

## Лекция 20. УРОВЕНЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИАЦИИ. РАДИАЦИЯ И ЖИЗНЬ

В 20-ой лекции 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.

### 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

### **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 высокоэнергичных 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  $\sim 900$  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.

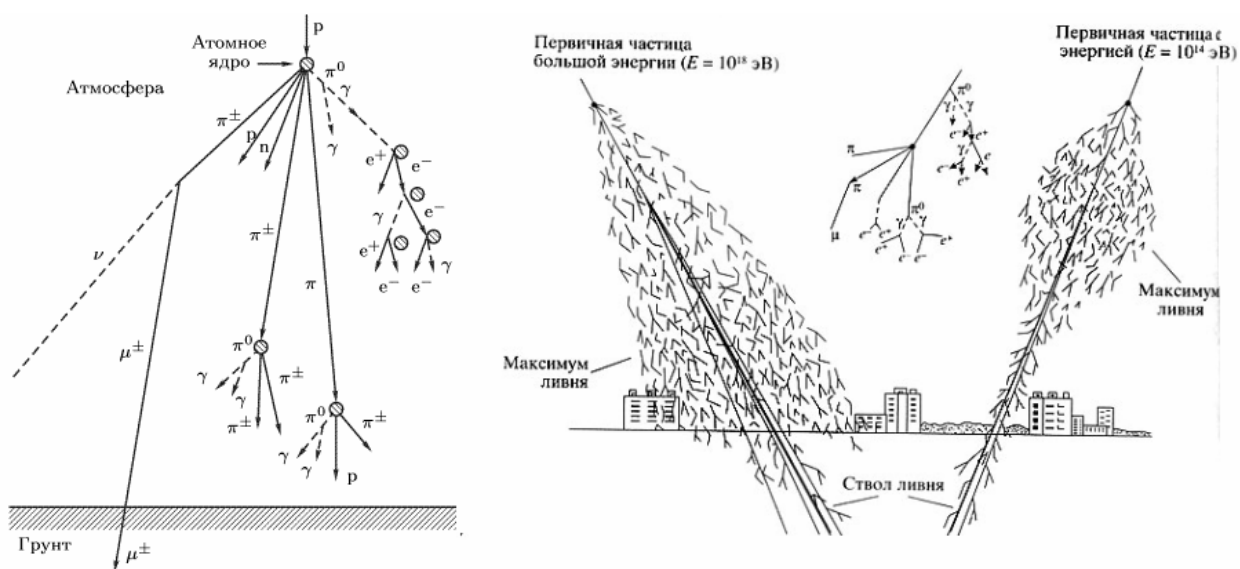


Рис. 1. Схема взаимодействия протона космических лучей с атомами азота и кислорода атмосферы. Атмосферный ливень космических лучей (справа).

### 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  $6 \times 10^{19}$  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<sup>2</sup>, 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.

### ***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  $50^\circ$  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, приходящих 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. 2).

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 в возрастанию вторичного нейтронного излучения.

**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.

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.

