

Глава. 21. Уровень естественной радиации на Земле.

В главе 21 обсуждаются: Проблема радиационного фона Земли; Земля в потоке космических лучей. Повышенный фон радиации в особых регионах Земли. Рост уровня радиации при уменьшении модуля геомагнитного поля. Изменения радиационного фона Земли в прошлом и настоящем. Роль радиации в изменениях климата и эволюции жизни.

21. 1. Радиационный фон.

Радиационный фон Земли формируют природные и антропогенные ионизирующие излучения, источниками которых являются не только космические, но и разнообразные земные явления - ядерные взрывы, выбросы предприятий атомной энергетики, отработанное ядерное топливо и др. Избежать радиоактивного облучения невозможно. Жизнь на Земле возникла и развивается в условиях постоянного облучения. Радиационный фон Земли складывается из следующих компонентов:

- космическое излучение;
- излучение от находящихся в земной коре, воздухе и других объектах внешней среды природных радионуклидов;
- излучение от искусственных (техногенных) радионуклидов.

Облучение может быть внешним и внутренним. Внешнее облучение обусловлено источниками, расположенными вне тела человека (космическое излучение, наземные источники). Внутреннее облучение осуществляют радионуклиды, находящиеся в теле человека. За счёт космического излучения большинство населения получает дозу 35 мбэр в год ($1 \text{ мбэр} = 10^{-3} \text{ бэр}$). Такую же дозу (35 мбэр/год) человек получает от внешних земных источников естественного происхождения. Доза внутреннего облучения от естественных источников составляет в среднем 135 мбэр/год (3/4 этой дозы даёт не имеющий вкуса и запаха тяжёлый радиоактивный газ радон и продукты его распада). Таким образом, суммарная доза внешнего и внутреннего облучения человека от естественных источников радиации в среднем равна около 200 мбэр/год.

В результате деятельности человека в непосредственно окружающей его среде появились дополнительные источники радиации, в том числе естественные радионуклиды, извлекаемые в больших количествах из недр Земли вместе с углём, газом, нефтью, минеральными удобрениями, сырьём для строительных материалов. Вклад искусственных источников излучений в создании суммарной годовой дозы облучения человека иллюстрируется следующим списком (первая строка этого списка – уже обсуждавшийся выше суммарный вклад от естественных радиоактивных источников):

	мбэр/год
Естественный радиационный фон	200
Стройматериалы	140
Медицинские исследования	140
Бытовые предметы	4
Ядерные испытания	2.5
Полёты в самолётах	0.5
Атомная энергетика	0.2
Телевизоры и мониторы	0.1
Общая доза	500

21. 2. Космические лучи.

Космические лучи - элементарные частицы и ядра атомов, родившиеся и ускоренные до высоких энергий во Вселенной.

Физика космических лучей изучает:

- процессы, приводящие к возникновению и ускорению космических лучей;
- частицы космических лучей, их природу и свойства;
- явления, вызванные частицами космических лучей в космическом пространстве, атмосфере Земли и планет.

Изучение потоков высокоэнергетичных заряженных и нейтральных частиц, попадающих в магнитосферу Земли из космического пространства (первичные лучи), а также потоков вторичных частиц, родившихся в ядерных реакциях в верхних слоях земной атмосферы, - является важнейшими экспериментальными задачами.

Космические лучи являются составляющей естественной радиации (фоновой радиации) на поверхности земли и в атмосфере.

До развития ускорительной техники космические лучи служили единственным источником элементарных частиц высокой энергии. Так, позитрон и мюон были впервые найдены в космических лучах.

Химический спектр космических лучей в пересчете энергии на нуклон более чем на 94 % состоит из протонов, ещё на 4 % — из ядер гелия (альфа-частиц). Есть также ядра других элементов, но их доля значительно меньше. В пересчете энергии на частицу доля протонов составляет около 35 %, доля тяжёлых ядер соответственно больше.

Традиционно частицы, наблюдаемые в КЛ, делят на следующие группы: L, M, H, VH (соответственно, легкие, средние, тяжелые и сверхтяжелые). Химический состав первичного космического излучения отличается от состава звезд и межзвездного газа высоким (в несколько тысяч раз) содержанием ядер группы L (литий, бериллий, бор). Данное явление объясняется тем, что частицы КЛ под воздействием галактического магнитного поля хаотически блуждают в пространстве около 7 млн. лет, прежде чем достигнуть Земли. За это время ядра группы VH могут неупруго провзаимодействовать с протонами межзвездного газа и расколоться на более легкие фракции. Данное предположение подтверждается тем, что КЛ обладают очень *высокой степенью изотропии*.

Потоки высокоэнергетичных заряженных частиц в околоземном космическом пространстве.

В околоземном космическом пространстве (ОКП) различают несколько типов космических лучей. К стационарным принято относить галактические космические лучи (ГКЛ), частицы альбедо и радиационный пояс. К нестационарным — солнечные космические лучи (СКЛ).

Галактические космические лучи (ГКЛ).

Галактические космические лучи (ГКЛ) состоят из ядер различных химических элементов с кинетической энергией E более нескольких десятков МэВ/нуклон, а также электронов и позитронов с $E > 10$ МэВ. Эти частицы приходят в межпланетное пространство из межзвездной среды. Источником этих частиц являются сверхновые звезды нашей Галактики. Возможно, однако, что в области $E < 100$ МэВ/нуклон частицы образуются за счет ускорения в межпланетной среде частиц солнечного ветра и межзвездного газа. Дифференциальный энергетический спектр ГКЛ носит степенной характер.

Вторичные частицы в магнитосфере Земли: частицы альбедо, радиационный пояс.

Внутри магнитосферы, как и в любом дипольном поле, есть области, недоступные для частиц с кинетической энергией E , меньше критической. Те же частицы с энергией E

$< E_{кр}$, которые все-таки уже там находятся, не могут эти области покинуть. Эти запрещённые области магнитосферы называются зонами захвата. В зонах захвата дипольного (квазидипольного) поля Земли действительно удерживаются значительные потоки захваченных частиц (прежде всего, протонов и электронов).

В околоземном пространстве можно выделить две торообразные области, расположенные в экваториальной плоскости примерно на расстоянии от 300 км (в зоне Бразильской магнитной аномалии - БМА) до 6000 км (внутренний радиационный пояс земли - РПЗ) и от 12000 км до 40000 км (внешний РПЗ). Основным наполнением внутреннего пояса являются протоны с высокими энергиями от 1 до 1000 МэВ, а внешнего — электроны.

Максимум интенсивности протонов низких энергий расположен на расстояниях $L \sim 3$ радиусов Земли от её центра. Электроны малых энергий заполняют всю область захвата. Для них нет деления на внутренний и внешний пояса. Поток протонов во внутреннем поясе довольно устойчив во времени. Процесс взаимодействия ядер первичного космического излучения с атмосферой сопровождается возникновением нейтронов. Поток нейтронов, идущий от Земли (нейтроны альbedo), беспрепятственно проходит сквозь магнитное поле Земли. Поскольку нейтроны нестабильны (среднее время распада ~ 900 с), часть из них распадается в зонах, недоступных для заряженных частиц малых энергий. Таким образом, продукты распада нейтронов (протоны и электроны) рождаются прямо в зонах захвата. В зависимости от энергии и pitch-углов эти протоны и электроны могут либо оказаться захваченными, либо покинуть эту область.

Частицы альbedo - это вторичные частицы, отраженные от атмосферы Земли. Нейтроны альbedo обеспечивают радиационный пояс протонами с энергией до 10^3 МэВ и электронами с энергией до нескольких МэВ.

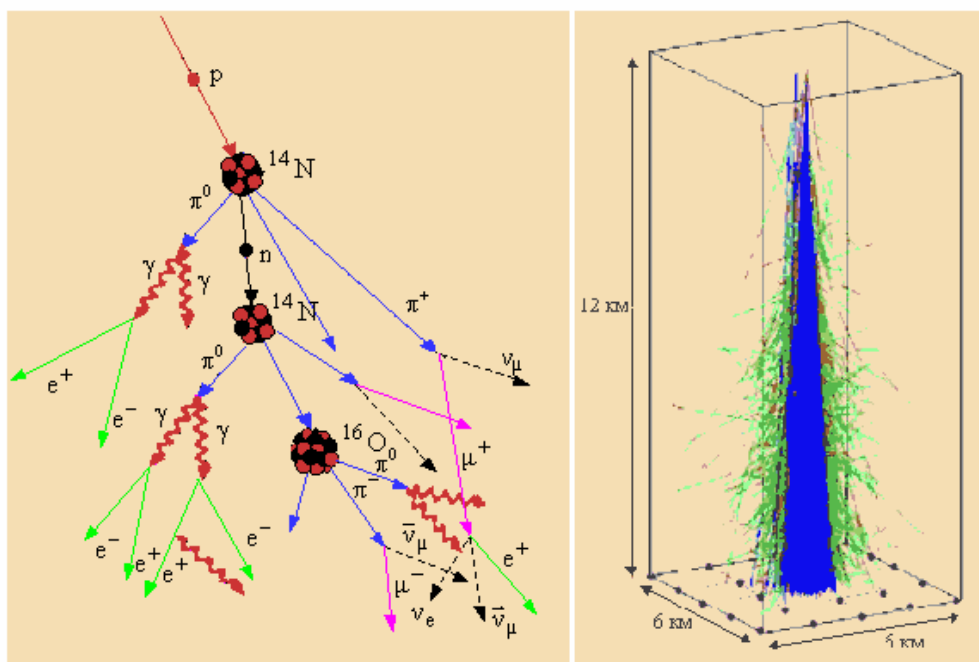


Рис. 21-1. Схема взаимодействия протона космических лучей с атомами азота и кислорода атмосферы. Атмосферный ливень космических лучей (справа).

Солнечные космические лучи.

Солнечными космическими лучами (СКЛ) называются энергичные заряженные частицы — электроны, протоны и ядра, — инжектированные Солнцем в межпланетное пространство. Энергия СКЛ простирается от нескольких кэВ до нескольких ГэВ. В

нижней части этого диапазона СКЛ граничат с протонами высокоскоростных потоков солнечного ветра. Частицы СКЛ появляются вследствие солнечных вспышек.

Космические лучи ультравысоких энергий.

Энергия некоторых частиц превышает Предел Грайзена-Зацепина-Кузьмина - теоретический предел энергии для космических лучей 6×10^{19} эВ. Несколько десятков таких частиц за год было зарегистрировано обсерваторией AGASA. Эти наблюдения ещё не имеют достаточно обоснованного научного объяснения.

Регистрация космических лучей.

Долгое время после открытия космических лучей, методы их регистрации не отличались от методов регистрации частиц в ускорителях, чаще всего - газоразрядные счётчики или ядерные фотографические эмульсии, поднимаемые в стратосферу, или в космическое пространство. Но данный метод не позволяет вести систематические наблюдения частиц с высокой энергией, так как они появляются достаточно редко, а пространство, в котором такой счётчик может вести наблюдения, ограничено его размерами.

Современные обсерватории работают на других принципах. Когда частица высокой энергии входит в атмосферу она, взаимодействуя с атомами воздуха на первых 100 г/см^2 , рождает целый шквал частиц, в основном пионов и мюонов, которые в свою очередь рождают другие частицы, и так далее. Образуется конус из частиц, который называют ливнем. Такие частицы движутся со скоростью превышающей скорость света в воздухе, благодаря чему возникает черенковское свечение, регистрируемое телескопами. Такая методика позволяет следить за областями неба площадью в сотни квадратных километров.

