радиопротекторном действии гипогеомагнитного поля как о эволюционно закрепленной реакции биологических объектов. Этими же авторами [52] проводились исследования влияния экранирования геомагнитного поля на устойчивость организмов к острому воздействию холодом. Предварительное содержание животных в гипо-

магнитных условиях значительно увеличивало количество выживших животных после последующего острого охлаждения.

Таким образом, характерными свойствами экскурсов и инверсий ГМП, воздействующими на биологические объекты, являются продолжительность периода пониженной интенсивности ГМП, повышение радиационного уровня и изменение климата. Синхронность воздействия этих факторов во время экскурса или инверсии, по-видимому, и является доминирующим обстоятельством при рассмотрении корреляции видообразования с экскурсами и инверсиями.

Следует отметить, что не всем экскурсам сопутствуют события в эволюции биоты, что, по-видимому, зависит от степени развития геофизических факторов во время экскурса.

Вышеизложенные факты позволили нам сделать вывод, что синхронное воздействие на биологические объекты обсуждаемых факторов во время экскурсов и инверсий создает в среде условия, которые обеспечивают либо появление новых видов, либо эволюционные изменения, ему способствующие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Venditti C. et al. Phylogenies reveal new interpretation of speciation and the Red Queen // Nature. 2010. Vol. 463. P. 349–352.
2. Вельков В.В. Новые представления о молекулярных механизмах эволюции: стресс повышает генетическое разнообразие // Молекулярная биология. 2002. Т. 36, № 2. С. 277–285.
3. Flagstad O. et al. Environmental change and rates of evolution: the phylogeographic pattern within the hartebeest complex as related to climatic variation // Proc. R. Soc. Lond. B. 2000. Vol. 268. P. 667–677.
4. DeMenocal P.B. African climate change and faunal evolution during the Pliocene-Pleistocene // Earth Planet. Sci. Lett. 2004. Vol. 220. P. 3–24.
5. Behrensmeyer A.K. Climate change and human evolution // Science. 2006. Vol. 311. P. 476–478.
6. Roberts A. Geomagnetic excursions: Knowns and unknowns // Geoph. Res. Lett. 2008. Vol. 35. L17307. doi:10.1029/2008GL034719.
7. Coop G. et al. The Timing of Selection at the Human FOXP2 // Gene. Mol. Biol. Evol. 2008. Vol. 25, № 7. P. 1257–1259.
8. Evans P.D. et al. Microcephalin, a gene regulating brain size, continues to evolve adaptively in humans // Science. 2005. Vol. 309. P. 1717–1720.
9. Ambrose S.H. Late Pleistocene human population bottlenecks, volcanic winter and differentiation of modern humans // J. Hum. Evol. 1998. Vol. 34. P. 623–651.
10. Cavalli-Sforza L.L., Feldman M.W. The application of molecular genetic approaches to the study of human evolution // Nature Genetics. 2003. Vol. 33. P. 266–275.
11. Green R.E. et al. A Complete Neandertal Mitochondrial Genome Sequence Determined by High-Throughput Sequencing // Cell. 2008. Vol. 134. P. 416–426.
12. Knudsen M.F. et al. High-resolution data of the Iceland Basin geomagnetic excursion from ODP sites 1063 and 983: Existence of intense flux patches during the excursion? // Earth Planet. Sci. Lett. 2006. Vol. 251. P. 18–32.
13. Horgn C-S. et al. Astronomically calibrated ages for geomagnetic reversals within the Matuyama chron // Earth, planets and space. 2002. Vol. 54, № 6. P. 679–690.

