

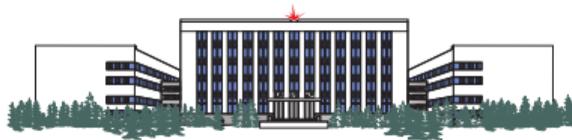
Плазма в космосе

Лекция №12

Ионосфера и магнитосфера Земли

Анненков Владимир, с.н.с. лаб. 9-1

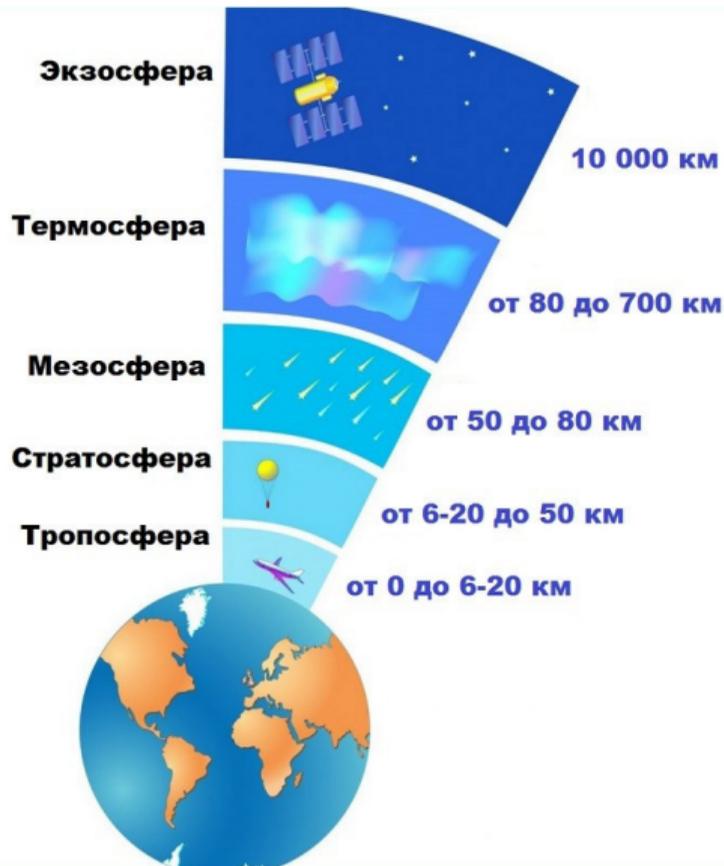
2 декабря 2021



Содержание лекции

- 1 Ионосфера Земли
- 2 Магнитосфера Земли
- 3 Радиационный пояс Земли
- 4 Циклотронный мазер