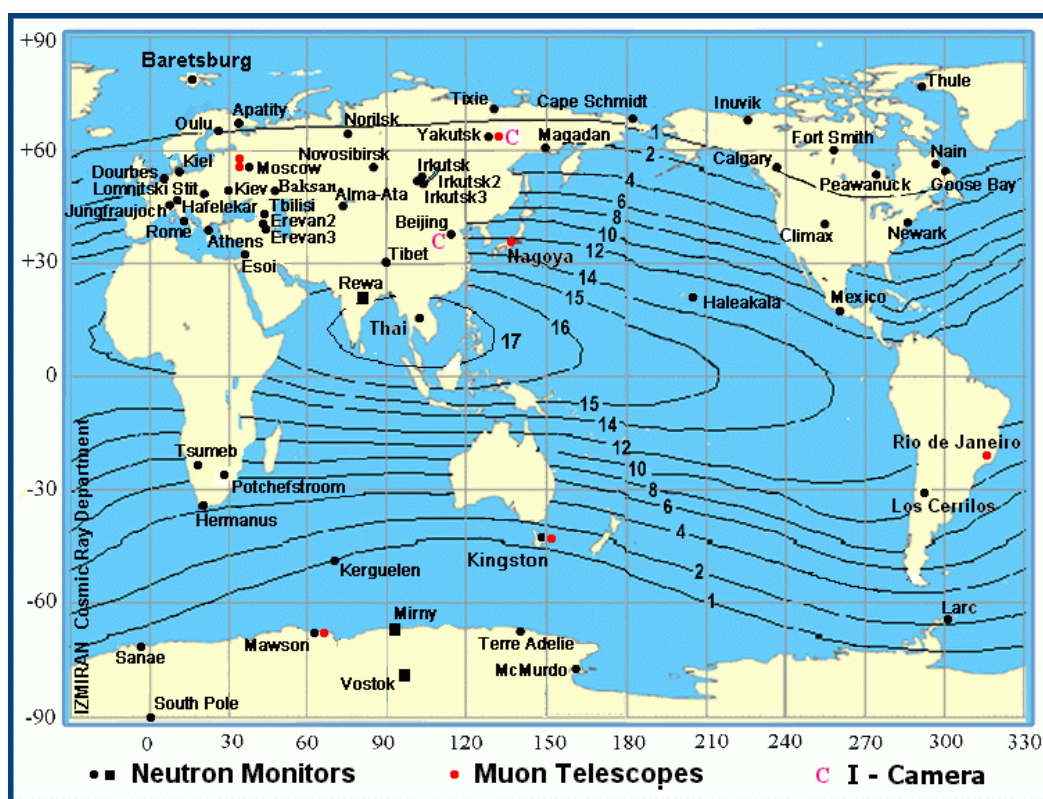


Рис. 21-2. Станции регистрации космических лучей.

21. 3. Естественный радиационный фон.

Космическое пространство пронизано заряженными частицами разного происхождения: галактическим излучением, корпускулярным излучением Солнца и захваченными частицами, удерживаемыми на околоземных орбитах магнитным полем Земли. Галактическое излучение состоит главным образом из протонов с небольшим количеством ионов гелия и более тяжелых металлов, а также электронов, фотонов, нейтронов. Энергетический спектр космических лучей простирается до огромных энергий — свыше 10^{20} эВ/нуклон. Корпускулярное излучение Солнца по составу близко к галактическому, но имеет заметный временной ход и ограничено более низкими энергиями частиц — до $5 \cdot 10^{10}$ эВ/нуклон. Эмиссия излучения протекает непрерывно и отражает 11-летний цикл солнечной активности.

Первичные космические лучи в результате процессов ионизации и ядерных взаимодействий быстро теряют свою энергию и практически исчезают на высоте около 20 км. Образуется вторичное излучение, интенсивность которого падает по мере снижения в атмосфере. Мощность дозы, поглощаемой воздухом на уровне моря в средних широтах, составляет 32 нГр/ч (с высотой она удваивается через каждые 1.5 тыс. м); для людей это соответствует средней мощности эквивалентной дозы 355 мкЗв/ч.

Естественный радиационный фон есть неотъемлемый фактор окружающей среды, оказывающий существенное воздействие на жизнедеятельность человека. Эволюционное развитие показывает, что в условиях естественного фона обеспечиваются оптимальные условия для жизнедеятельности человека, животных, растений. Поэтому при оценке опасности, обусловленной ионизирующим излучением, крайне важно знать характер и уровни облучения от различных источников.

Естественное фоновое облучение человека обуславливается внешним и внутренним облучением. Внешнее облучение создается за счет воздействия на организм ионизирующих излучений от внешних, по отношению к человеку, источников излучения, а внутреннее - за счет воздействия на организм ионизирующих излучений радиоактивных нуклидов, находящихся внутри организма.

Космические излучения и изотопы земной коры создают естественный радиационный фон, который характерен для каждой местности. Различают первичное и вторичное космическое излучение.

Первичное космическое излучение представляет собой поток частиц, попадающих в земную атмосферу из межзвездного пространства, солнечной системы. Оно состоит из протонов (примерно 90 %) и альфа-частиц (около 10 %). В меньших количествах присутствуют нейтроны, электроны, ядра легких элементов. Большая часть первичного космического излучения возникает в пределах нашей Галактики. Энергия частиц первичного излучения достигает 10^{12} – 10^{14} МэВ. Кроме того, при солнечных вспышках возникает солнечное космическое излучение, которое приводит к увеличению дозы облучения на поверхности Земли.

Вторичное космическое излучение образуется в результате взаимодействия частиц первичного космического излучения с ядрами атомов, входящих в состав воздуха. Оно содержит практически все известные в настоящее время элементарные частицы. У поверхности Земли оно состоит в основном из фотонов, электронов и позитронов с энергией до 100 МэВ.

Мощность космических лучей, достигающих земной поверхности, зависит от географической широты и высоты над уровнем моря. Изменение мощности космических лучей в зависимости от географической широты обусловлено тем, что Земля похожа на гигантский магнит. Поэтому космические лучи, будучи заряженными частицами, отклоняются от экватора и собираются вместе в виде своеобразных воронок в области полюсов Земли. Области вблизи экватора, находящиеся на уровне моря, получают наименьшую дозу космического излучения, примерно равную 0,35 мЗв/год. На широте 50° доза космического излучения составляет 0,5 мЗв/год. Это обусловлено тем, что толстый

слой атмосферы, содержащий воздух и пары воды, разрушая, замедляя и останавливая движение многих быстрых заряженных частиц, двигающихся из космоса. С ростом высоты над уровнем моря мощность эквивалентной дозы космического излучения увеличивается. Например, на высоте 4500 м доза облучения из космоса составляет 3 мЗв/год, а на вершине пика Эвереста (8848 м над уровнем моря), соответствующий показатель равен 8 мЗв/год.

Фон радиоактивный, естественный радиационный фон, ионизирующие излучения, источниками которых являются космические лучи и естественно распределённые в природе радионуклиды. Космические лучи представляют собой поток частиц высоких энергий, проходящих на Землю из мирового пространства. Естественные радионуклиды принадлежат к сильно рассеянным элементам и повсеместно присутствуют в окружающей среде, а также в животных и растительных организмах. Фоновому облучению подвергаются все живые организмы Земли, в том числе человек (средние значения годовых доз облучения человека представлены в табл.). В зависимости от высоты над уровнем моря и содержания радионуклидов в окружающей среде Радиоактивный фон колеблется в значительных пределах. В отдельных районах с высоким содержанием природных радионуклидов он может достигать 1000 *мрад/год* и больше. Жизнь на Земле возникла и развивалась в условиях воздействия ионизирующих излучений. Биологическое значение радиоактивного фона, однако, окончательно ещё не выяснено. Считают, что часть наследственных изменений – *мутаций* у животных и растений связана с радиоактивным фоном.

Фоновое нейтронное излучение атмосферы.

Космический эксперимент «БТН-Нейтрон» на Российском сегменте МКС заключался в исследовании фонового нейтронного излучения Земли. С 2001 по 2007 годы в ИКИ РАН проводились работы по разработке и созданию аппаратуры БТН-М1 для реализации научного эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту Российского сегмента МКС.

Целями этого эксперимента являются:

- исследование вторичного нейтронного излучения верхней атмосферы Земли под воздействием энергичных заряженных частиц в магнитосфере,
- исследование нейтронной компоненты солнечных вспышек,
- исследование нейтронной компоненты радиационного фона на борту МКС.

Особенностью проведения эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту МКС является возможность синхронных измерений нейтронного излучения Марса в российском эксперименте ХЕНД на борту автоматической межпланетной станции НАСА «Марс Одиссей». Совместная обработка данных измерений с двух приборов на орбитах вокруг Земли и Марса создает уникальную возможность для стереоскопических измерений потоков нейтронов от солнечных вспышек с различных точек Солнечной системы. При этом возникает возможность сравнения вариаций радиационной обстановки на различных фазах солнечного цикла, и также сравнение радиационных условий на околоземных и межпланетных космических аппаратах.

По результатам измерений аппаратурой БТН-М1 построены карты нейтронного и гамма-излучения верхней атмосферы Земли на орбите МКС (пример карты излучения эпитепловых нейтронов представлен на рис. 12-3).

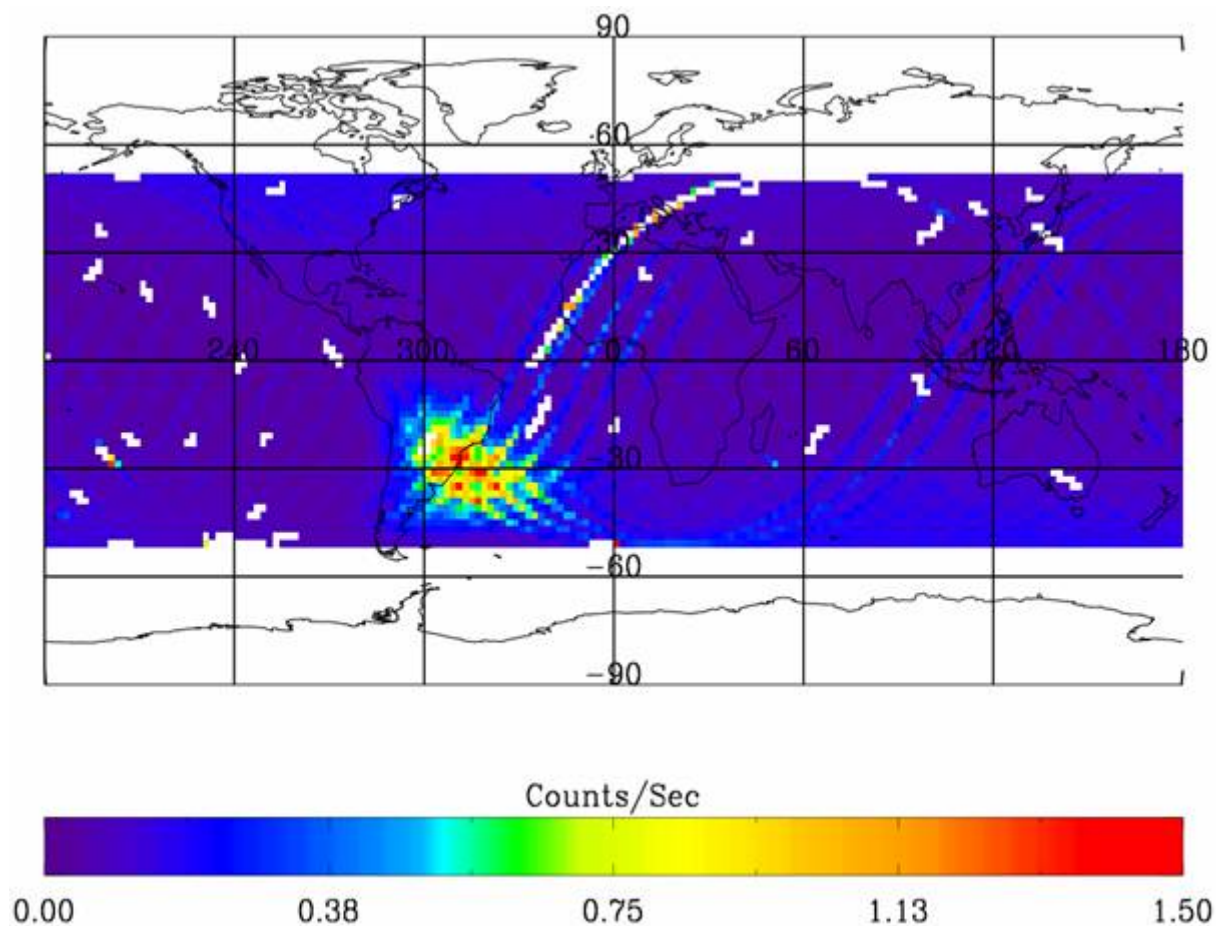


Рис.21-3. Карта излучения эпитепловых нейтронов на орбите МКС по данным эксперимента «БТН-Нейтрон».