14. Leonard W.R. et al. Effects of Brain Evolution on Human Nutrition and Metabolism // Annual Review of Nutrition. 2007. Vol. 27. P. 311–327.
15. Clague J. et al. Open letter by International Union for the Quaternary Research (INQUA) Executive Committee // INQUA Newsletter. 2006. Vol. 16, № 1. P. 158–159. URL: <http://www.inqua.tcd.ie/documents/QP%2016-1.pdf>
16. Stedman H.H. et al. Myosin gene mutation correlates with anatomical changes in the human lineage // Nature. 2004. Vol. 428. P. 415–418.
17. Chou H.H. et al. Inactivation of CMP-N-acetylneuraminic acid hydroxylase occurred prior to brain expansion during human evolution // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2002. Vol. 99. P. 11736–11741.
18. Valet J.-P., Meynadier L. Geomagnetic field intensity and reversals during the past four million years // Nature. 1993. Vol. 366. P. 234–238.
19. Cela-Conde C.J., Ayala F.J. Genera of human lineage // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2003. Vol. 100. P. 10133–10135.
20. Jacobs J.A. Reversals of the Earth's magnetic field. 1994. Second edition. Cambridge University Press. 346 p.
21. Takahata N. et al. Divergence time and population size in the Lineage leading to modern Humans // Theoretical population biology. 1995. Vol. 48. P. 198–221.
22. Glazko G.V., Nei M. Estimation of Divergence Times for Major Lineages of Primate Species // Mol. Biol. Evol. 2003. Vol. 20, № 3. P. 424–434.
23. Roca A.L. et al. Genetic evidence for two species of Elephant in Africa // Science. 2001. Vol. 293. P. 1473–1477.
24. Griswold C.K., Baker A.J. Time to the most recent common ancestor and divergence times of populations of common chaffinches (*Fringilla coelebs*) in Europe and North Africa: insights into Pleistocene refugia and current levels of migration // Evolution Int. J. Org. Evolution. 2002. Vol. 56, № 1. P. 143–153.
25. Koon W.F. et al. Parkin Inferring the phylogeny of disjunct populations of the azure-winged magpie *Cyanopica cyanus* from mitochondrial control region sequences // Proc. R. Soc. Lond. B. 2002. Vol. 269. P. 1671–1679.
26. Kittler R. et al. Molecular Evolution of *Pediculus humanus* and the Origin of Clothing // Current Biology. 2003. Vol. 13. P. 1414–1417.
27. Lindqvist C. et al. Complete mitochondrial genome of a Pleistocene jawbone unveils the origin of polar bear // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2010. Vol. 107, № 11. P. 5053–5057.
28. Ferik A., Leonhardt R. The Laschamp geomagnetic field excursion recorded in Icelandic lavas // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2009. Vol. 177. P. 19–30.
29. Waddington C.J. Paleomagnetic Field Reversals and Cosmic radiation // Science. 1967. Vol. 158. P. 913–915.
30. Белшьева Н.К., Гак Е.З. Значение вариаций космических лучей для функционирования биосистем // Сборник научных докладов VII Международной конференции «Экология и развитие Севера-Запада России». СПб., 2002. С. 118–129.
31. Griefmeier J.-M. et al. Cosmic ray impact on extrasolar Earth-like planets in close-in habitable zones // Astrobiology. 2005. Vol. 5, № 5. P. 587–603.
32. Thorne M.C. Background radiation: natural and man-made // J. Radiol. Prot. 2003. Vol. 23. P. 29–42.
33. Бердоносков С.С., Сапожников Ю.С. Ионизирующее излучение и окружающая среда // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7, № 2. С. 40–46.
34. Самнер Д. и др. Медицинские последствия ионизирующей радиации // Бюллетень «Гражданская инициатива». 1999. № 3 (4). URL: <http://www.csgi.ru/gi/gi4/06.htm>
35. Модель космоса. Т. 1: Физические условия в космическом пространстве. М.: КДУ, 2007. 872 с.
36. Sakamoto S. et al. Levels of radiation exposure near AOS and OSF // ALMA MEMO. 2003. № 446. URL: http://science.nrao.edu/alma/aboutALMA/Technology/ALMA_Memo_Series/main_alma_memo_series.shtml
37. Furukawa M. et al. Observations of Cosmic Ray Intensity in the Brazilian Geomagnetic Anomaly Region. European International Radiation Protection Association (IRPA) 10 – HIROSHIMA – May 2000 Proceedings. P-1a-35. URL: <http://www2000.irpa.net/irpa10/cdrom/00368.pdf>
38. Панасюк М.И. Странники Вселенной, или Эхо Большого взрыва. Фрязино: Век 2, 2005. 272 с.
39. Harrison C.G. Evolutionary processes and reversals of the Earth's magnetic field // Nature. 1968. Vol. 217. P. 46–47.
40. Поспелова Г.А. Геомагнитные экскурсы хрона Брюнес и глобальные климатические осцилляции // Физика Земли. 2000. № 8. С. 3–14.
41. Christl M. et al. Evidence for a link between the flux of galactic cosmic rays and Earth's climate during the past 200,000 years // J. Atmosph. Solar-Terrest. Physics. 2004. Vol. 66. P. 313–322.
42. Svensmark H. Cosmoclimatology: a new theory emerges // Astronomy & Geophysics. 2007. Vol. 48, № 1. P. 1.18–1.24. doi:10.1111/j.1468-4004.2007.48118
43. Нугматулин П.И. Во власти океана // Наука в России. 2010. № 4. С. 54–62.
44. Svesson A. et al. The Greenland ice core chronology 2005, 15–42 ka. P. 2: comparison to other records // Quaternary Science Reviews. 2006. Vol. 25 (23–24). P. 3258–3267.
45. Кузнецов В.В., Кузнецова Н.Д. Влияние космического излучения и вековых вариаций геомагнитного поля на климат и эволюцию жизни на Земле. URL: <http://kcs.dvo.ru/ikir/Russian/Science/2004/3-11.pdf>
46. Kuznetsov V.V., Kuznetsova N.D. The Earth Palaeoclimate Response to Cosmic Rays Exposure During Geomagnetic Field Excursions Proc. 6-th Int. conf. «Problems of GEOCOSMOS». S.-Petersburg, 2006. P. 112–115.
47. Viera L.E.A., da Silva L.A. Geomagnetic modulation of clouds effects in the Southern Hemisphere Magnetic Anomaly through lower atmosphere cosmic rays effects // Geoph. Res. Lett. 2006. Vol. 33. L14802. doi: 10.1029/2006GL026389.
48. Lund S. et al. A summary of Brunhes paleomagnetic field variability recorded in Ocean Drilling Program cores // Phys. Earth Planet. Inter. 2006. Vol. 156. P. 194–204.
49. Ménabréaz L. et al. Paleomagnetic record of the late Pleistocene reef sequence of Tahiti (French Polynesia): A contribution to the chronology of the deposits // Earth Planet. Sci. Lett. 2010. Vol. 294 (1–2). P. 58–68.
50. Zhu R.X. et al. The Blake geomagnetic polarity episode recorded in Chinese loess // Geoph. Res. Lett. 1994. Vol. 21, № 8. P. 697–700.
51. Воронин А.Ю. и др. Влияние гипогомагнитного поля на устойчивость организмов к ионизирующей радиации // Материалы Международного симпозиума «Гелиогеофизические факторы и здоровье человека». Новосибирск, 2005. С. 115–116.
52. Воронин А.Ю. и др. Повышение устойчивости организма к острому охлаждению под воздействием гипогомагнитного поля // Материалы Международного симпозиума «Гелиогеофизические факторы и здоровье человека». Новосибирск, 2005. С. 116.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 1 ноября 2011 г.