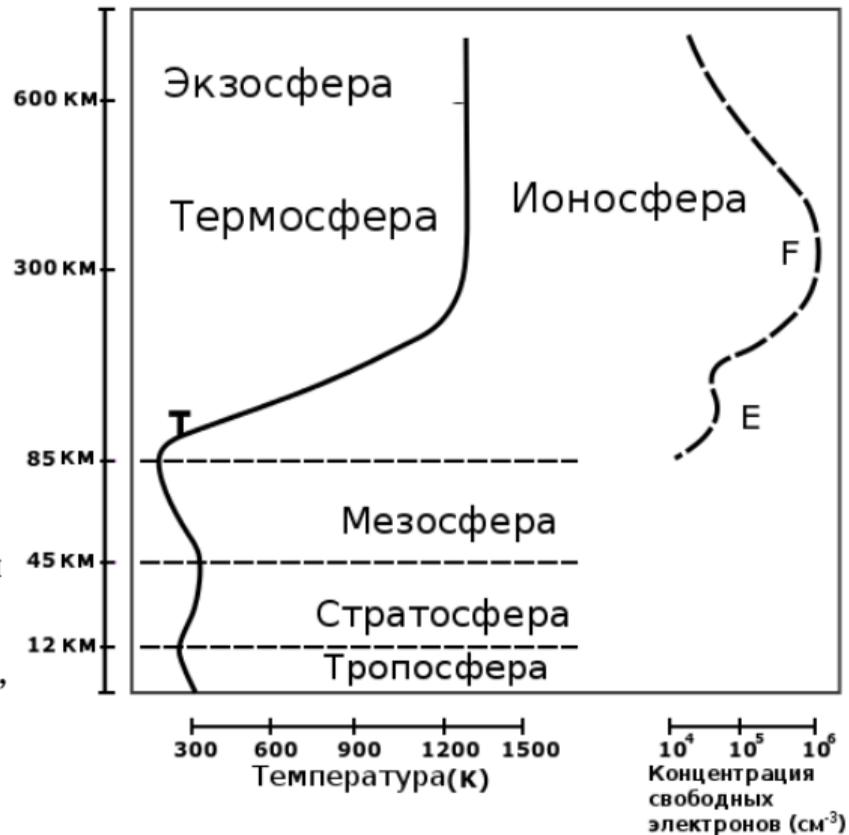
Атмосфера Земли



Ионосфера Земли

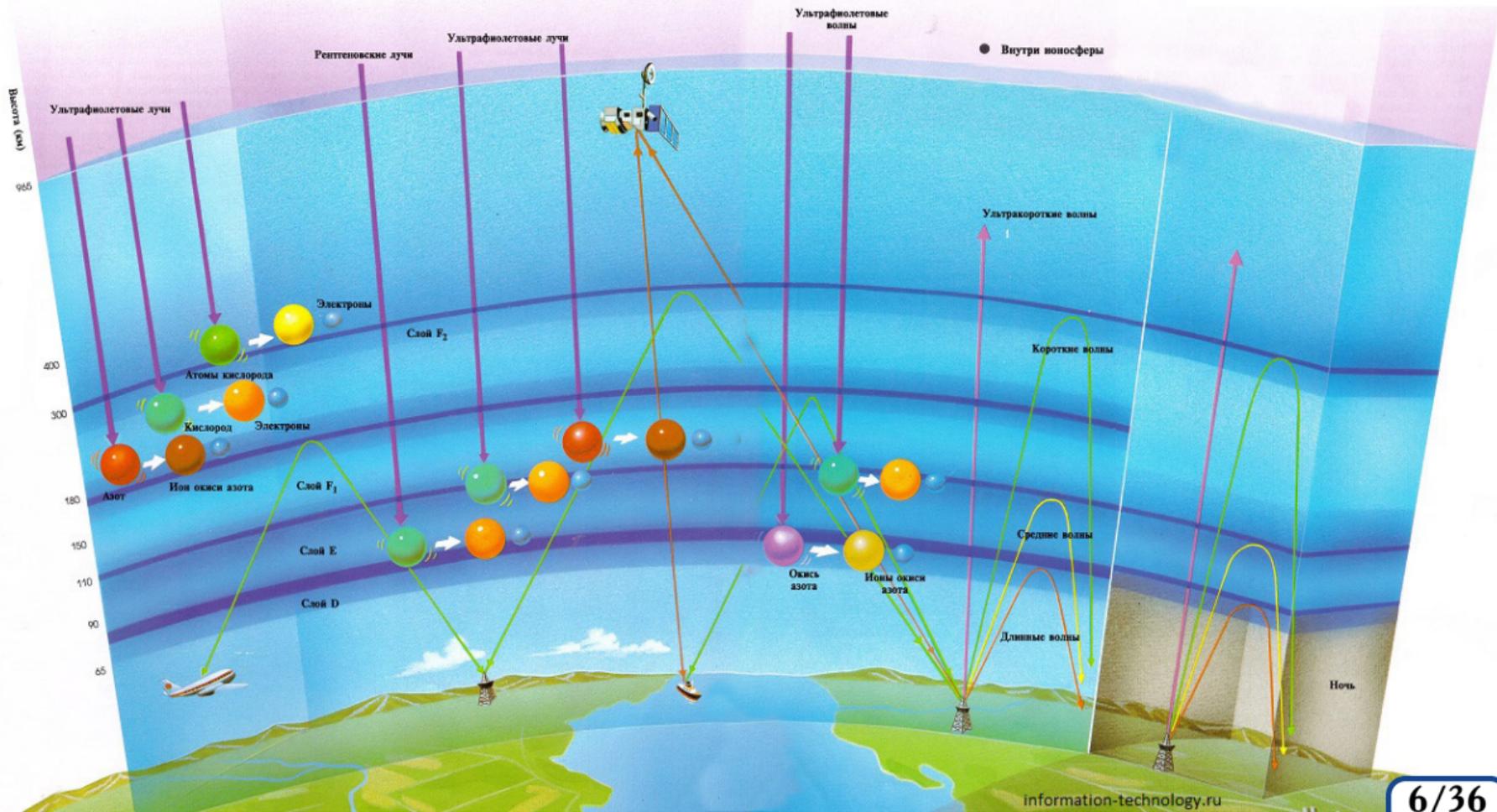
Ионосфера Земли

- Ионосфера – это ионизированная часть верхней атмосферы, расположенная выше 50 км.
- Верхней границей ионосферы является внешняя часть магнитосферы Земли.
- Ионосфера представляет собой природное образование разреженной слабоионизированной плазмы, находящейся в магнитном поле Земли и обладающей благодаря своей высокой электропроводности специфическими свойствами, определяющими характер распространения в ней радиоволн и различных возмущений.

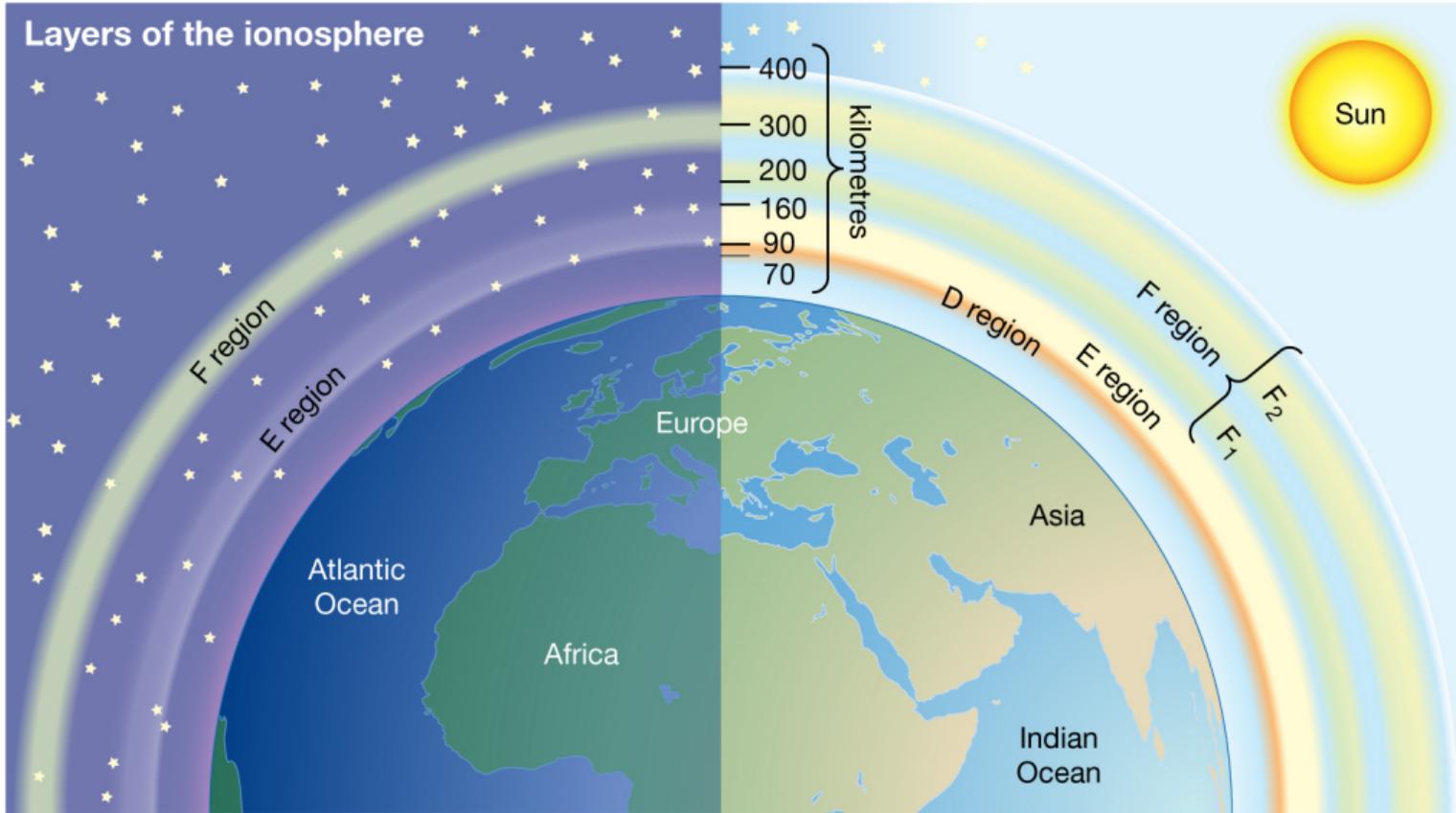


Ионосфера Земли

- В ионосфере непрерывно протекают процессы ионизации и рекомбинации.
- Наблюдаемые концентрации ионов и электронов есть результат баланса между скоростью их образования в процессе ионизации и скоростью уничтожения за счёт рекомбинации и др. процессов.
- Основным источником ионизации **днём** является коротковолновое излучение Солнца с длиной волны короче 1038\AA (УФ).
- Также вклад вносят и потоки частиц, галактические и солнечные космические лучи и др.
- Каждый тип ионизирующего излучения оказывает наибольшее действие на атмосферу лишь в определённой области высот, соответствующих его проникающей способности.