На карте хорошо видно увеличение скорости счета нейтронов на высоких широтах и также в области Южно-Атлантической (Бразильской) Магнитной аномалии. В этих районах происходит увеличение потока энергичных заряженных частиц в верхней атмосфере Земли, что приводит к возрастанию вторичного нейтронного излучения.

21. 4. Радиационный пояс Земли.

Внутри магнитосферы, как и в любом дипольном поле, есть области, недоступные для частиц с кинетической энергией E , меньше критической. Те же частицы с энергией $E < E_{кр}$, которые все-таки уже там находятся, не могут эти области покинуть. Эти запрещенные области магнитосферы называются зонами захвата. В зонах захвата дипольного (квазидипольного) поля Земли действительно удерживаются значительные потоки захваченных частиц (прежде всего, протонов и электронов). Радиационный пояс Земли (РПЗ) в западной литературе обычно называется *поясом Ван-Аллена*. РПЗ был открыт американскими и советскими учеными в 1957—1958 годах и представляет собой в первом приближении тороид, в котором выделяется две области:

- внутренний радиационный пояс на высоте ~ 4000 км, состоящий преимущественно из протонов с энергией в десятки МэВ;
- внешний радиационный пояс на высоте $\sim 17\,000$ км, состоящий преимущественно из электронов с энергией в десятки кэВ.

Зависимость положения нижней границы радиационного пояса — долготная. Над Атлантикой возрастание интенсивности начинается на высоте 500 км, а над Индонезией на высоте 1300 км. Если те же графики построить в зависимости от магнитной индукции

B , то все измерения уложатся на одну кривую, что еще раз подтверждает магнитную природу захвата.

Между внутренним и внешним радиационными поясами имеется щель, расположенная в интервале от 2 до 3 радиусов Земли. Потоки частиц во внешнем поясе больше, чем во внутреннем. Различен и состав частиц: во внутреннем поясе протоны и электроны, во внешнем — электроны. Применение незранированных детекторов существенно расширило сведения о радиационных поясах. Были обнаружены электроны и протоны с энергией несколько десятков и сот килоэлектронвольт соответственно. Эти частицы имеют существенно иное, по сравнению с проникающими, пространственное распределение.

Максимум интенсивности протонов низких энергий расположен на расстояниях $L \sim 3$ от центра Земли. Малоэнергичные электроны заполняют всю область захвата. Для них нет деления на внутренний и внешний пояса. Частицы с энергией десятки кэВ непривычно относить к космическим лучам, однако радиационные пояса представляют собой единое явление и должны изучаться в комплексе с частицами всех энергий. Поток протонов во внутреннем поясе довольно устойчив во времени. Первые эксперименты показали, что электроны высокой энергии ($E > 1-5$ МэВ) сосредоточены во внешнем поясе. Электроны с энергией меньше 1 МэВ заполняют почти всю магнитосферу. Внутренний пояс очень стабилен, тогда как внешний испытывает резкие колебания.

Благодаря наличию сильного магнитного поля, планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) также обладают сильными радиационными поясами, напоминающими внешний радиационный пояс Земли.

Радиоизлучение радиационного пояса Юпитера впервые было обнаружено в 1955 г., однако природа излучения тогда оставалась непонятной. Непосредственные измерения в радиационном поясе Юпитера впервые были проведены КА Пионер-10, прошедшим через его наиболее плотную область в 1973 г.

Открытие радиационного пояса.

В настоящее время считается общепризнанным, что автором открытия радиационных поясов Земли является американский физик из университета штата Айова Джеймс Ван Аллен. Эта точка зрения была изложена в статье главного редактора журнала «Тайм» (май 1959 г.). Из нее следовало, что это открытие Ван Аллена, сделанное на основе измерений на спутниках «Эксплорер-1» и «Эксплорер-3», было логическим завершением результатов его ранних экспериментов на геофизических ракетах, в то время, когда «...ни один из трех тяжелых русских спутников не передал сообщений об излучении Ван Аллена. Одно из объяснений состоит в том, что русские перехитрили сами себя, отказавшись сообщить внешнему миру, как нужно интерпретировать сигналы с их спутников. Поскольку только нижние части орбит спутников проходили над советской территорией, русские ученые никогда не получали данных с больших высот. Если какой-то из советских спутников и имел запоминающее устройство, то оно не работало. Другое предположение состоит в том, что гейгеровские счетчики перегружались вблизи апогея излучением Ван Аллена и русские ученые не знали, как объяснить это необычное поведение. Собака, запущенная на втором спутнике, умерла примерно через неделю, но русские не сообщили, было ли это вызвано воздействием излучения. Вполне возможно, что они этого не знали».

Хорошо известно, что значит такого рода публикация в «Тайме» да еще с красочным портретом героя статьи на первой странице обложки! И поэтому представляется совершенно естественным, что после этого мировая пресса стала связывать открытие только с именем американского физика, и на страницах замелькали новые термины: «излучение Ван Аллена», «пояса Ван Аллена»...

Надо отдать должное самому автору открытия, быстро разобравшемуся в сложившейся ситуации: «Я выражаю существенное несогласие с разделом статьи относительно неудач советских исследователей по обнаружению захваченного излучения. По моему представлению, наша работа со спутником «Эксплорер-1» действительно обеспечила основное открытие, и я сделал первое публичное сообщение на объединенной сессии Американского Физического Общества и Национальной Академии наук США 1 мая 1958 г. Двумя неделями позже был успешно запущен советский «Спутник-3», и он обеспечил существенное подтверждение наших ранних результатов».

Итак, в начале августа 1958 г. было установлено, что в окрестности Земли присутствуют интенсивные, захваченные геомагнитным полем, потоки протонов, - с энергией порядка 100 МэВ (С. Н. Вернов) и электронов, - с энергиями в десятки кэВ (В. И. Красовский, Дж. Ван Аллен). Эти выводы вполне укладывались в рамки теорий того времени. До открытия явления, позже названного «радиационным поясом Земли», оставалось сделать еще один шаг - доказать, что заряженные частицы, «накопленные» в геомагнитном поле, могут дрейфовать в азимутальном направлении. Эта возможность обсуждалась еще в 1946 г. при разработке зеркальной магнитной ловушки и считалась проблематичной из-за предполагаемого образования пространственного заряда от разделяющихся при дрейфе электронов и ионов. Доказать существование дрейфа заряженных частиц могли только эксперименты с инъекцией заряженных частиц в геомагнитную ловушку. Ими стали высотные ядерные взрывы, проведенные США в августе — сентябре 1958 г.

Структура радиационного пояса.

Радиационные пояса принято разделять на внутренний и внешний, хотя это разделение носит весьма условный характер. **Внутренний** пояс расположен в экваториальных широтах, и его нижняя граница находится на различной высоте над разными районами Земли. Например, *над Южной Америкой пояс проходит лишь на высоте всего 200-300 км*, в то время как над Австралией — на высоте 1600 км. Максимальная концентрация протонов во внутреннем поясе (а он составлен в основном этими частицами) наблюдается на высоте около 3000 км. Энергии протонов здесь лежат в пределах 20-800 МэВ. Число протонов с этими энергиями значительно уменьшается при росте расстояния от Земли и при его сокращении. Из-за своей огромной проникающей способности протоны представляют значительную опасность для экипажей космических кораблей, достигающих значительных высот. Энергия электронов внутреннего пояса, как правило, бывает порядка 100 кэВ, а максимальная их концентрация наблюдается на высотах около 3400 км от земной поверхности.

Границы **внешнего** радиационного пояса принято считать находящимися на расстояниях 19 тыс. и 45 тыс. км от Земли. Здесь преобладают протоны с энергиями до нескольких сотен кэВ и электроны с энергиями от 40 до 100 кэВ.

Существующие теории объясняют появление частиц в радиационных поясах их дрейфом из «хвоста» магнитосферы во внешний пояс во время магнитных бурь под действием электрического поля и медленной диффузией частиц в магнитную ловушку при небольших вариациях магнитного поля. Процессы, приводящие к тому, что частицы покидают радиационные пояса, до сих пор остаются неясными. Лишь одна причина этого явления пока точно установлена - столкновение с частицами атмосферы. Остается надеяться, что дальнейшие исследования позволят ответить и на этот вопрос.

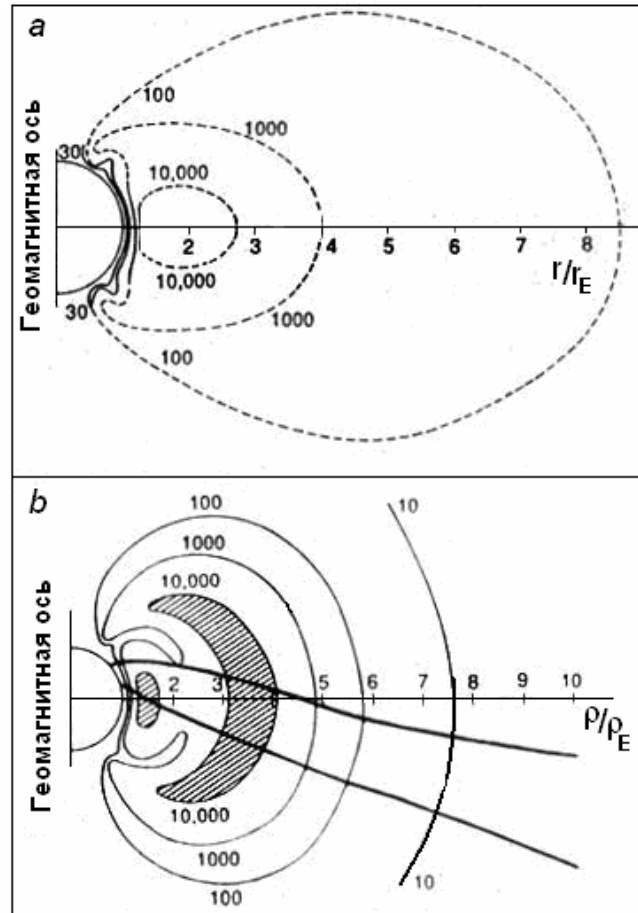


Рис. 21- 4. Схема строения радиационных поясов, предложенная Дж. Ван Алленом: а) к началу 1959 г. (до анализа результатов с КА, запускавшихся к Луне). Единый пояс содержит максимум интенсивности на расстоянии двух радиусов Земли от ее центра плоскости экватора; б) к середине 1959 г. (после анализа результатов с КА «Пионер-1, -2, -3, -4» и с III советского ИСЗ). В двух радиационных поясах максимумы находятся на удалении радиуса 1,5 земных (внутренний протонный) и 3,5 (внешний электронный). Цифры у контуров постоянной интенсивности характеризуют скорость учета экранированного счетчика Гейгера (в имп./с). Нанесена траектория удаления от Земли и возврата к ней КА «Пионер-3»

Радиационные пояса других планет. Интерес к радиационным поясам вновь возник через 11 лет после их прямой регистрации при пролетах КА «Пионер-10, -11» и «Вояджер-1, -2» через магнитосферы планет-гигантов Солнечной системы: Юпитера (1973, 1974, 1979 гг.), Сатурна (1977, 1981 гг.), Урана (1986 г.) и Нептуна (1989 г.). Исследования показали, что их радиационные пояса во многом схожи с земными. Более энергичные захваченные частицы были обнаружены в их внутренних поясах и менее энергичные частицы — во внешних. Открыты и значительные отличия радиационных поясов планет-гигантов от земных.