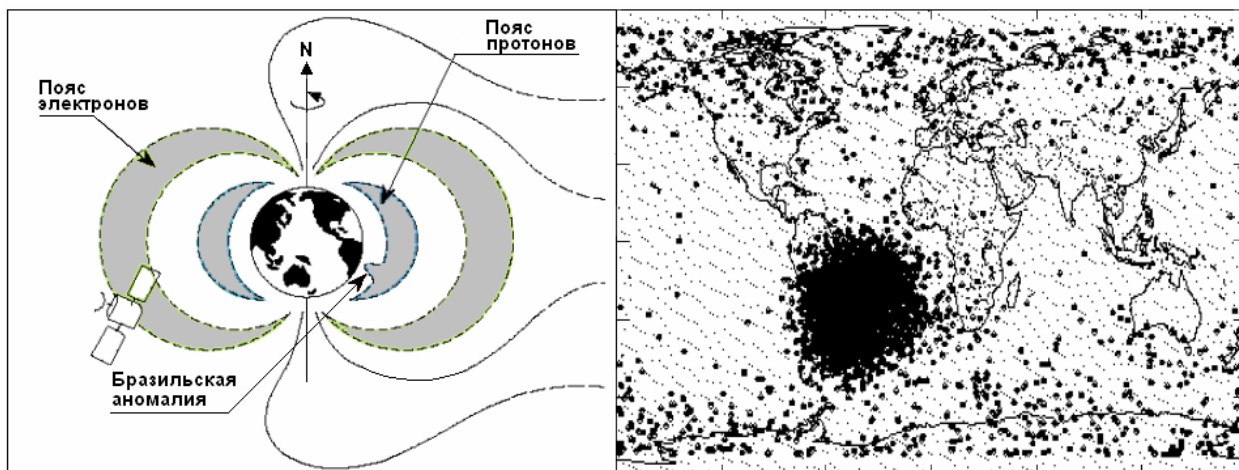


Рис. 2. Слева - радиационные пояса Земли. Особенность строения внутреннего пояса в районе Бразильской магнитной аномалии. Справа - выпадение заряженных частиц, регистрируемых космическим аппаратом UoSAT.

### 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. Потoki направленных от Солнца заряженных частиц солнечного ветра с энергиями от 1 эВ до 100 и более МэВ на Землю не попадают, т.к. отклоняются её магнитосферой (см. рис. 21-6).

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  $\sim 10$  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  $\pi$ -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  $1 \text{ эВ/см}^3$ . 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  $E \geq 1.5 \cdot 10^{10} \text{ эВ}$ , на геомагнитную широту  $51^\circ$   $E \geq 2.5 \cdot 10^9 \text{ эВ}$ . Интенсивность ГКЛ на экваторе меньше, чем в полярных широтах, это т.н. широтный эффект. В радиационных поясах: для частиц с энергией  $E > 30 \text{ МэВ}$  поток  $10^3 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ; для частиц  $E > 1 \text{ МэВ}$ , 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  $D = 0.01 \text{ Гр}$  ( $1 \text{ рад}$ ) происходит нарушение жизнедеятельности клеток. Принято считать  $D_0$ , как дозу, снижающую число выживших клеток в  $e$  раз. Для большинства делящихся клеток  $D_0 = (1.2 - 2) \text{ Гр}$ .  $1 \text{ Гр} = 10^4 \text{ эрг/г}$ . 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  $\gamma$  - излучения. Это так называемое вторичное космическое излучение достигает поверхности Земли.

Радиационный фон Земли складывается из:

- Космическое излучение составляет - 410 мкЗв;
- $\gamma$  - излучение  $^{40}\text{K}$  – 150 мкЗв;
- радионуклиды ториевого и уранового рядов – 160 и 100 мкЗв;
- космогенные нуклиды:  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{22}\text{Na}$  – 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 подвергнувшись 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  $\alpha$  - излучение гораздо опаснее  $\beta$  - или  $\gamma$  - излучений. Дозу следует умножать 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.

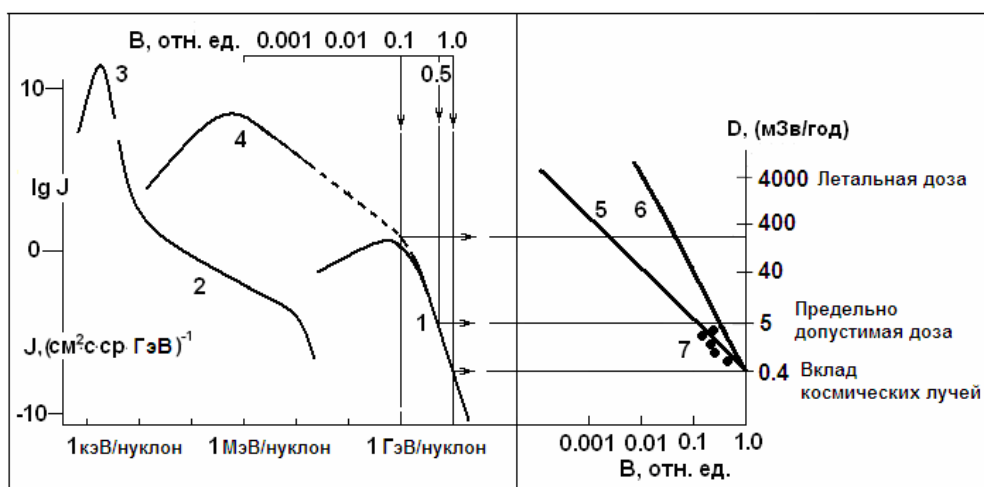


Рис. 3. Плотность потока КЛ,  $J$  (слева), и наведенная ими на поверхности Земли доза  $D$  (справа), в зависимости от энергии КЛ  $E$ : 1 – галактические; 2 – солнечные; 3 – солнечный ветер; 4 - частицы из радиационного пояса. Шкала сверху: величина модуля

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 ( $B$ )

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  $F = Z evB$ , равная центробежной силе  $mv^2/R$ , иначе:  $mv = Z evR$ . 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:  $E = 300 ZBR$ .