Структура ионосферы

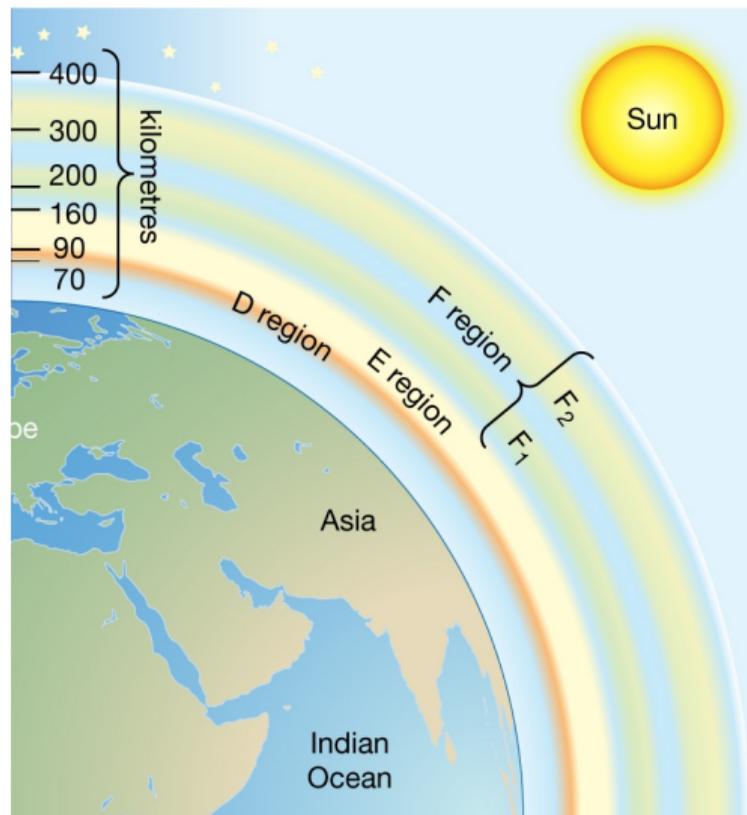


Структура ионосферы

В зависимости от плотности заряженных частиц n в ионосфере выделяются слои **D**, **E** и **F**.

Слой D. Располагается на высоте от 60 до 90 км над поверхностью Земли.

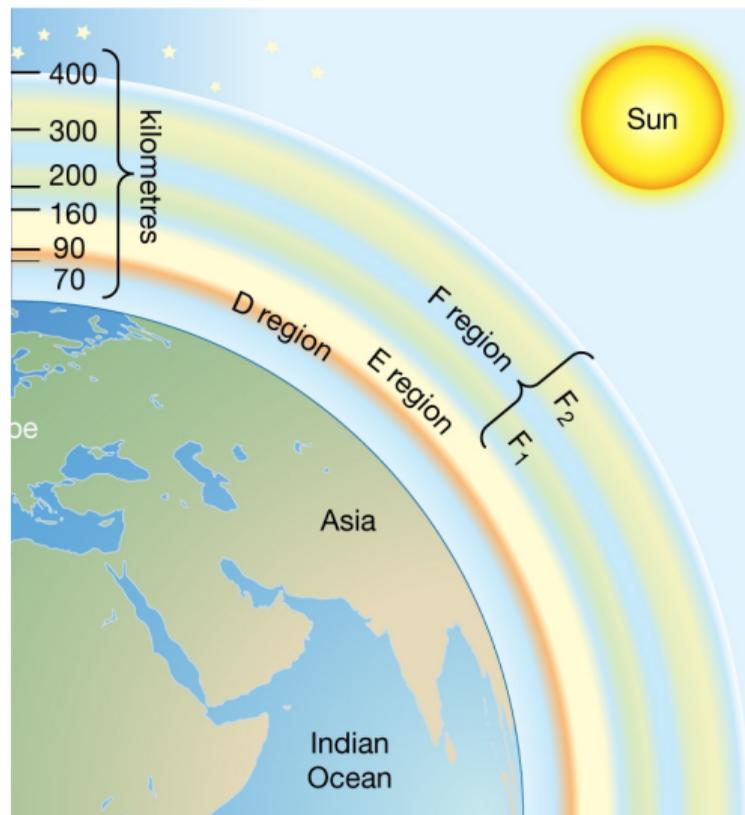
- Концентрация заряженных частиц $n \sim 10^2 \div 10^3 \text{ см}^{-3}$.
- Ионизация здесь происходит из-за излучения водорода серии Лаймана на длине волны 121.6 нм, ионизирующего оксид азота (NO).
- Кроме того, высокая солнечная активность может генерировать жесткие рентгеновские лучи (длина волны $< 1 \text{ нм}$), которые ионизируют N_2 и O_2 .
- Скорости рекомбинации в слое **D** высоки, поэтому нейтральных молекул воздуха гораздо больше, чем ионов.



Структура ионосферы

Слой E. Это средний слой, расположенный на высоте от 90 км до 150 км над поверхностью Земли.

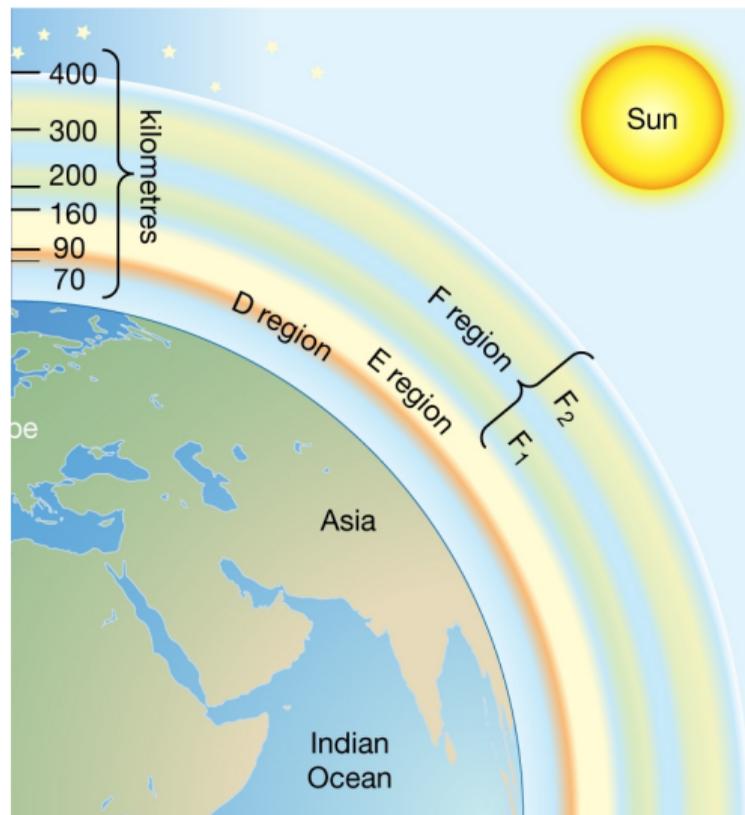
- Концентрация заряженных частиц $n \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$.
- Ионизация молекулярного кислорода (O_2) происходит из-за мягкого рентгеновского ($1 \div 10 \text{ нм}$) и далекого ультрафиолетового (УФ) солнечного излучения.
- Вертикальная структура слоя **E** в первую очередь определяется конкурирующими эффектами ионизации и рекомбинации.
- Ночью слой **E** ослабевает, потому что первичный источник ионизации отсутствует.