Например, пояса Юпитера - оказались более сплюснутыми в плоскости экватора, - по сравнению с земными, - из-за быстрого вращения планеты вокруг своей оси.

Радиационные пояса Сатурна - оказались подобными земным. Из-за сильного наклона осей вращения Урана и оси его магнитного диполя к плоскости Земли меридиональные сечения его поясов, по-видимому, почти перпендикулярны плоскости

эклиптики. Радиационные пояса Нептуна во многом сходны с поясами Земли. Получается, что даже при столь различных удалениях от Солнца планет-гигантов их пояса формируются, по-видимому, одинаковыми источниками.

Изложенная здесь история исследования радиационного окружения Земли позволяет ответить на вопрос о приоритетах их первооткрывателей словами Дж. Ван Аллена из его письма в журнал «Тайм» 1959 г.: «...вклады американских и советских исследователей в понимании огромной радиационной области перемежались за последние 15 месяцев». Два радиационных пояса под названиями «внутренний протонный» и «внешний электронный», по-прежнему фигурируют в литературе несмотря на то, что в 1962 г. было установлено, что плотность энергии захваченных электронов во внутреннем поясе намного выше, чем протонов, а во внешнем, соответственно, наоборот.

Широкомасштабные исследования радиационных поясов в начале 60-х годов имели, кроме научного, и политическое значение. Трудно представить, до какого предела могло бы возрасти радиационное загрязнение земной магнитосферы, если бы ядерные взрывы в «безвоздушном пространстве» над плотной атмосферой продолжалось по-прежнему без

21. 5. Бразильская магнитная аномалия (БМА) - магнитная аномалия Земли в южном полушарии, у берегов Бразилии и Южной Африки (Бразильская и Кейптаунская аномалии, которые часто объединяются в Южно-Атлантическую аномалию (ЮАА)).

В физике космических лучей БМА играет очень важную роль, влияя на потоки высокоэнергетичных заряженных частиц в околоземном космическом пространстве. *Из всех магнитных аномалий Земли наиболее значительное влияние на потоки частиц (космических лучей) оказывает БМА.* В этой области величина магнитного поля на уровне моря такая, как на высоте 1000 км вне аномалий. Поскольку БМА отрицательна и располагается на низких широтах, в этом районе происходит не только опускание зеркальных точек частиц, но и провисание дрейфовых оболочек к Земле. Радиальные градиенты потоков частиц на $L < 2$, соответствующих этой аномалии, очень велики (крутая внутренняя кромка РП), и указанное провисание дрейфовых оболочек приводит к значительному росту потоков частиц, связанному с увеличением L при переходе от границ к центру аномалии (на заданной высоте). В отличие от отрицательных магнитных аномалий на более высоких широтах (Кейптаунской и Беринговой), Бразильская аномалия оказывает сильное влияние на потоки частиц в гораздо более широком диапазоне питч-углов, практически полностью опустошая оболочки с $L < 1.1$ в течение одного дрейфового периода.

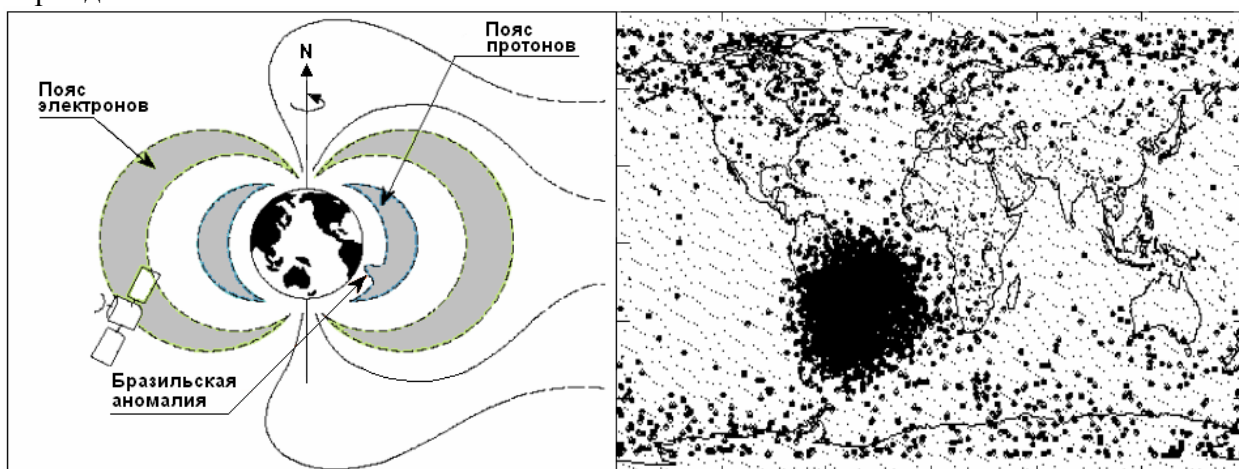


Рис. 21-5. Слева - радиационные пояса Земли. Особенность строения внутреннего пояса в районе Бразильской магнитной аномалии. Справа - выпадение заряженных частиц, регистрируемых космическим аппаратом UoSAT.

Обратим внимание на распределение интенсивности космических лучей, полученное с помощью космического аппарата UoSAT в период с 09.1988 по 05.1992. Спутник зафиксировал значительное увеличение концентрации космических частиц в районе Бразильской (Южно-Атлантической – SAA) магнитной аномалии (рис. 12-5 справа). Этот эффект хорошо изучен, повышение уровня радиации связывается с тем, что горизонтальная компонента геомагнитного поля в районе SAA ниже, относительно среднего поля на экваторе, примерно, в 1.5 – 2 раза. Эта особенность позволяет протонам внутреннего радиационного пояса «проваливаться» в образовавшуюся «воронку» (рис. 12-5 слева) и попадать в атмосферу Земли, что должно было бы приводить к возрастанию радиационного фона на поверхности Земли. По-видимому, это действительно, так, - известно, что в Бразилии неподалеку от г. Посус-ди-Калдас (в 200 км к северу от г. Сан-Пауло, в центре SAA) на небольшой необитаемой возвышенности зарегистрирован уровень радиации порядка 250 - 300 мЗв/год. Информация об этом встречается во многих источниках, однако, ни в одном из них не объясняется причина повышения уровня радиации. Возможно, причина такого повышения уровня радиации заключается именно в локальном уменьшении магнитного поля в этом регионе примерно в два раза. Насколько достоверна эта идея, пока судить ещё рано. Очевидно только то, что если на Земле модуль геомагнитного поля понизится вдвое, радиационный фон вырастет значительно больше.

21. 6. Земля в потоке космических лучей.

По космическим масштабам Земля расположена очень близко от Солнца. Многие специалисты считают, что она вообще находится в области солнечной короны. Потоки направленных от Солнца заряженных частиц солнечного ветра с энергий от 1 эВ до 100 и более МэВ на Землю не попадают, т.к. отклоняются её магнитосферой (см. рис. 21-6).

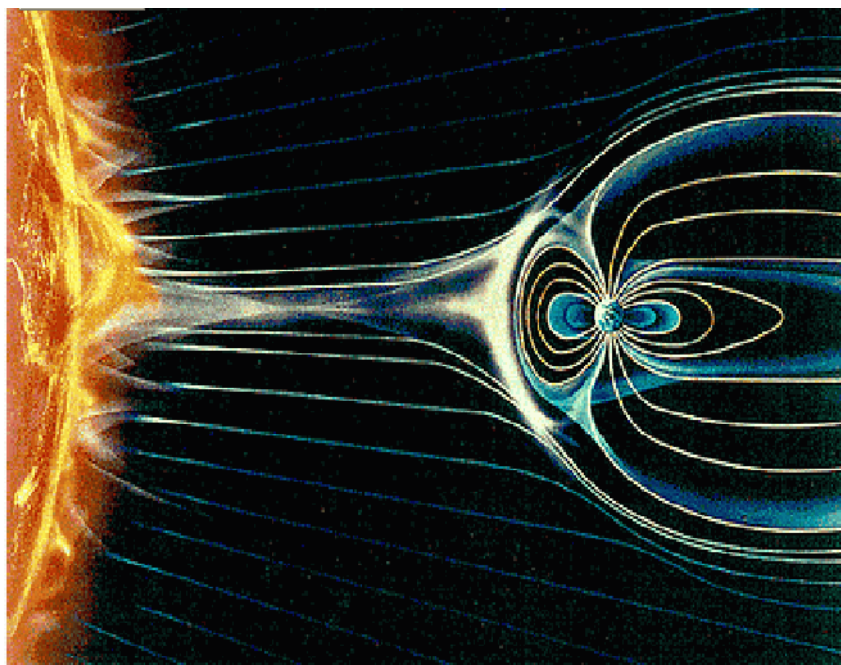


Рис. 21-6. Солнечно–земные связи. Магнитосфера Земли – защитная оболочка от солнечного ветра. Радиационные пояса.

Преодолев отклоняющее действие магнитосферы, в атмосферу Земли способны проникнуть только галактические космические лучи (ГКЛ), обладающие энергией, большей т.н. «энергии обрезания». Для различных широт эта энергия различается,

оставаясь в целом по Земле на уровне ~ 10 ГэВ. Частицы (протоны и мезоны) обладающие столь большой энергией, тем не менее, поверхности Земли не достигают, тормозясь в её атмосфере, рассеиваясь на ядрах атомов воздуха, генерируя жесткое излучение и приводя к рождению элементарных частиц, в основном π -мезонов. Мезоны распадаются с образованием мюонной и нейтринной компонент. Образующиеся при этих процессах мюоны и медленные нейтроны, регистрируются на Земле нейтронными мониторами ГКЛ.

Не вызывает сомнения, что поток солнечных космических лучей достигая Земли вызывал бы несовместимую с жизнью радиационную обстановку. К счастью для Земли, она защищена от солнечного ветра своеобразным магнитосферным «зонтом» (рис. 21-6). Представим себе, что по какой-то причине этот «зонт» порвался. На Землю, при этом, обрушится вся сила «дождя» солнечного ветра. Мало того, при этом произойдет разрушение радиационных поясов Земли и на Землю, дополнительно к «дождю», попадут ещё и «брызги» от разрушенных радиационных поясов, своеобразных «резервуаров» - накопителей того же «дождя».