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,  $\sim 4$  Зв – летальная доза, 50-процентное поражение населения.

### **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  $^{10}\text{Be}$  и  $^7\text{Be}$  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  $^{10}\text{Be}$ , находящийся в атмосфере, водных бассейнах, почве и на дне океана, то получится довольно внушительная цифра – около 800 т.

Изотоп  $^{10}\text{Be}$  (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  $^{10}\text{Be}$  вместе с осадками попадают в океан и оседают на дне. Зная концентрацию  $^{10}\text{Be}$  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  $^{10}\text{Be}$ . 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  $^{14}\text{C}$  и долгоживущих изотопов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ ). Изотоп  $^{10}\text{Be}$  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 астрономии им. Макса Планка (Германия) под руководством Ильи Усокина 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.

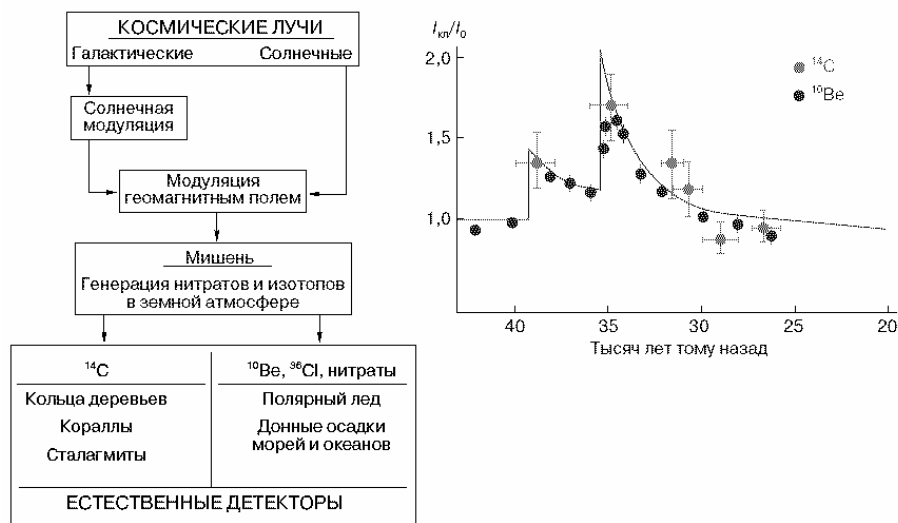


Рис.4. Принцип работы естественных детекторов космических лучей. Космогенный след взрыва Сверхновой звезды в атмосферном радиоуглероде и  $^{10}\text{Be}$ ,  $I_{\text{кл}}/I_0$  – относительная интенсивность космических лучей (Кочаров, 1996).

Результаты исследования оказались весьма впечатляющими. По мнению Майкла Локвуда из Лаборатории Резерфорда-Эпплтона, 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 Усоскина, 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.

### **Изменения радиационного фона Земли в прошлом.**

Обратим внимание на данные, полученные рядом авторов по изучению временного распределения концентрацией изотопа  $^{10}\text{Be}$  в осадочных породах. Рисунок 12-9 (Aldahan, Possnert, 2003, - с увеличением масштаба) демонстрирует связь между геомагнитными экскурсами и концентрацией изотопа  $^{10}\text{Be}$ . 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 ( $^{10}\text{Be}$ ) связано с тем, что его концентрация в породах земной коры очень мала и появление этого изотопа полностью определяется интенсивностью космических лучей, т.к.  $^{10}\text{Be}$  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  $40^\circ$  энергия частиц попадающих на Землю снижается до 4 ГэВ, а на широте  $60^\circ$  - 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  $^{10}\text{Be}$ . Его наличие свидетельствует о присутствии ГКЛ, а его концентрация пропорциональна плотности потока.