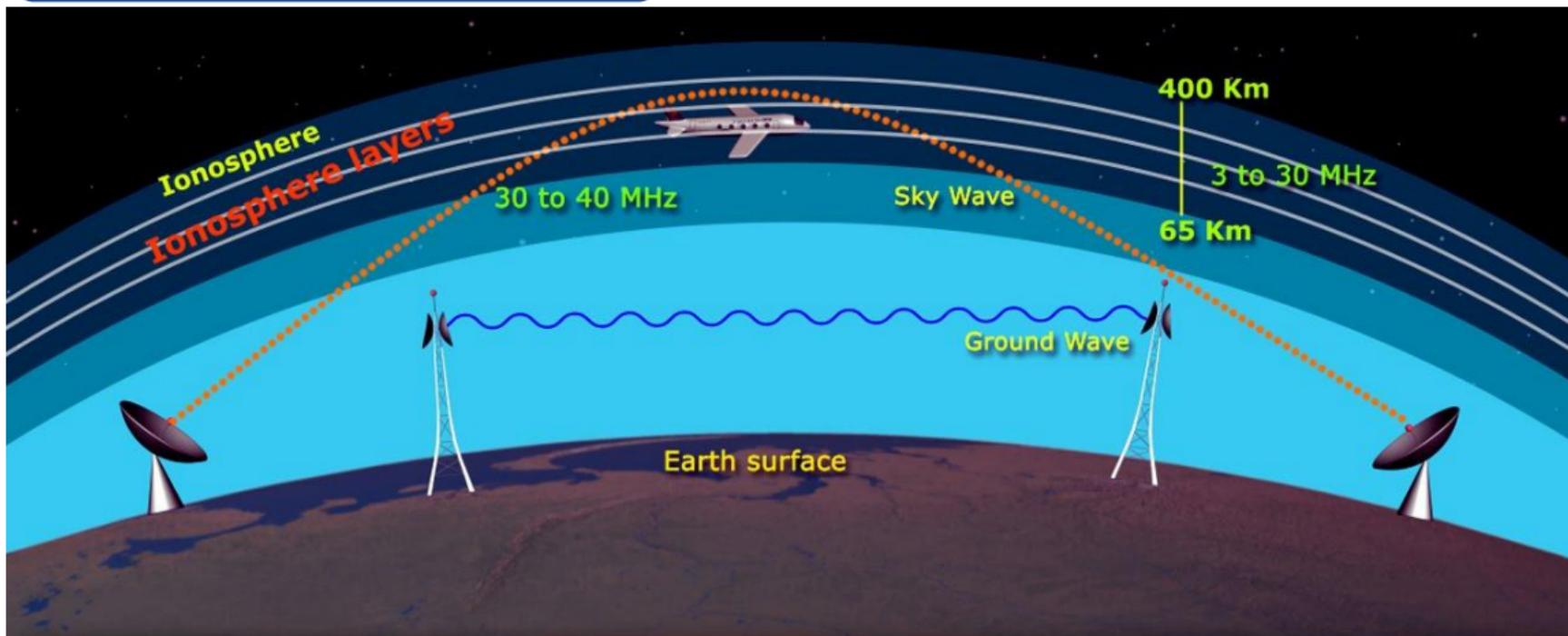
Структура ионосферы

Слой F. Или область, также известная как слой Эплтона-Барнетта, простирается от примерно 150 км до более чем 500 км над поверхностью Земли.

- Концентрация заряженных частиц $n \sim 10^5 \div 10^6 \text{ см}^{-3}$.
- Это слой с самой высокой электронной плотностью, что означает, что сигналы, проникающие в этот слой, будут уходить в космос.
- В генерации электронов преобладает экстремальное ультрафиолетовое (УФ, $10 \div 100 \text{ нм}$) излучение, ионизирующее атомарный кислород.
- Слой **F** состоит из одного слоя (**F2**) ночью, но в течение дня в профиле электронной плотности часто образуется вторичный пик (обозначенный **F1**).



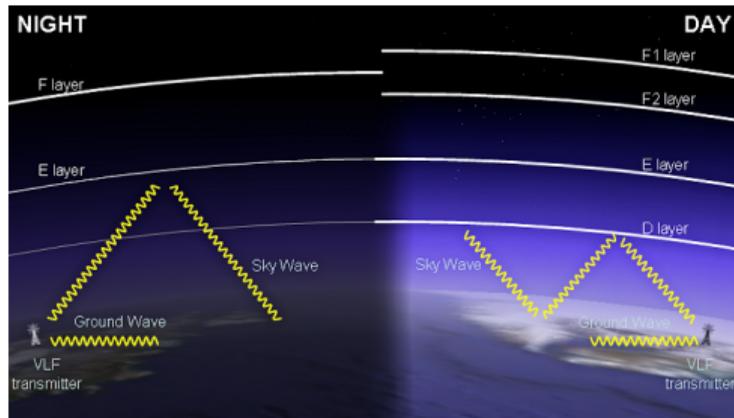
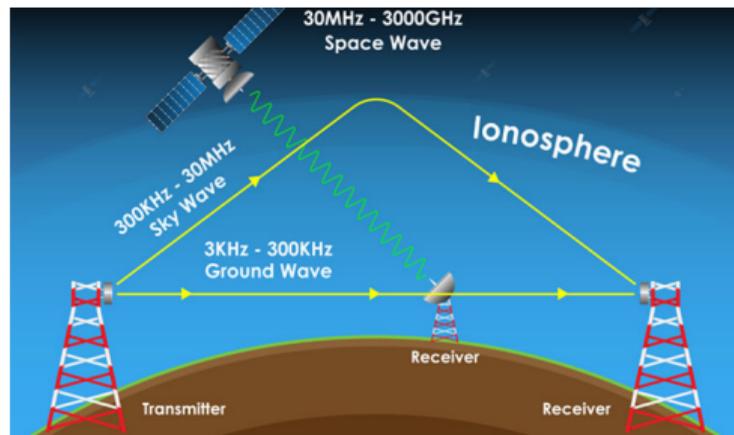
Ионосфера и радиоволны



- Заряженные частицы оказывают существенное влияние на распространение радиоволн.

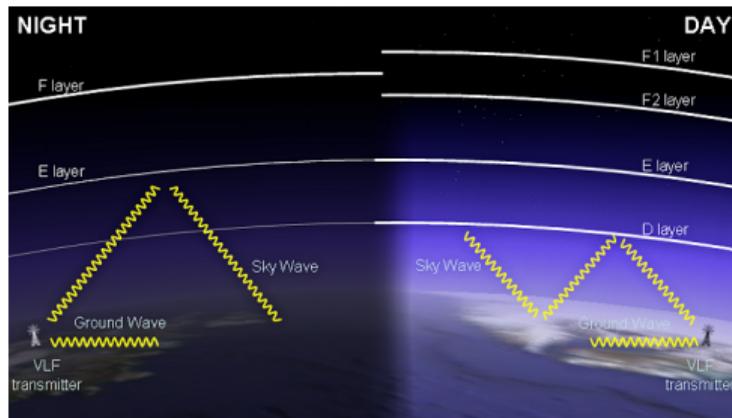
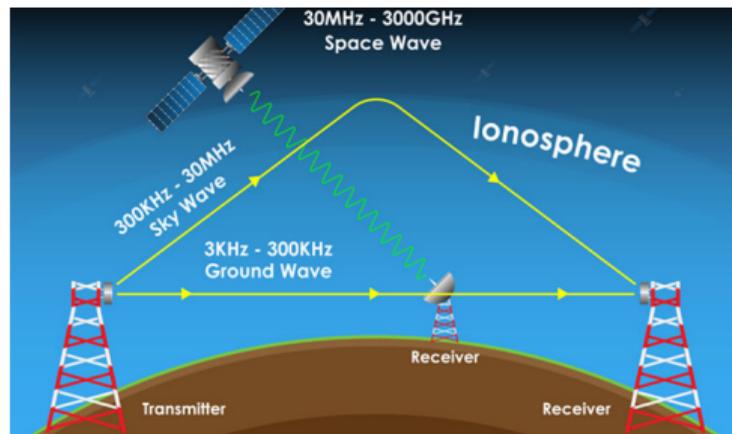
Ионосфера и радиоволны

- Среднечастотные и нижние ВЧ радиоволны значительно ослабляются в **слое D**, поскольку проходящие радиоволны вызывают движение электронов, которые затем сталкиваются с нейтральными молекулами и отдают им энергию.
- Более низкие частоты испытывают ещё большее поглощение, потому что они перемещают электроны дальше, что приводит к большей вероятности столкновений.
- Это является основной причиной поглощения радиоволн, особенно на частоте 10 МГц и ниже, с постепенно меньшим поглощением на более высоких частотах.
- Этот эффект достигает максимума около полудня и уменьшается ночью из-за уменьшения толщины слоя **D**; только небольшая часть остается из-за космических лучей.