Потоки частиц в окрестности Земли. Поток протонов (ионов) солнечного ветра (СВ) обладающих энергией $E = 1 - 100$ эВ на подходе к магнитосфере Земли равен $j_o \sim (10 - 100) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Поток ионов с энергией 100 эВ: $j = 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Суммарный поток протонов СКЛ ($E > 10$ МэВ) в течение 19 цикла (1954-64) составил $7.2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Плотность потока протонов СВ (на орбите Земли) $2.4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Плотность потока кинетической энергии - $0.3 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Плотность потока ГКЛ: 1 частица $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, средняя плотность энергии частиц 1 эВ/см^3 . Уменьшение плотности потока ГКЛ на 30 % приводит к увеличению концентрации стратосферного аэрозоля в 100 раз (Vanhellemont et al., 2002). Энергия ГКЛ, проходящих сквозь магнитосферу и попадающих в атмосферу Земли определяется величиной т.н. геомагнитного обрезания. При этом частицы ГКЛ падающие вертикально на экватор, обладают энергией $E \geq 1.5 \cdot 10^{10}$ эВ, на геомагнитную широту 51° $E \geq 2.5 \cdot 10^9$ эВ. Интенсивность ГКЛ на экваторе меньше, чем в полярных широтах, это т.н. широтный эффект. В радиационных поясах: для частиц с энергией $E > 30$ МэВ поток $10^3 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$; для частиц $E > 1$ МэВ, поток $10^5 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Радиация. Основные понятия. Дозы. Доза излучения определяется в зивертах, один зиверт равен $1 \text{ Дж/кг} = 10^4 \text{ эрг/г} = 10^2 \text{ бэр}$. Поглощенная доза (D) ранее определялась в радах, теперь – в греях ($1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г} = 0.01 \text{ грей} = 2.388 \cdot 10^{-6} \text{ кал/г}$). При поглощенной дозе $D = 0.01 \text{ Гр}$ (1 рад) происходит нарушение жизнедеятельности клеток. Принято считать D_o , как дозу, снижающую число выживших клеток в e раз. Для большинства делящихся клеток $D_o = (1.2 - 2) \text{ Гр}$. $1 \text{ Гр} = 10^4 \text{ эрг/г}$. Удельные энергии одного зиверта и одного грея - равны.

В состав первичного космического излучения входят протоны высоких энергий и ядра некоторых легких элементов. Их взаимодействие с ядрами атомов, присутствующих в атмосфере Земли, приводит к образованию ядер новых легких элементов, мюонов, нейтронов, рентгеновского и γ - излучения. Это так называемое вторичное космическое излучение достигает поверхности Земли.

Радиационный фон Земли складывается из:

- Космическое излучение составляет - 410 мкЗв;
- γ - излучение ^{40}K – 150 мкЗв;
- радионуклиды ториевого и уранового рядов – 160 и 100 мкЗв;
- космогенные нуклиды: ^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na – 15 мкЗв.

Космическое излучение, величина которого ограничивается присутствием магнитосферы, составляет значительную часть радиационного фона.

Эффекты воздействия ионизирующего излучения на живой организм разделяют на две категории: соматические, которые возникают в организме человека, непосредственно

подвергнутого облучению, и генетические, проявляющиеся у его потомков. Получающиеся в процессе радиолитиза воды свободные радикалы и окислители, обладая высокой химической активностью, вступают в химические реакции с молекулами белка и других структурных элементов биологической ткани, что приводит к изменению биохимических процессов в организме. В результате нарушаются обменные процессы, замедляется и прекращается рост тканей, возникают новые химические соединения, не свойственные организму. Это приводит к нарушению жизнедеятельности организма в целом. Генетические последствия облучения человека ионизирующей радиацией проявляются в виде хромосомных повреждений, генных мутаций, приводя к изменениям в фенотипе человека. Степень изменений зависит от важности вовлеченных в мутагенез генов, масштабов нарушений и характера наследования возникших мутаций. Авторы (Forster, et al. 2002), исследуя мтДНК людей, проживающих в условиях природного повышенного радиационного фона, показали, что воздействие ионизирующей радиации ускоряет механизм эволюционных мтДНК мутаций.

Степень воздействия поглощенного ионизирующего излучения зависит от того, каким типом излучения обусловлена доза. При одинаковой поглощенной дозе α - излучение гораздо опаснее β - или γ - излучений. Дозу следует умножить на коэффициент, отражающий способность излучения данного вида повреждать ткани организма. Пересчитанную таким образом дозу называют эффективной дозой. Единица эффективной дозы – 1 зиверт. Согласно принятым в нашей стране нормам, предельно-допустимая доза для жителей России равна 5 мЗв/год (Бердоносков, Сапожников, 2001).

Доза, которая приводит к гибели половины пораженного населения в течение 60 дней, именуется дозой ЛД50 (летальная доза, 50-процентное поражение). Для взрослого человека доза составляет ~ 4 Зв (Самнер и др., 1999).

Для млекопитающих и, в частности, человека, есть данные, что удвоение частоты самопроизвольных, спонтанных мутаций находится в диапазоне 0,5-2,5 Зв (Гуськов, 2003).

Статистически достоверные риски для лейкемии и сулидных опухолей, установленные у людей, переживших атомные бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, обнаружены с уровня доз выше 60 мЗв. (Герасимова и др., 2001).

Рост уровня радиации при уменьшении модуля геомагнитного поля.

Построим ориентировочную, феноменологическую зависимость радиационной дозы D от величины модуля геомагнитного поля B . Очевидно, что в момент инверсии (экскурса), когда модуль поля значительно уменьшается, величина корпускулярного потока, попадающего на Землю, возрастает, иначе, увеличивается уровень радиации Земли. В целях упрощения оценок, будем полагать, что приходящая на Землю радиация (в зивертах) биологическими объектами, обитающими на Земле, полностью поглощается, при этом поглощенная доза (в греях) точно равна уровню радиации (в зивертах). Такое допущение, в частности, означает, что радиационный фон ГКЛ* (равный на поверхности Земли $\sim 0.5 \cdot 10^{-3}$ Зв) эквивалентен дозе ($\sim 0.5 \cdot 10^{-3}$ Гр). Основанием к такому допущению служит то обстоятельство, что один зиверт, и один грей, - оба равны 10^4 эрг/г.

При построении зависимости: «радиационная доза – модуль геомагнитного поля» учтем величины общепринятых значений дозы. Будем считать, приближенно, что при уменьшении модуля геомагнитного поля в 100 раз, радиационная доза возрастает, по крайней мере, не менее чем в 100 раз. В действительности, увеличение дозы может быть даже больше. Докажем это утверждение. Энергия частиц, отклоняемых геомагнитным полем E примерно пропорциональна величине геомагнитного поля B : $E \sim B$. На заряженную частицу, попадающую в магнитное поле, как известно, действует сила Лоренца $F = Z evB$, равная центробежной силе mv^2/R , иначе: $mv = Z evR$. Переходя к более удобным единицам, получаем: $E = 300 ZBR$, где: E – энергия частицы в МэВ, Z – заряд

частицы, B – индукция магнитного поля в Тл, R – радиус кривизны траектории частицы в м, e – заряд электрона, v – скорость частицы, m – её масса.

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 высыпание 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 $F = ZevB$, равная центробежной силе mv^2/R , иначе: $mv = ZevR$. Если E – энергия частицы в МэВ, Z – заряд частицы, B – индукция магнитного поля в Тл, R – радиус кривизны траектории частицы в м, e – заряд электрона, v – скорость частицы, m – её масса, то получаем: $E = 300 ZBR$.

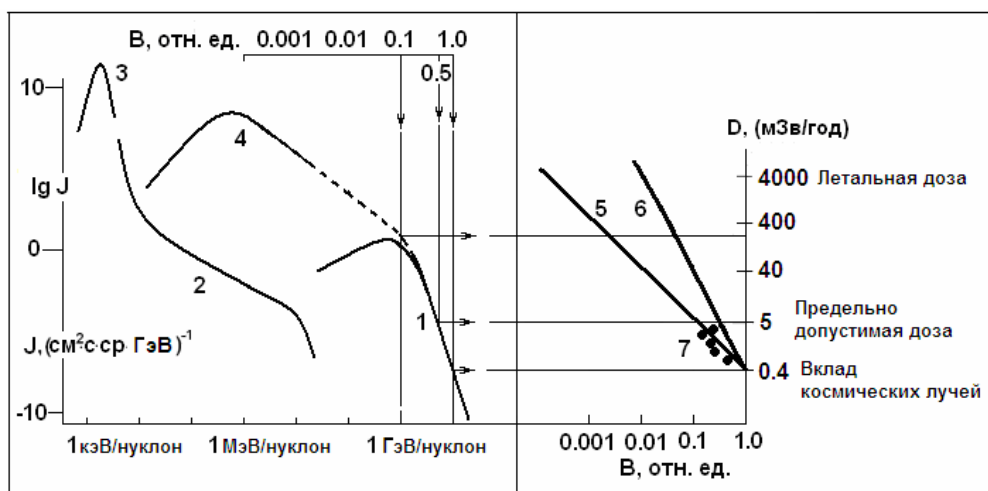


Рис. 21-7. Плотность потока КЛ, J (слева), и наведенная ими на поверхности Земли доза D (справа), в зависимости от энергии КЛ E : 1 – галактические; 2 – солнечные; 3 – солнечный ветер; 4 – частицы из радиационного пояса. Шкала вверху: величина модуля геомагнитного поля (модуль современного поля $B = 1$), 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)

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.) до $D \sim B^{-2}$ (линия 6). На этом рисунке, на шкале $\lg D$ отмечены три характерных значения дозы: 0.4 мЗв/год – вклад галактического космического излучения, 5 мЗв/год – предельно-допустимая доза для жителей России, ~ 4 Зв – летальная доза, 50-процентное поражение населения.

21. 7. Бериллий-10.

Анализируя пробы льда, учёные стремятся выяснить, какое количество радиоактивного бериллия-10 содержалось в атмосфере в разное время. Бериллий-10 возникает под воздействием космических высокоэнергетических частиц, бомбардирующих атмосферу Земли. В периоды повышенной активности Солнца, когда на его поверхности образуется большее, нежели обычно, количество пятен, магнитное поле светила защищает Землю от этих частиц, так что бериллий-10 образуется в меньших количествах.

Многие ученые считают, что изотопы бериллия ^{10}Be и ^7Be образуются не в недрах Земли, а в атмосфере – в результате воздействия космических лучей на ядра азота и кислорода. Незначительные примеси этих изотопов обнаружены в дожде, снеге, воздухе, в метеоритах и морских отложениях.

Однако если собрать воедино весь ^{10}Be , находящийся в атмосфере, водных бассейнах, почве и на дне океана, то получится довольно внушительная цифра – около 800 т.

Изотоп ^{10}Be (период полураспада $2,5 \cdot 10^6$ лет) представляет исключительный интерес для геохимии и ядерной метеорологии. Рождаясь в атмосфере, на высоте примерно 25 км, атомы ^{10}Be вместе с осадками попадают в океан и оседают на дне. Зная концентрацию ^{10}Be во взятой со дна пробе и период полураспада этого изотопа, можно вычислить возраст любого слоя на дне океана.