Отношение изотопов  $[\text{}^{10}\text{Be}]/[\text{}^7\text{Be} + \text{}^9\text{Be} + \text{}^{10}\text{Be}] = 0.028$  (Aldahan, Possnert, 2003) показывает, что ГКЛ проникали сквозь атмосферу и попадали в почву. ГКЛ проходят толщу вещества атмосферы  $5 \text{ г/см}^2$  и после этого средняя концентрация частиц ГКЛ составляет  $0.2 \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, наличие повышенной концентрации  $^{10}\text{Be}$  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  $^{10}\text{Be}$  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).

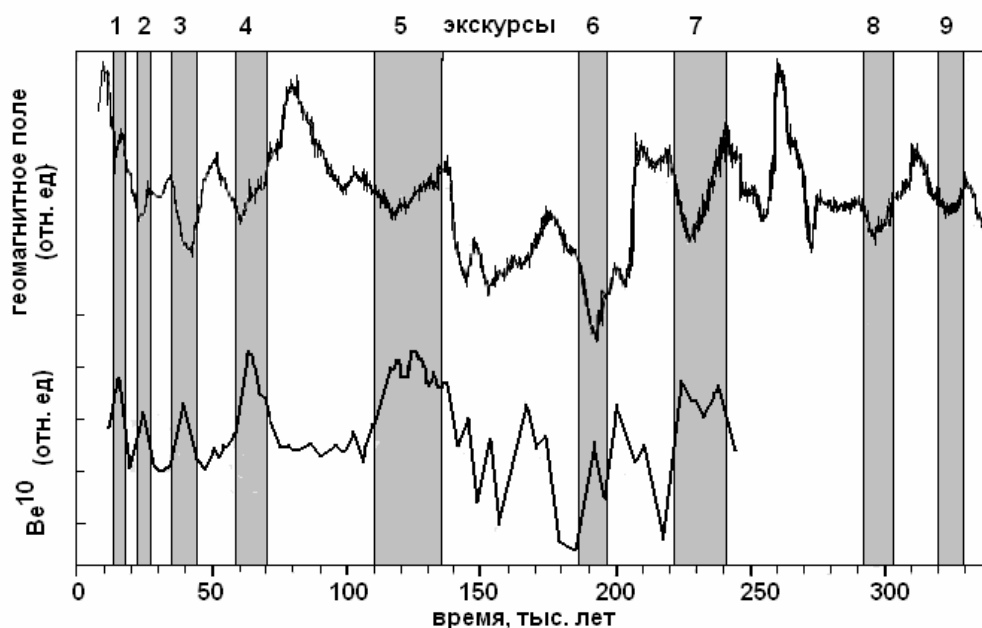


Рис.5. Интенсивность геомагнитного поля и концентрация изотопа  $^{10}\text{Be}$  в осадках. Вертикальные полосы – понижение геомагнитного поля в периоды экскурсов (слева направо): Gothenburg (1); Mono Lake (2); Laschamp (3); Kargopolovo (4); Blake (5); Biwa – I (6); Jamaica (7); Biwa – II (8); Biwa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

### 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 ( $0^\circ$ ,  $160^\circ\text{E}$ ) и западного берега Африки ( $0^\circ$ ,  $20^\circ\text{W}$ ). 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 ( $7^\circ\text{N}$ ,  $122^\circ\text{E}$ ), 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.

### 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.

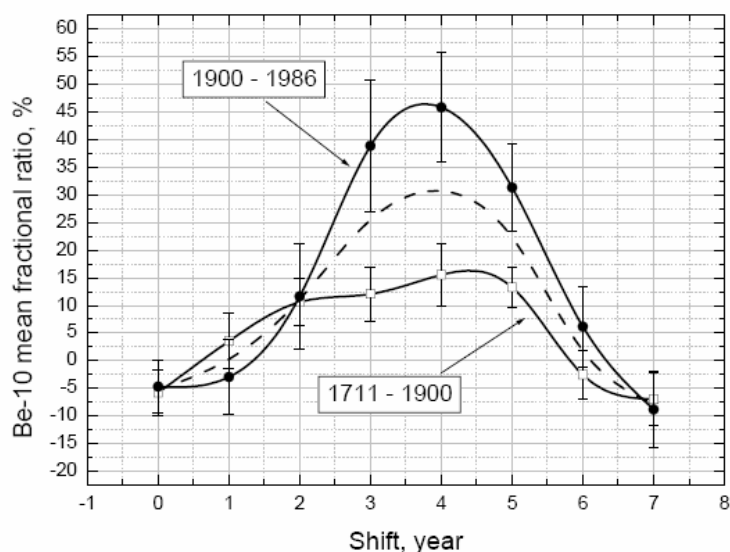


Рис. 6. Концентрация Be-10 в зависимости от сдвига времени для двух эпох. Штриховая линия – усреднение (Nikitin et al., 2005).