Ионосфера и радиоволны

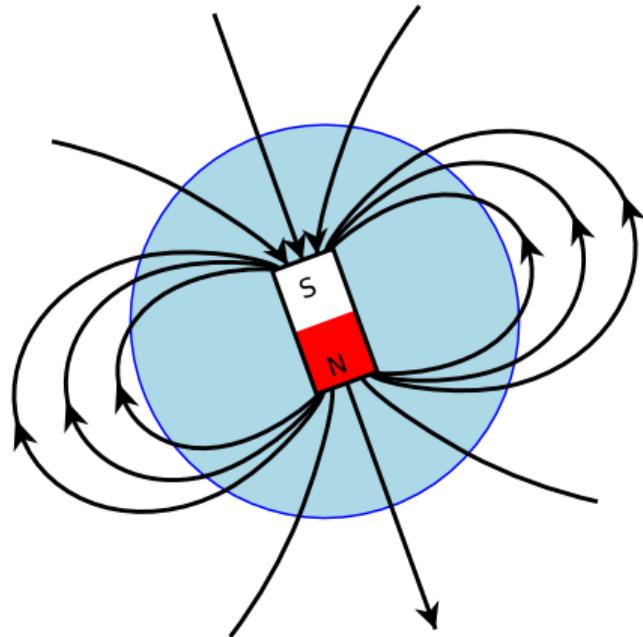
- Типичным примером влияния **слоя D** является исчезновение дальних станций АМ (Средние Волны) диапазона вещания в дневное время.
- В **слое D** из-за высокой концентрации молекул, а следовательно, и высокой частоты столкновения с ними электронов происходит наиболее сильное поглощение радиоволн, что иногда приводит к прекращению радиосвязи. Здесь же, как в волноводе, распространяются длинные и сверхдлинные радиоволны.
- Особенностью **слоя F** является то, что он отражает радиоволны в диапазоне коротких волн на частотах от нескольких мегагерц до 10 мегагерц, что делает возможным передачу таких радиосигналов на значительные расстояния.



Магнитосфера Земли

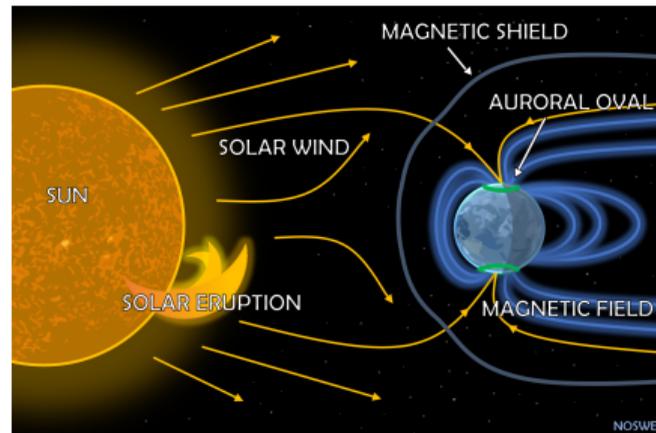
Магнитное поле Земли

- Более чем на 90% магнитное поле Земли состоит из поля, источник которого находится внутри Земли, в жидком внешнем ядре, – эта часть называется главным, основным или нормальным полем.
- В первом приближении вблизи поверхности Земли (до трёх её радиусов) близко к полю магнитного диполя, то есть имеет такой вид, как будто земной шар представляет собой полосовой магнит с осью, направленной приблизительно с севера на юг.
- Центр диполя смещен относительно центра Земли, а ось наклонена к оси вращения Земли на угол около 11° .

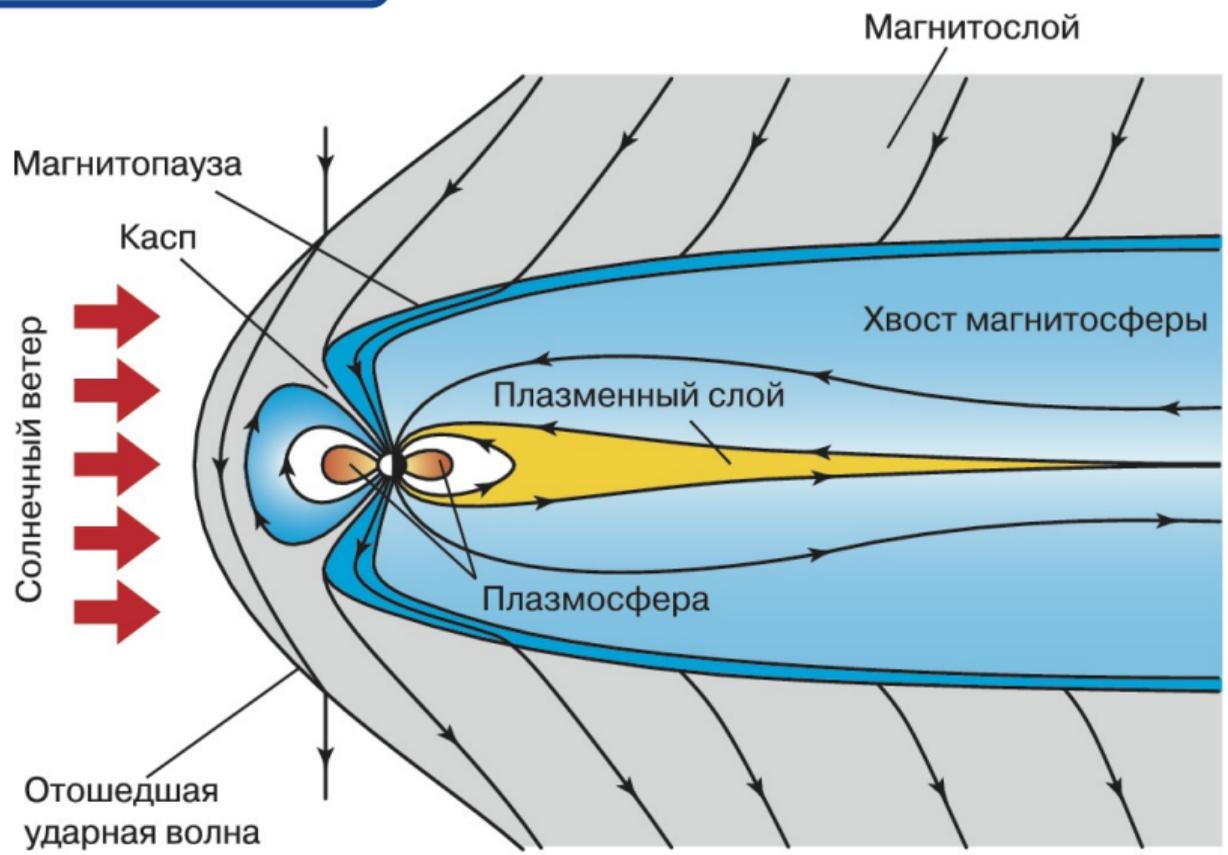


Солнечный ветер и магнитосфера

- Солнечный ветер — представляет собой быстрый поток горячей плазмы, уходящей от Солнца во всех направлениях. Типичная скорость солнечного ветра на границе земной магнитосферы 300–1000 км/с.
- Солнечный ветер пронизан межпланетным магнитным полем, которое представляет собой главным образом магнитное поле Солнца, переносимое плазмой солнечного ветра на дальние расстояния.
- Давление солнечного ветра определяется преимущественно давлением протонов.
- Однако, несмотря на то, что плотность энергии межпланетного магнитного поля составляет всего 1% от плотности кинетической энергии солнечного ветра на орбите Земли, процессы пересоединения межпланетных и земных магнитных силовых линий также определяют структуру и динамику магнитосферы.