Бериллий-10 аккумулируется также в морских илах и ископаемых костях (кости сорбируют бериллий из природных вод). В связи с этим возникло предположение о возможности определения возраста органических остатков по ^{10}Be . Дело в том, что довольно широко освоенный радиоуглеродный метод непригоден для определения возраста образцов в интервале $10^5 \dots 10^8$ лет (из-за большой разницы между периодами полураспада ^{14}C и долгоживущих изотопов ^{40}K , ^{82}Rb , ^{232}Th , ^{235}U и ^{238}U). Изотоп ^{10}Be как раз «заполняет» этот разрыв.

Непрерывные астрономические наблюдения солнечных пятен ведутся с момента изобретения телескопа, т.е. с начала семнадцатого столетия. Для определения интенсивности появления солнечных пятен в предшествующую эпоху группа геофизиков из университета Улу (Финляндия) и Института аэронамии им. Макса Планка (Германия) под руководством Ильи Усоскина разработала физическую модель, позволяющую оценить количество пятен на Солнце в различные эпохи по содержанию изотопа бериллия в пробах льда, взятых в Антарктике и в Гренландии.

Исследовалось содержание изотопа бериллий-10, образующегося в атмосфере Земли под действием бомбардирующих ее высокоэнергетичных заряженных частиц. При росте солнечной активности рост интенсивности собственного магнитного поля Солнце приводит к уменьшению интенсивности космических лучей, и количество образующегося бериллия-10 снижается.

Результаты исследования оказались весьма впечатляющими. По мнению Майкла Локвуда из Лаборатории Резерфорда-Эплтона, и раньше имелись свидетельства того, что в наши дни бериллий-10 образуется в атмосфере в значительно меньших количествах, чем прежде, однако корреляция между количеством бериллия и числом солнечных пятен оказалась поразительной. "Мы живем в момент, когда Солнце ведет себя крайне необычно", - утверждает он.

Новые данные также в определенной степени противоречат расхожим представлениям о связи солнечной активности и процессов глобального потепления. Результаты исследования, проведенного группой Усокина, могут быть восприняты как подтверждение того, что потепление на Земле, наблюдаемое на протяжении последнего столетия, может быть связано с изменениями солнечного излучения. Связь между изменениями активности магнитного поля Солнца и климатическими процессами на Земле остается по-прежнему неясной.

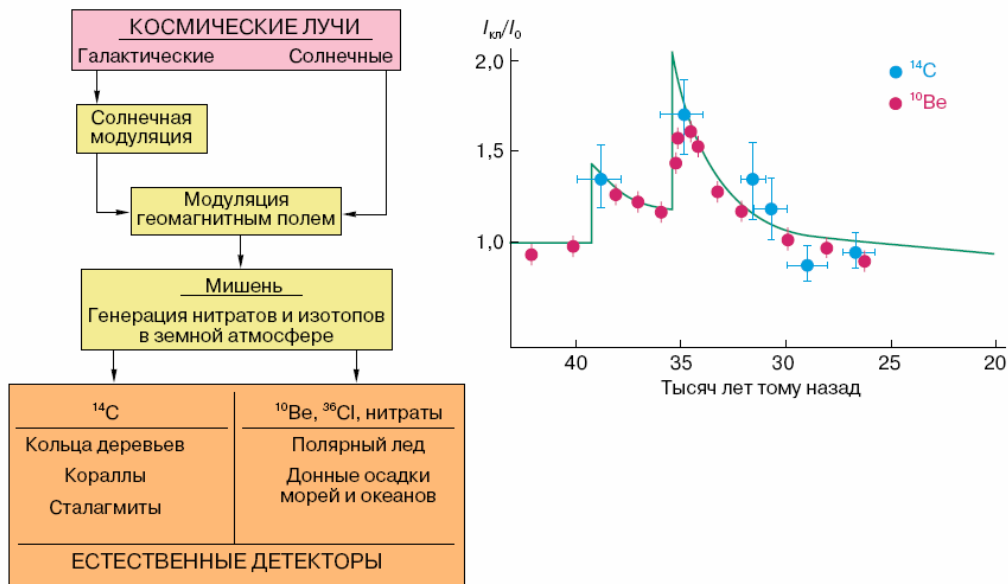


Рис. 21-8. Принцип работы естественных детекторов космических лучей. Космогенный след взрыва Сверхновой звезды в атмосферном радиоуглероде и ^{10}Be , I_{KL}/I_0 – относительная интенсивность космических лучей (Кочаров, 1996).

21. 8. Изменения радиационного фона Земли в прошлом.

Обратим внимание на данные, полученные рядом авторов по изучению временного распределения концентрацией изотопа ^{10}Be в осадочных породах. Рисунок 12-9 (Aldahan, Possnert, 2003, - с увеличением масштаба) демонстрирует связь между геомагнитными экскурсами и концентрацией изотопа ^{10}Be . В работах (Robinson, et al., 1995; Aldahan, Possnert, 2003; Frank et al., 1997) показано, что этот изотоп является индикатором интенсивности галактических космических лучей, достигнувших поверхности Земли и оставивших «следы» в осадках. Использование именно этого изотопа (^{10}Be) связано с тем, что его концентрация в породах земной коры очень мала и появление этого изотопа полностью определяется интенсивностью космических лучей, т.к. ^{10}Be получается при бомбардировке ГКЛ атомов атмосферного азота.

Способность галактических космических лучей (ГКЛ) «пробить» толщу атмосферы и достигнуть земной поверхности зависит от их энергии, величины геомагнитного поля Земли и широты «точки приема ГКЛ», т.к. вектор модуля поля изменяется в зависимости от географической (магнитной) широты места, в котором регистрируются «следы» ГКЛ. Например, для современного значения величины геомагнитного поля, в области экватора энергия частиц должна быть порядка (и более) 14 ГэВ, на широте 40° энергия частиц попадающих на Землю снижается до 4 ГэВ, а на широте 60° - 0.5 ГэВ и т. д. (эффект геомагнитного обрезания). Очевидно, что энергия и плотность потока ГКЛ, которые могут достигнуть поверхности Земли, может возрасти неоднократно в том случае, если на некотором пространстве земной поверхности величина геомагнитного поля окажется практически равной нулю. Принято считать, что в результате ядерной реакции протонов ГКЛ с атомами азота атмосферы образуется очень редкий в литосфере изотоп ^{10}Be . Его

наличие свидетельствует о присутствии ГКЛ, а его концентрация пропорциональна плотности потока.

Отношение изотопов $[^{10}\text{Be}]/[^7\text{Be} + ^9\text{Be} + ^{10}\text{Be}] = 0.028$ (Aldahan, Possnert, 2003) показывает, что ГКЛ проникали сквозь атмосферу и попадали в почву. ГКЛ проходят толщу вещества атмосферы 5 г/см^2 и после этого средняя концентрация частиц ГКЛ составляет 0.2 см^{-3} . Таким образом, наличие повышенной концентрации ^{10}Be может быть индикатором того, что в определенное время, в определенном пространстве Земли, геомагнитное поле имело существенно меньшую величину, чем обычно. Известно, что увеличение концентрации изотопа ^{10}Be в осадочных породах совпадает по времени с прохождением экскурсов и инверсий (Raisbeck et al., 1985; Robinson, et al., 1995; Aldahan, Possnert, 2003; Frank et al., 1997).

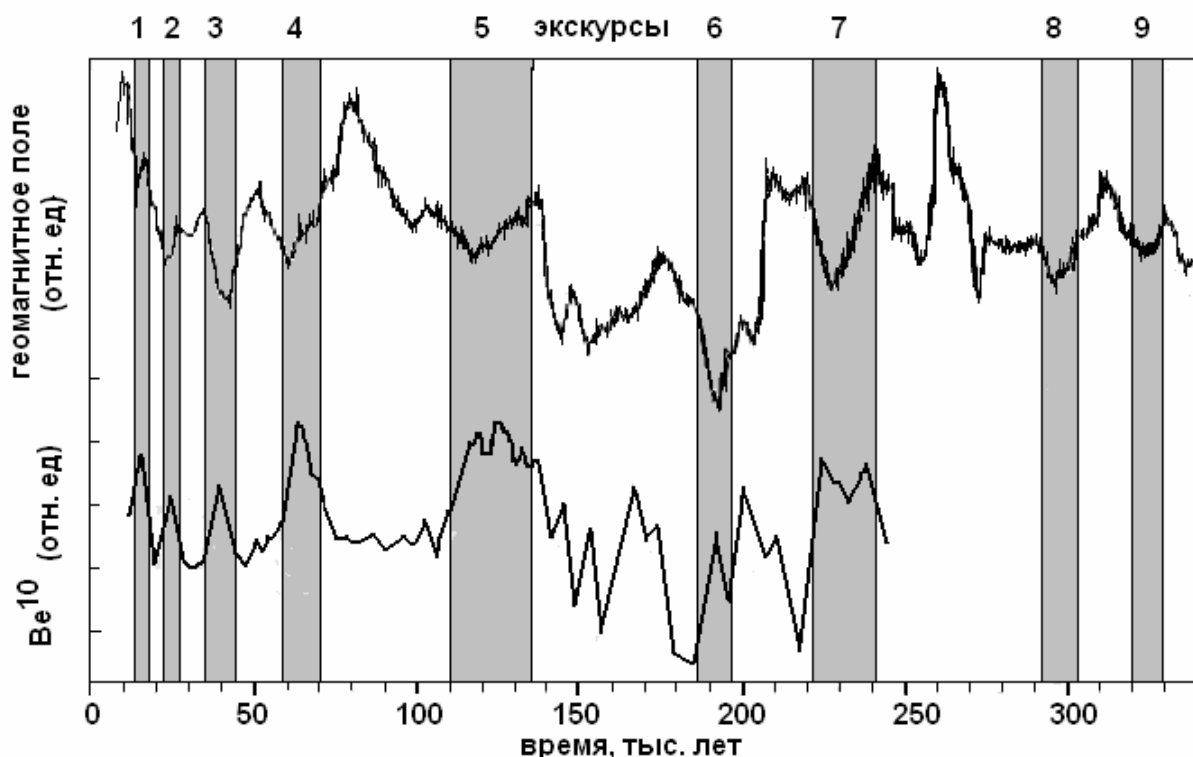


Рис. 21-9. Интенсивность геомагнитного поля и концентрация изотопа ^{10}Be в осадках. Вертикальные полосы – понижение геомагнитного поля в периоды экскурсов (слева направо): Gothenburg (1); Mono Lake (2); Laschamp (3); Kargopolovo (4); Blake (5); Biwa – I (6); Jamaica (7); Biwa – II (8); Biwa – III (9).

21. 9. Радиация и климат.

Возможная связь между изменениями климата и вековыми вариациями геомагнитного поля обсуждается уже много лет. Обычно рассматривается корреляция между изменениями климата и вековыми вариациями магнитного поля Земли, инверсиями и экскурсами. При экскурсах, в отличие от инверсий, после смены полярности геомагнитное поле вскоре ее восстанавливает. Общепризнанной является связь глобальных климатических изменений с экскурсами геомагнитного поля, но выводы различны. Широко известна концепция (Christl et al., 2004), в которой космические лучи рассматриваются, как ответственные за ионизацию атомов атмосферы, и поэтому в период экскурса, сопровождающегося уменьшением интенсивности поля и, как следствие, усилением проникающего в атмосферу потока космических лучей, должно развиваться похолодание за счет интенсивного образования облаков, имеющих высокое альбедо. Согласно этой гипотезе, периоды потепления должны совпадать с минимальными

потоками космических лучей, и наоборот, что и характеризует некоторые экскурсы хрона Брюнес. Наряду с этим подтвержденными являются факты потеплений (Svensmark, 2007; Guskova et al., 2007), совпадающих с экскурсами Лашамп и Гетенбург.