**Возникновение рас (географических популяций) и схема расселения.** Определение расы звучит примерно так: «раса – это большая популяция индивидов, у которых значительная часть генов общая и которую можно отличить от других рас по общему для нее генофонду». На основании числа аллелей, свойственных той или иной группе организмов, возможно определение генетического расстояния между ними. Оказалось, что для больших рас эта величина выражается числом 0,03. Это гораздо ниже значений, характеризующих подвиды (0,17–0,22) и тем более виды животных (0,5–0,6 и более). В животном мире генетическое расстояние, равное 0,03, соответствует отличиям местных популяций друг от друга.

Различия между расами объясняется естественным отбором. Прято считать, что естественный отбор является главным фактором эволюции внешних признаков (фенотипов). Он обуславливает приспособление к различным условиям окружающей среды. Однако чтобы действие отбора закрепилось, необходимо наличие репродуктивной изоляции. Существовал ли исторический период, когда все человечество было разделено на три более или менее изолированные группы?

На протяжении большей части последнего ледникового периода (около 100 тыс. лет назад) громадная площадь Земли была покрыта льдом. Гималаи и Алтайские горы с расположенными на них ледниками разделили Евразийский континент на три области, создавая тем самым условия для раздельной эволюции белых на западе, монголоидов на востоке и негроидов на юге. Современные области расселения трех больших рас не совпадают с теми областями, в которых они формировались, но это можно объяснить более поздними миграциями. По каким же признакам шел отбор? Скорее всего, это были приспособления к конкретным природно-климатическим условиям.

Традиционно выделяют три основные расы: европеоиды (или евразийская раса), негроиды (экваториалы) и монголоиды (азиатско-американская раса). Но многие антропологи считают, что с биологической точки зрения рас значительно больше - как минимум 8 или 10. В частности, можно назвать южноафриканскую (бушмены и готтентоты), австралоидную, айноидную, американоидную расу и ряд других. Их представители отличаются по некоторым существенным морфологическим признакам, таким как цвет кожи, глаз и волос, особенности строения лица и т.д. Существуют чисто биологические механизмы разделения на расы. Принято считать, (во-первых) для того, чтобы образовалась группа со своеобразным генофондом, необходима изоляция - тогда в силу принципа случайности мутаций (как по конкретному гену, так и по времени возникновения) группа начинает автоматически дивергировать, чему способствует также вероятностный характер закрепления новых мутаций. Считается так же (во-вторых), что в различных климатогеографических зонах в ходе адаптации и естественного отбора возникают признаки, способствующие выживаемости в данной области. Рассмотрим этот вопрос в контексте нашей модели, для чего обратимся к схеме возникновения человеческих рас (рис. 7).

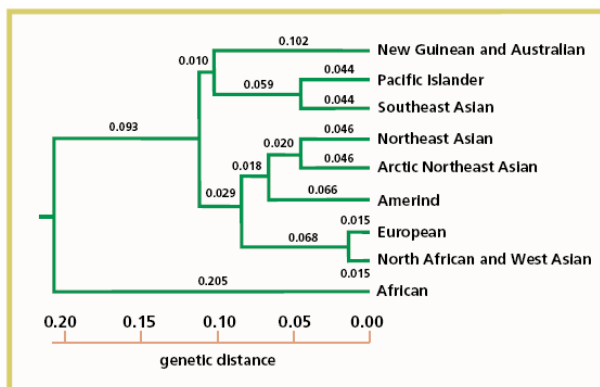


Рис. 7. Схема возникновения человеческих рас (Cavalli-Sforza, Feldman, 2003).