Магнитосфера Земли



Магнитосфера Земли

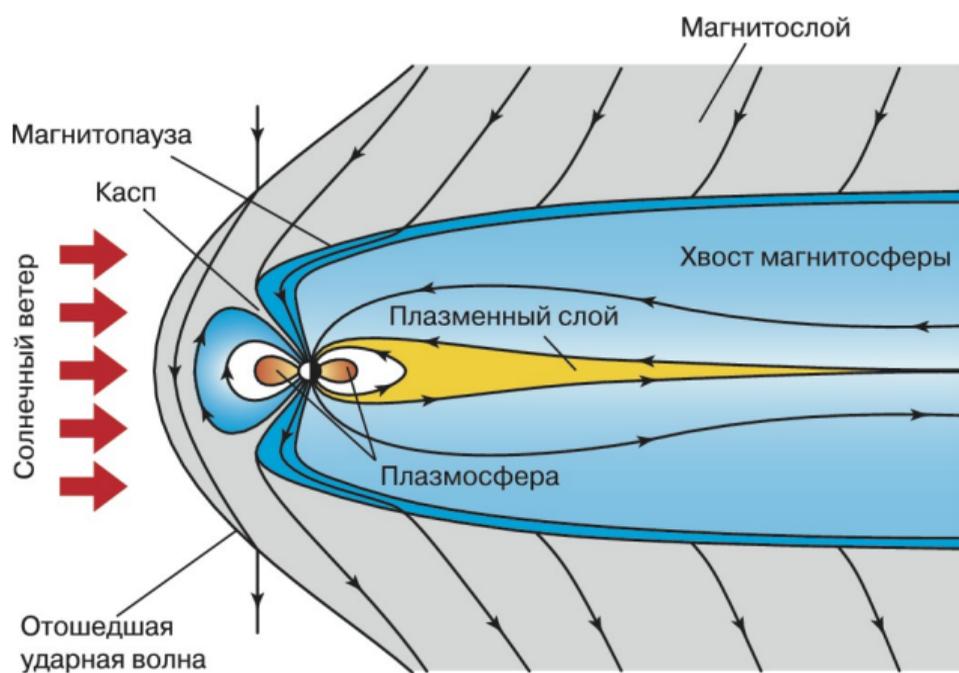
- Магнитосфера — заполненная плазмой полость, которая формируется в сверхзвуковом потоке горячей замагниченной плазмы солнечного ветра при его взаимодействии с магнитным полем планеты.
- Граница магнитосферы расположена далеко от поверхности планеты, где газовая оболочка сильно разрежена и все основные процессы определяются электродинамическими процессами в бесстолкновительной плазме.
- Положение границы магнитосферы (магнитопауза) определяется балансом магнитного давления магнитного поля планеты и динамического давления со стороны солнечного ветра

$$\frac{1}{8\pi}B^2(r_A) = \frac{1}{2}\rho V^2(r_A),$$

где r_A — альфвеновский радиус/радиус магнитосферы (10-12 радиусов Земли на дневной стороне, в два раза больше — на ночной), B — магнитное поле небесного тела, ρ и V — соответственно плотность и скорость потока набегающей плазмы.

Магнитосфера Земли

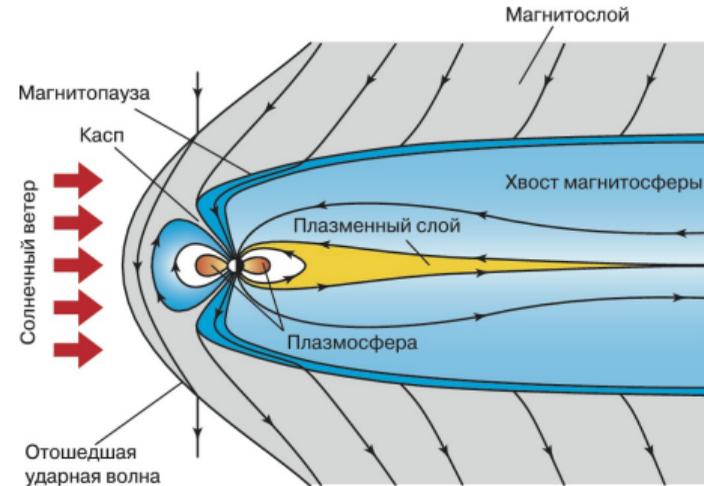
- Спутниковые эксперименты показывают, что в преобразовании динамической и магнитной энергии солнечного ветра в энергию заряженных частиц и электромагнитного поля разных масштабов, заполняющих магнитосферу, особую роль играют динамические образования в пограничных областях магнитосферы.
- Это **отошедшая ударная волна** в лобовой части магнитосферы, **магнитослой** – чрезвычайно активная область между ударной волной и границей магнитосферы, и собственно граница – **магнитопауза**, которая в свою очередь, обнаруживает особые области: **касп**, **турбулентный погранслой**, погранслой на границе геомагнитного хвоста.



- Все эти области характеризуются высоким уровнем электромагнитной турбулентности, магнитным пересоединением, интенсивными конвективными движениями и локальным ускорением частиц.
- Именно эти процессы на границе и определяют трансформацию и поступление энергии и импульса во внутренние области магнитосферы.

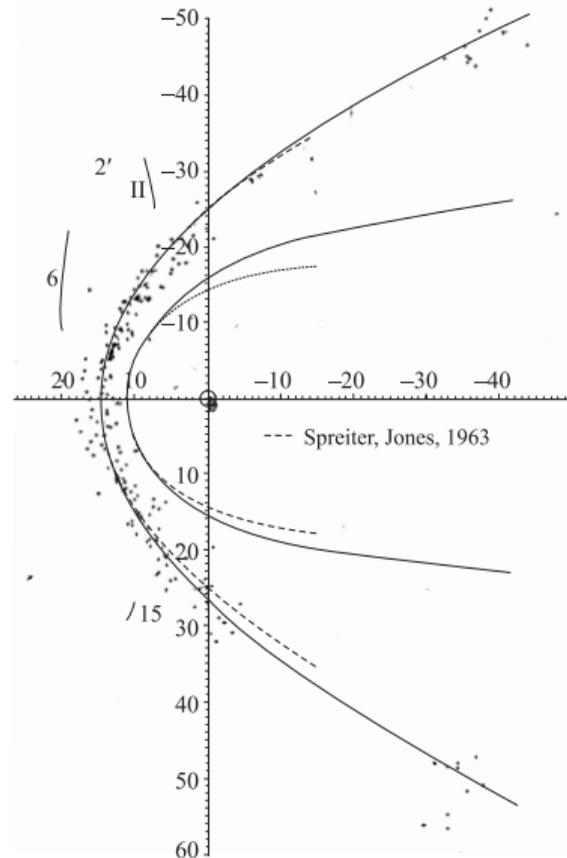
Околоземная ударная волна

- При взаимодействии сверхзвукового потока газа или жидкости с непроницаемым препятствием должна образовываться ударная волна.
- Она возникает из-за необходимости сильного отклонения потока от первоначального направления.
- Физически это происходит из-за возникновения отраженной звуковой волны от препятствия, которая взаимодействует с набегающим потоком.