Связь между инверсиями магнитного поля Земли и биологической эволюцией обсуждалась ранее. Предложенные способы влияния инверсий на эволюцию жизни включали увеличение уровня мутаций из-за повышенного уровня радиации в эти периоды и изменений климата, приводивших к вымиранию фауны. Близкое совпадение по времени оледенений с этапами быстрого массового вымирания и одновременного или последующего расцвета различных групп организмов обсуждается в работе (Салоп, 1977), где эффективная мутагенная жесткая радиация от вспышек Сверхновых рассматривается, как непереносимое условие эволюции. Автор (Tsacas, 1984) считал, что инверсии и экскурсы приводят к мутациям регуляторных генов, чем объясняется отсутствие переходных форм, в то же время многие виды исчезают из-за усиления генетической нагрузки и экстремальных условий окружающей среды. Многие авторы обнаруживают временную корреляцию резких изменений климата с революционными событиями в эволюции фауны и человека, принимая, что климатические потепления и похолодания вызывали исчезновение одних видов и способствовали появлению новых, лучше адаптированных. Однако стресс от изменений в окружающей среде не дает механизма, согласно которому он мог бы оказывать селективное давление на предка человека, существующего в то время, и приводить к появлению нового семейства или вида (Behrensmeyer, 2006). До настоящего времени утверждалось, что достаточное экранирование от космического излучения, как первичного, так и вторичного обеспечивает атмосфера, и, если бы даже вся Земля подверглась воздействию такого же потока космических лучей, как её высокоширотная область, биологический эффект был бы незначительным. Однако авторы работы (Белишева, Гак, 2002) представили экспериментальные данные, свидетельствующие о значении вариаций космических лучей для состояния биосистем. Исследования проводились в приполярной области, где минимальная величина горизонтальной компоненты геомагнитного поля не противодействует проникновению космического излучения в атмосферу, и во время интенсивной вспышечной активности Солнца у поверхности Земли резко увеличивается радиационный уровень, по разным событиям величина увеличения достигает нескольких порядков (Grießmeier et al., 2005). Экспериментами на клеточных культурах была показана сопряженность феномена массового слияния клеток с вариациями космических лучей, и авторы делают вывод, что возрастание потока космических лучей может радикально менять свойства живых объектов, инициируя в них процессы реорганизации генетического материала, что, по мнению авторов, может иметь отношение к механизмам эволюции. Оценкой связи плотности атмосферы с величиной уровня радиации (Grießmeier et al., 2005) на поверхности планеты во время солнечных вспышек, доказано, что плотность земной атмосферы позволяет ожидать биологических эффектов вторичной радиации от проникающего космического излучения во время мощных протонных событий, когда более половины площади земной поверхности подвергается воздействию излучения. В такой ситуации необходимо выяснить, насколько правомерны оценки, касающиеся роли космического излучения в изменениях климата и эволюции жизни во время экскурсов и инверсий геомагнитного поля.

Наиболее интересные и достоверные результаты по изменению климата были получены при бурении ледников Антарктиды и Гренландии. Авторы (Petit et al., 1999), при анализе кернов льда этих ледников, обнаружили, что за предыдущие 420 тыс. лет на Земле произошло четыре цикла, в течение которых температура поверхности Земли четырежды сначала плавно, за время, примерно, 100 тыс. лет, уменьшалась, а затем довольно резко возрастала. Синхронно возрастал и уменьшался объем ледников на Земле. Максимальная концентрация пылевых частиц в кернах льда наблюдалась в слоях,

соответствующих периодам похолодания (рис. 21-10), причем, оказалось, что чем выше концентрация пыли, тем ниже температура. Таких данных опубликовано довольно много, но ни в тексте статей, ни на рисунках, невозможно определить, какой процесс происходит раньше: увеличение концентрации пыли предшествует похолоданию, или наоборот? Нам не встречались так же работы, в которых оценивался бы коэффициент корреляции этих зависимостей. Поэтому, оцифровав данные по вариациям температуры и содержания пыли с интервалами между отсчетами, равными 1 тыс. лет, мы рассчитали функцию их взаимной корреляции и получили, что максимального значения -0.56 она достигает при нулевом временном сдвиге и 95 %-ном доверительном интервале $(-0.62, -0.49)$. Это позволяет сделать вывод о том, что с высокой степенью значимости температура и концентрация пыли в кернах льда менялись практически одновременно и в противофазе. Ход временных вариаций температуры, концентрации пыли и модуля геомагнитного поля показан на рис. 12-10. Видно, что экскурсы сопровождаются минимальными значениями интенсивности поля и повышенными концентрациями космогенного нуклида ^{10}Be в слоях льда и осадочных пород. Об этом говорят и другие авторы, указывая на почти двукратное возрастание потока космических лучей при 10%-ном уменьшении интенсивности геомагнитного поля (Christl et al., 2004). Из рис. 21-10 видно, что в периоды экскурсов 1, 5, 7, 8 и 9 происходит уменьшение концентрации пыли и потепление, в периоды экскурсов 3, 4, 6 концентрация пыли была незначительной, и происходило похолодание, что позволило нам предположить, что экскурсы начинались в разных экологических условиях.

Обнаруженные нами корреляции вынуждают рассматривать два возможных варианта: 1) похолодание на Земле вызвало пылевые бури, но тогда геомагнитное поле и концентрация ^{10}Be в эту модель «не вписываются» и 2) периодические мощные извержения вулканов и супервулканов привели к заселению стратосферы пылью, которая экранировала солнечное излучение, что привело к похолоданию. Во время экскурса, когда интенсивность геомагнитного поля понижалась, проникающие космические лучи разрушали пылевой слой в стратосфере, что привело к осаждению пыли и быстрому потеплению. Соответственно, если экскурс начинался в условиях прозрачной стратосферы, то развивался сценарий формирования облаков, роста альбедо и похолодания. В настоящее время достаточно сложно оценить, насколько правдоподобны 1-ый и 2-ой варианты. Первый следует из теории Миланковича и в настоящее время считается предпочтительным. Однако теория Миланковича не находит объяснения многим известным фактам, в частности, очень быстрым изменениям климата, как потеплениям, так и похолоданиям. Поэтому мы рассмотрим альтернативный, второй вариант. Однако, для того, чтобы этот вариант имел необходимые основания, следует доказать, что в периоды экскурсов и инверсий значительно возрастал уровень радиации.

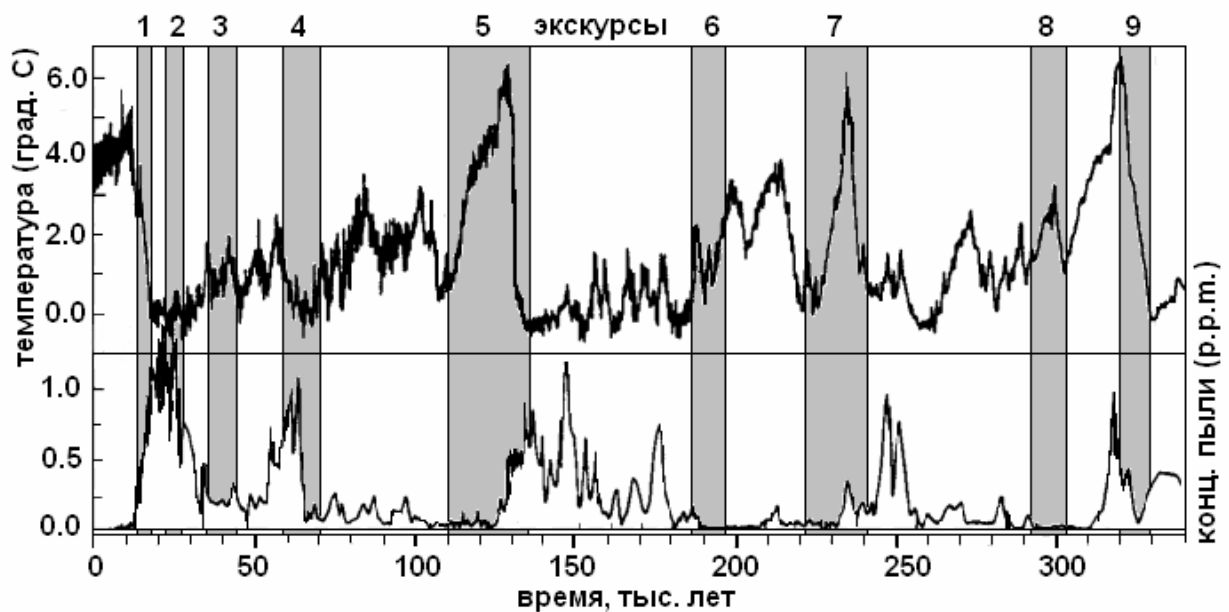


Рис. 21-10. Изменение температуры поверхности Земли и относительной концентрации пыли во льду. Вертикальные полосы – понижение геомагнитного поля в периоды экскурсов (слева направо): Gothenburg (1); Mono Lake (2); Laschamp (3); Kargopolovo (4); Blake (5); Biwa – I (6); Jamaica (7); Biwa – II (8); Biwa – III (9).

21. 10. Радиация и жизнь.

Рассмотрим, как изменение экологических условий, а именно, повышение уровня радиации и изменение климата, в периоды инверсий и экскурсов отразилось в эволюции жизни и, особенно, эволюции человека. Антропологи и генетики согласны в том, что все известные виды гоминид возникли в Африке. Антропологи (Wood, 2002) аргументируют этот вывод тем, что возраст неафриканских находок ископаемых останков гоминид не превышает 2 млн. лет. Тогда как в Африке найдены останки, имеющие возраст около 6 - 7 млн. лет. Генетические исследования эволюционной истории человечества так же указывают на Африку, как на место зарождения человека (Кузнецов, 2008).

Установленные даты в эволюции человека сопоставлены с возрастом экскурсов и инверсий геомагнитного поля:

Экскурсы и инверсии	млн. лет	События в эволюции человека
Моно Лэйк	0.03-0.04	исчезновение Неандертальцев
Лашамп	0.05	мутация гена <i>FOXP2</i> , отвечающего за речь
Блэйк	0.1	общий предок современного человека (по Y-хромосоме)
Ямайка	0.23	общий предок современного человека (по мтДНК)
Имперор, Биг лост	0.5	разделение линий человека и неандертальцев
Матуяма - Брюнес	0.8	возраст предка человека по бета-глобину
Реньон	2.1- 2.2	появление <i>Номо erectus</i>
Гаусс - Матуяма	2.4 - 2.8	мутации, обеспечившие появление <i>Номо erectus</i>
Гильберт - Гаусс	3.5	разделение линии человека на грацильную и массивную
Эпоха 5 - Гильберт	5	разделение линий человека и шимпанзе
Эпоха 6 - эпоха 5	7.2	отделение линии гориллы от линии человека

Следует пояснить некоторые табличные сведения. Так, две мутации, обнаруженные у всех обследованных современных людей, произошли во время инверсии Гаусс-Матуяма, они предшествовали увеличению объема мозга у предков человека и появлению *Homo erectus* (Кузнецов, 2008) Одна инактивировала ген, кодирующий наработку сахарозы на поверхности клетки, причем у неандертальцев эта мутация отсутствует, а вторая - ген миозина, в результате которой произошло значительное уменьшение объема и силы мощных жевательных мускулов, характерных для человекообразных обезьян. По мнению авторов, были ликвидированы анатомические ограничения роста объема черепной коробки, и, как следствие, произошло трехкратное увеличение объема головного мозга представителей линии *Homo*. Творческие способности человека, как считают авторы, имеют биологическую причину в виде мутации гена FOXP2, который, как обнаружено (Klein, 2003; Evans et al., 2005), отвечает за речевые способности человека, его коммуникабельность, и у неандертальцев эта мутация отсутствует.