На схеме показано расхождение между расами в генетических расстояниях. Видно, что африканская раса не изменялась на дистанции 0.205, в то время как европейцы и североафриканцы подверглись трем бифуркациям. Последняя бифуркация соответствует дистанции 0.015. Генетические расстояния (ГР) определяются по частоте рекомбинаций между генетическими маркерами. Это количественная характеристика сравниваемых объектов (популяций, видов и т.п.), определяющая среднее число замен нуклеотидов в каждом локусе, которые произошли за время раздельной эволюции двух групп организмов; в настоящее время наиболее широко применяется метод расчета ГР по Нью (*Nei genetic distance*). Иногда ГР указывается в морганидах (сантиморганидах, сМ), иногда, - во временных интервалах (в млн. лет) между бифуркациями. На схеме выделены ГР: ~ 200 тыс. лет, ~100 тыс. лет, 46 и 15 тыс. лет. Эти даты - периоды прохождения соответствующих экскурсов эпохи Брюнес. Если совпадения не случайны и ГР действительно выражены во временных интервалах (в млн. лет), то разделение человечества на расы так же связано с повышением радиационного фона на Земле в периоды экскурсов (см. Табл. 2).

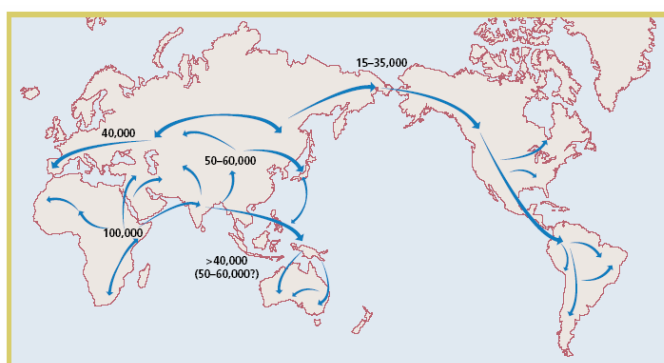


Рис. 8. Карта расселений (Cavalli-Sforza, Feldman, 2003).

Карта расселений, непосредственно связанных с возникновением рас показана на рис. 8. Человечество начало расселяться по материкам из Африки примерно 100 тыс. лет тому назад. Анализируя пути и сроки миграций, отметим две интересные детали. Первая касается заселения Австралии примерно 50-60 тыс. лет тому назад. Как следует из модели горячей Земли (Кузнецов, 1990), в это время в Австралию можно было перебраться практически по суше. Вторая деталь, аналогичная первой, относится к переселению наших предков через Берингов пролив, который, как сейчас известно, образовался сравнительно недавно, во время т.н. «Великого потопа», в момент таяния ледников сразу после экскурса Гетеборг, 15 тыс. лет тому назад. Именно поэтому последний срок переселения предков на Американский материк датируется временем этого экскурса.

**Почему Африка?** Один из принципиальных вопросов из области проблем эволюции человека заключается в том, почему местом рождения современного человека является Африка? Почему все попытки найти следы возникновения (но не миграции) гомо сапиенс на других континентах оканчивались безрезультатно? Почему первобытные люди стали расселяться из Африки? Почему именно в Африке находят следы генетических мутаций многих других биологических видов?

Ответом на эти вопросы было бы доказательство того, что именно в Африке радиационный фон в период инверсий и экскурсов был наибольшим, значительно превышающим фон на других континентах. Обратимся к опубликованным данным по поведению геомагнитного поля в периоды одних и тех же инверсий и экскурсов,

записанных в осадках или вулканических извержениях, произошедших в различных регионах Земли.

Авторы (Hartl, Tauхе, 1996) показали, что уменьшение модуля поля в момент инверсии Брюнес-Матуяма и предшествующего инверсии экскурса Хурамильо, было различным для различных регионов. Пробы брались в районах расположения базальтов, излившихся на дно океанов вблизи Индонезии ( $0^\circ$ ,  $160^\circ\text{E}$ ) и западного берега Африки ( $0^\circ$ ,  $20^\circ\text{W}$ ). В первом случае уменьшение модуля поля не превышало  $1/10$  от его нормальной величины, во втором, - понижение модуля было большим, не менее  $1/30$  от нормального значения. Эти данные подтверждаются другими аналогичными наблюдениями. Так, например, в (Oda, et al., 2000) показано, что в момент этой инверсии в базальтах, излившихся в районе острова Барнео ( $7^\circ\text{N}$ ,  $122^\circ\text{E}$ ), модуль поля уменьшился примерно в 5–7 раз от его нормальной величины. Аналогичное по величине уменьшение было зафиксировано вблизи побережья Калифорнии (Heider, et al., 2000). Значительное понижение модуля было зарегистрировано вблизи западного побережья Африки (Yamazaki, Oda, 2001). Авторы зарегистрировали уменьшение модуля геомагнитного поля в периоды инверсии Брюнес-Матуяма и экскурса Хурамильо, не менее чем в сто раз.