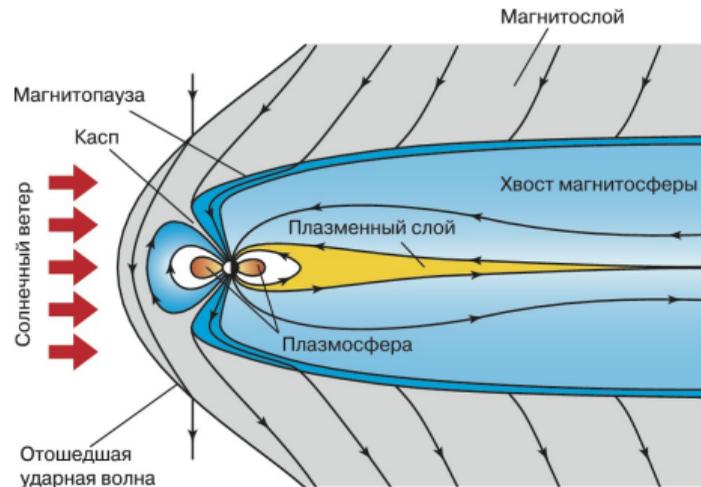
Околоземная ударная волна

- Так как бесстолкновительный поток плазмы солнечного ветра ведет себя как жидкость из-за присутствия магнитного поля и микронеустойчивостей, а средняя скорость солнечного ветра в ~ 400 км/с вблизи орбиты Земли примерно в 5 раз превышает скорость магнитозвуковых волн, то магнитозвуковое число Маха составляет примерно 5.
- Следовательно, перед магнитосферой должна постоянно существовать ударная волна, замедляющая и отклоняющая поток солнечного ветра вокруг магнитосферы.
- Благодаря тому, что плотность энергии магнитного поля в солнечном ветре обычно существенно меньше, чем энергия кинетического движения, в первом приближении взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой можно рассматривать в гидродинамическом приближении (модель Спрайтера).



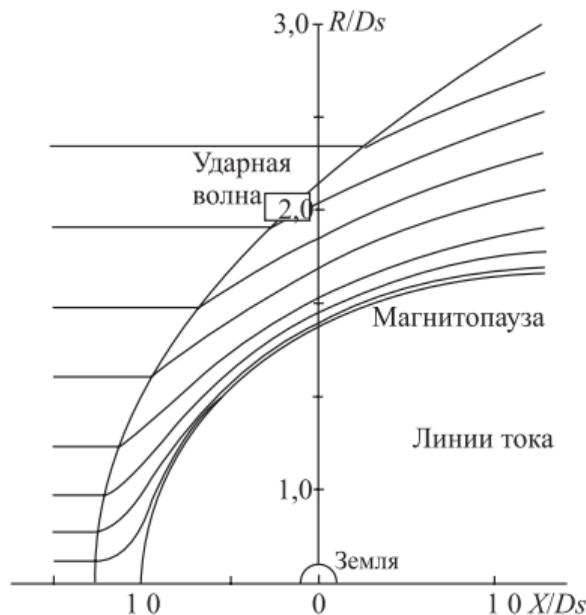
Магнитослой

- Вследствие затупленности (закругленности) препятствия, каким является магнитосфера Земли для набегающего сверхзвукового солнечного ветра, образующаяся при обтекании этого препятствия околоземная ударная волна является **отошедшей**.
- Т.е. она не прилегает вплотную к границе магнитосферы (магнитопаузе), а отодвинута от нее на некоторое расстояние.
- Образующаяся при этом между ударной волной и магнитопаузой область называется **магнитослоем** (ранее в литературе ее называли переходным слоем).



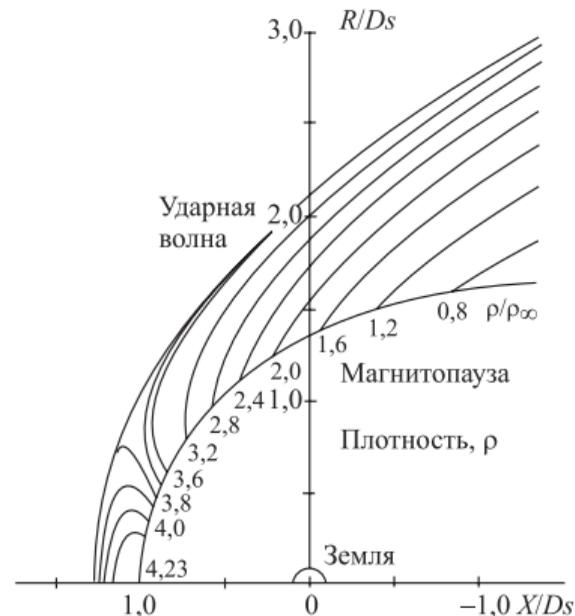
Магнитослой

- На рисунке (а) показано направление линий тока плазмы в предположении цилиндрической симметрии обтекания по отношению к линии Солнце-Земля.
- Здесь и далее даны результаты расчетов в предположении магнитозвукового числа Маха в солнечном ветре $M = 8$ и показателя политропы $\gamma = 5/3$.
- Видно, что поток плазмы, пройдя через ударную волну, отклоняется от линии Солнце—Земля тем больше, чем ближе к подсолнечной точке он входит в магнитослой.
- При дальнейшем течении форма линий тока в определенной степени повторяет форму магнитопаузы.



Магнитослой

- На рисунке (б) представлены контуры равной плотности плазмы магнитослоя (ρ) в отношении к плотности набегающего солнечного ветра (ρ_∞).
- Сразу за ударной волной близко к соотношению Ренкина-Гюгонио для быстрых ударных волн $(\gamma + 1)/(\gamma - 1)$, которое в данном случае примерно равно 4.
- В подсолнечной области относительная плотность плазмы выше всего, а затем она постепенно падает с удалением к флангу магнитосферы, но во всей дневной полусфере плазма остается сжатой с плотностью выше плотности набегающего солнечного ветра.
- При этом плотность плазмы вблизи ударной волны заметно выше, чем вблизи магнитопаузы.