Эволюционные события в африканской и европейской фауне, ссылки в (Кузнецов, 2008) синхронны событиям в эволюции человека.

События в эволюции африканской и европейской фауны	Время, млн. л.
Разделение слонов на африканских и азиатских (мтДНК)	5.0 (6.0)
Разделение мтДНК линий мамонта и азиатского слона	4.0
Разделение африканских слонов на два вида	2.6
Разделение семейства африканской коровьей антилопы на виды	5.0, 0.5, 0.4, 0.2, 0.13
Разделение европейских зябликов на группы	0.06
Разделение европейских голубых сорок на два вида	0.070
Разделение африканской <i>Pediculus humanus</i> на два вида	0.070

В качестве примера можно привести и обнаруженную палеонтологами замену больше половины африканской фауны. На фоне оледенения в северном полушарии в интервале 2.8 до 2.5 млн. лет назад в Африке зафиксировано сильное похолодание, а, начиная с 2.5 млн. лет, происходит резкое увеличение разнообразия фауны, в том числе и представителей линии *Homo* (Кузнецов, 2008). На геомагнитной шкале дата 2.5 млн. лет соответствует инверсии Гаусс-Матуяма.

Суммируя вышесказанное, можно сделать вывод, что в периоды экскурсов и инверсий геомагнитное поле значительно уменьшается и космическое излучение проникает в атмосферу, меняя оптические свойства стратосферы и вызывая глобальные изменения климата, и также значительно увеличивая радиационный фон на поверхности Земли. Увеличение радиации в эти периоды оказывается достаточным для того, чтобы иметь биологические эффекты. Доминирующее воздействие роста радиационного фона на эволюцию жизни, мы попытались объяснить на основе теории дрейфа магнитных полюсов Земли во время инверсий и экскурсов (Kuznetsov, 1999). В этой работе показано, что в период инверсий и экскурсов магнитные аномалии остаются источниками магнитного поля, поскольку в моменты инверсий величина поля значительно понижается, но никогда не бывает равной нулю, при этом величина остаточного поля не равномерна по земной поверхности: она заметно выше в областях магнитных аномалий. Так, анализ данных (Кузнецов, 2008) показал, что уменьшение модуля поля в момент инверсии Матуяма-Брюнес и предшествующего ей экскурса Хурамильо, было различным для различных регионов. Пробы брались в районах расположения базальтов, излившихся на

дно океанов вблизи Индонезии (0° , 160°E) и западного берега Африки (0° , 20°W). В первом случае уменьшение модуля поля было не более чем десятикратным от его нормальной величины, а во втором понижение модуля было большим, - не менее чем тридцатикратным. Эти данные подтверждаются другими аналогичными наблюдениями. Так, показано, что в момент этой инверсии в базальтах, излившихся в районе острова Борнео (7°N , 122°E), модуль поля уменьшился, примерно, в 5 - 7 раз. Аналогичное по величине уменьшение было зафиксировано вблизи побережья Калифорнии, в то время как, значительное понижение модуля было зарегистрировано вблизи западного побережья Африки, где было обнаружено уменьшение модуля геомагнитного поля в периоды инверсии Матуяма-Брюнес и экскурса Хурамильо не менее чем в сто раз. Приведенные результаты соответствуют нашему утверждению, что понижение величины геомагнитного поля в моменты инверсий и экскурсов неодинаково в различных регионах, и что этот эффект связан с расположением глобальных магнитных аномалий. Все они, кроме Бразильской аномалии, располагаются в приполярных регионах, обеспечивая для близлежащих территорий в период протекания инверсий и экскурсов защитные свойства магнитного поля. Нашу концепцию подтверждает так же полученная в (Clement, 2004) широтная зависимость длительности периода инверсии Матуяма-Брюнес: оказывается, что чем ближе к экватору точки определений, тем короче время смены полярности. Из вышесказанного можно сделать такой вывод. Поскольку Африка и Европа удалены от глобальных магнитных аномалий, то на эти континенты во время инверсий и экскурсов не распространяются защитные свойства магнитного поля аномалий. В этих регионах воздействие факторов, связанных с вариациями поля проявляется с наибольшей силой, а именно, максимальное падение интенсивности геомагнитного поля обеспечивает наибольший рост космического излучения, проникающего в атмосферу, который в свою очередь генерирует в этих регионах радиационный уровень выше, чем остальных.

21. 11. Современный уровень радиации.

В течение всего времени приборной регистрации величины момента геомагнитного поля, он стабильно уменьшается. Это не может не сказаться на уровне радиации. Рис. 12-11 показывает, что за последние 100 лет величина концентрации Be-10 выросла примерно в 3 раза относительно предыдущих лет. Следовательно, в течение последних 300 лет уровень радиации на Земле – увеличивается.

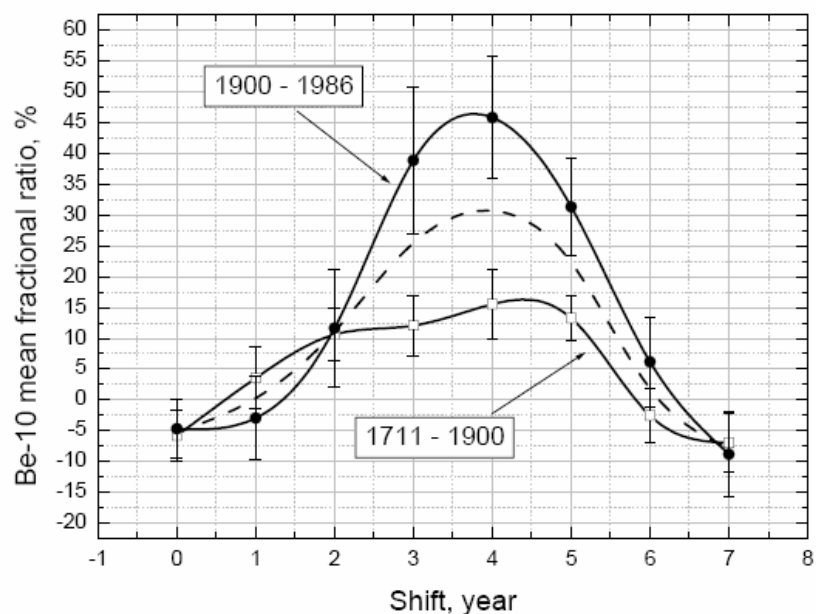


Рис. 21-11. Концентрация Be-10 в зависимости от сдвига времени для двух эпох. Штриховая линия – усреднение (Nikitin et al., 2005).

Литература.

- Бердонос С.С., Сапожников Ю.С. Ионизирующее излучение и окружающая среда. Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7(2). С. 40-46.
- Белишева Н.К., Гак Е.З. Значение вариаций космических лучей для функционирования биосистем // В кн.: Сб. научных докл. VII Межд. конф. «Экология и развитие Севера-Запада России». - Санкт-Петербург. - 2002. - С.118-129.
- Герасимова Н. В., Блинов Б. К., Марченко Т. А. и др. Чернобыльская катастрофа. Итоги и проблемы преодоления ее последствий в России 1986-2001. 2001.
- Гуськов Е.П. Генетика, радиация и здоровье.
URL: <http://www.eco-pravda.km.ru/science/iar15s3.htm>
- Кочаров Г.Е. Экспериментальная плеоастрофизика: достижения и перспективы. Соросовский образовательный журнал. 1996. № 11. С. 66-72.
- Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. - Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. - 336 с.
- Салоп Л.И. О связи оледенений и этапов быстрых изменений органического мира с космическими явлениями // Бюллетень М. о-ва исп. природы, отд. Геологии. - 1977. - Т. 52, № 1. - С. 5-32.
- Aldahan A., Possnert G. Geomagnetic and climatic variability reflected by ^{10}Be during the Quaternary and late Pliocene. *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. doi: 10.1029/2002GL016077.
- Behrensmeier A.K. Climate change and human evolution // *Science*. - 2006. - V. 311. - P. 476-478.
- Christl M., Mangini A., Holzkamper S., Spötl C. 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. - V. 66. - P. 313–322.
- Clement B.R. Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude // *Nature*. - 2004. - V. 428. - P. 637-640.
- Evans P.D., Gilbert S.L., Mekel-Bobrov N. et al.. Microcephalin, a gene regulating brain size, continues to evolve adaptively in humans // *Science*. - 2005. - V. 309. - P. 1717-1720.
- Forster L., Forster P. et al. Natural radioactivity and human mitochondrial DNA mutations. *PNAS*. 2002. V. 99(21). P. 13950-13954.
- Frank M., Schwarz B., Baumann S., et al. A 200 kyr record of cosmogenic radionuclide production rate and geomagnetic field intensity from ^{10}Be in globally stacked deep-sea sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1997. V. 149. P. 121-129.
- Griepmeier J.-M, Stadelmann A., Motschmann U., Belisheva N.K. et al. Cosmic ray impact on extrasolar Earth-like planets in close-in habitable zones // *Astrobiology*. - 2005. - V. 5, № 5. - P. 587-603.
- Guskova, E. G., Raspopov O.M., Piskarev A.L., Dergachev V.A. Manifestation of the Gothenburg geomagnetic field excursion in the Barents Sea bottom sediments // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2007. - V. 47, № 6. - P. 781-786.
- Klein R.G. Whither the Neanderthals? // *Science*. - 2003. - V. 299. - P. 1525-1527.
- Kuznetsov V.V. A model of virtual geomagnetic pole motion during reversals // *Phys. Earth Plan. Inter.* - 1999. - V.115. - P. 173-179.
- Nikitin I., Stozhkov Yu, Okhlopov V., Svirzhevsky N. Do Be-10 and C-14 give us the information about cosmic rays in the past? 20th International Cosmic Ray Conference Pune. 2005. V.2. P. 243-246.
- Petit J. R., Jouzel J., Raynaud D. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. - 1999. - V. 399. - P. 429-436.
- Raisbeck G.M., Yiou F., Bourles D., Kent D.V. Evidence for an increase in cosmogenic ^{10}Be during a geomagnetic reversal. *Nature*. 1985. V. 315. P. 315-317.

- Robinson C., Raisbeck G.M., Yiou F., et al. The relationship between ^{10}Be and geomagnetic field strength records in central North Atlantic sediments during the last 80 ka. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1995. V. 136. P. 551-557.
- Svensmark H. Cosmoclimate: a new theory emerges. // *Astronomy & Geophysics*. - 2007. - V. 48, № 1. - P. 1.18–1.24. doi:10.1111/j.1468 4004.2007.48118
- Tsakas S.C. Geomagnetic reversals as a possible explanation for periods of punctuated speciation on Earth // *Genetics*. - 1984. - V. 107, № 3. - PT.2. s108.
- Vanhellemont F., Fussen D., Bingen C. Cosmic rays and stratospheric aerosols: Evidence for a connection? *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 10-1 – 10-4.
- Wood B. Palaeoanthropology: Hominid revelation from Chad // *Nature*. - 2002. - V. 418. - P. 133-135