Приведенные данные по поведению модуля поля в моменты инверсий можно считать подтверждением теории дрейфа магнитных полюсов в моменты инверсий и экскурсов. Согласно этой теории дрейф полюсов происходит по вполне определенным траекториям, на которых располагаются глобальные магнитные аномалии (Kuznetsov, 1999). В момент времени инверсии (экскурса), когда поле дипольного источника становится близким к нулю, собственное поле глобальных магнитных аномалий ещё сохраняет свое прежнее значение. Поле дипольного источника возрастает от нулевого значения со знаком, обратным предыдущему. Это приводит к аннигиляции поля дипольного источника и поля аномалии. Так происходит смена полярности поля на выделенных трассах. В тех районах, где влияние аномалий не сказывается, например, в Африке, модуль поля во время инверсий и экскурсов становится практически равным нулю. Таким образом, палеомагнитные данные однозначно показывают, что в момент инверсии, - модуль геомагнитного поля в Африке уменьшается значительно больше (в 100 и более раз), по сравнению с другими регионами (Азией, Австралией, Америкой), в которых модуль поля уменьшается не более чем в 10 раз (рис. 9, 10).

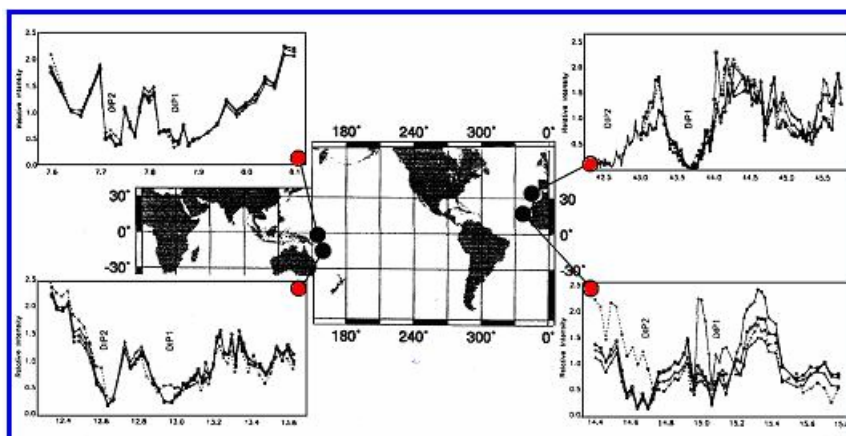


Рис. 9. Уменьшение интенсивности геомагнитного поля в период инверсии Брюнес-Матуяма (DIP 2) и предшествующего инверсии экскурса Хурамильо (DIP 1) (Hartl, Tauхе, 1996). Черными точками и линиями показаны места взятия проб.

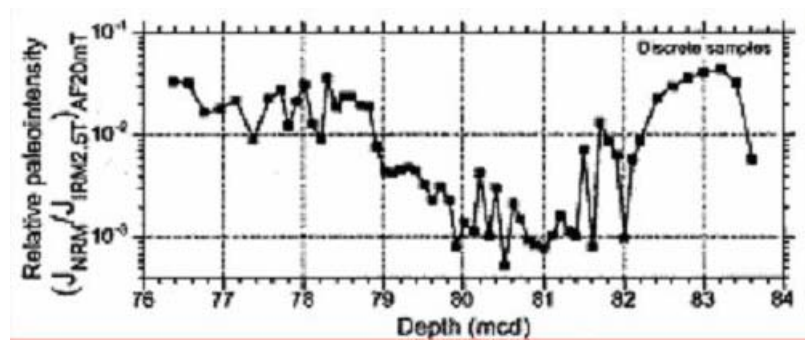


Рис. 10. Изменение относительной палеоинтенсивности геомагнитного поля в период инверсии Брюнес-Матуяма, по данным образцов (Yamazaki, Oda, 2001), взятых на западном побережье Африки (20° S, 10° E).