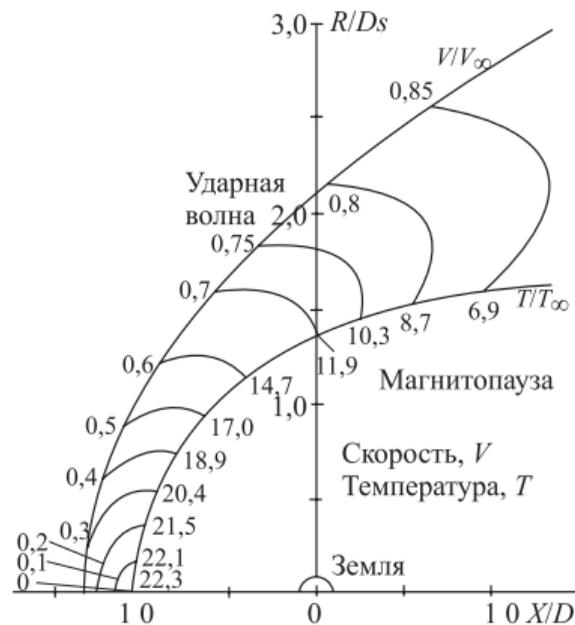
б

Магнитослой

- На рисунке (в) даны контуры равных скоростей течения (V) и температур (T) плазмы, также отнесенных к их значениям в солнечном ветре.
- Видно, что скорость течения очень сильно (в 5–10 раз) спадает в подсолнечной области теоретически – до нуля), а затем постепенно возрастает с удалением к флангу магнитосферы, но везде в магнитослое она остается меньшей, чем скорость солнечного ветра.
- Контуры постоянной температуры плазмы в модели Спрайтера совпадают с контурами скорости, потому что отношение температур однозначно связано с отношением скоростей:

$$\frac{T}{T_{\infty}} = 1 + \frac{(\gamma - 1)M^2}{2(1 - v^2/V_{\infty}^2)}$$

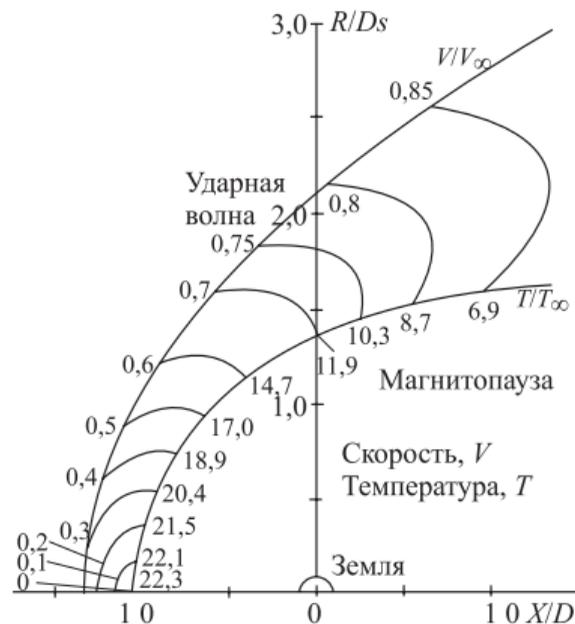
где V – скорость течения, а значком ∞ отмечены значения тех же параметров в солнечном ветре.



6

Магнитослой

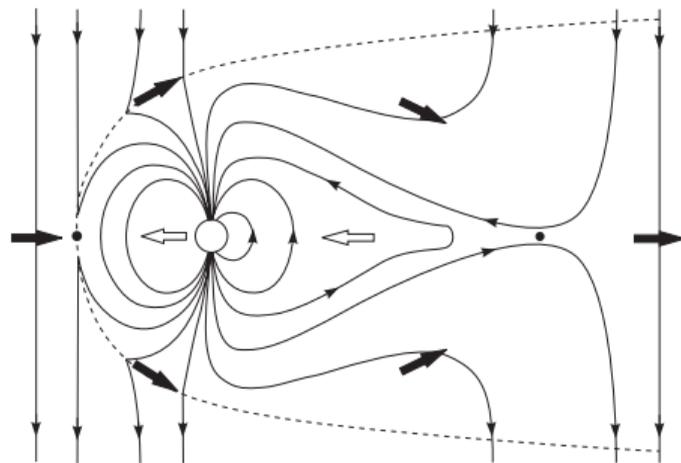
- Рост температуры плазмы в магнитослое весьма значителен – так во всей дневной полусфере эта температура должна превышать температуру солнечного ветра в 10-20 раз.
- В одножидкостной модели Спрайтера газодинамическая температура имеет смысл суммы ионной и электронной температур.
- При этом, в солнечном ветре электронная температура обычно вдвое больше ионной, однако при переходе через ударную волну она меняется сравнительно мало.
- Это означает, что изменение ионной температуры должно быть еще выше, чем показано на рис. (в).
- В противоположность солнечному ветру в магнитослое ионная температура, в среднем, заметно превышает электронную.



6

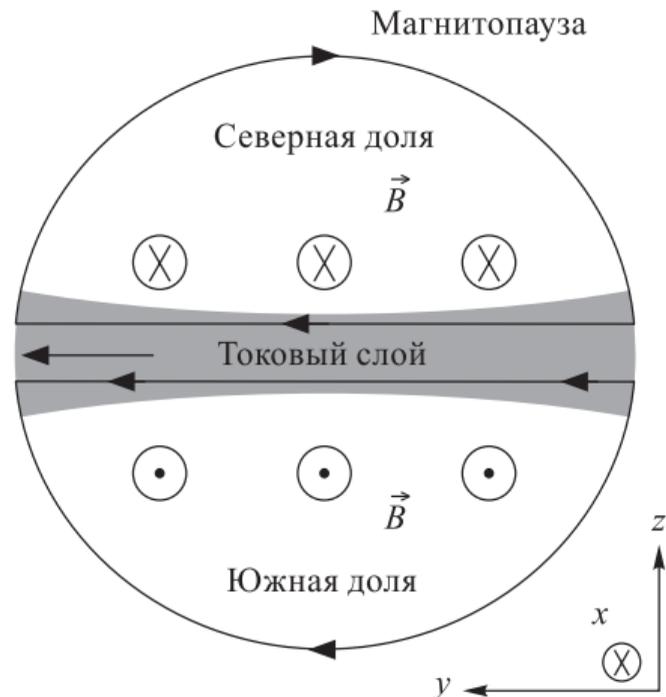
Магнитосферный хвост

- Причиной образования вытянутой магнитной конфигурации на ночной стороне является обтекание собственного магнитного поля Земли потоками плазмы, исходящими из Солнца.
- Потоки горячих ионизованных частиц, вмороженные в межпланетное магнитное поле, непрерывно исходят из верхней атмосферы Солнца и подходят к Земле со скоростями 300-1000 км/с, температурами 10-50 эВ и плотностью 1-10 см⁻³.
- Наталкиваясь на препятствие в виде земной магнитосферы, солнечный ветер сжимает геомагнитное поле на дневной стороне.
- Условие вмороженности в подсолнечной точке нарушается, при этом создаются благоприятные условия для пересоединения межпланетных и земных магнитных силовых линий между собой.



Магнитосферный хвост

- В дальней области хвоста влияние магнитного диполя Земли ослабевает настолько, что в среднем $B_z = 0$.
- Здесь располагается зона турбулентного токового слоя.
- Все магнитные силовые линии, проходящие через плазменный слой хвоста, проецируются в ионосферу Земли и соединяют между собой две далеко отстоящие друг от друга области – плазменный слой и ионосферу.
- Высыпания энергичных частиц плазменного слоя в авроральный овал во время геомагнитных возмущений — частые явления, которые проявляются в виде широко известных полярных сияний и других нестационарных геофизических процессов.



Магнитосфера Земли

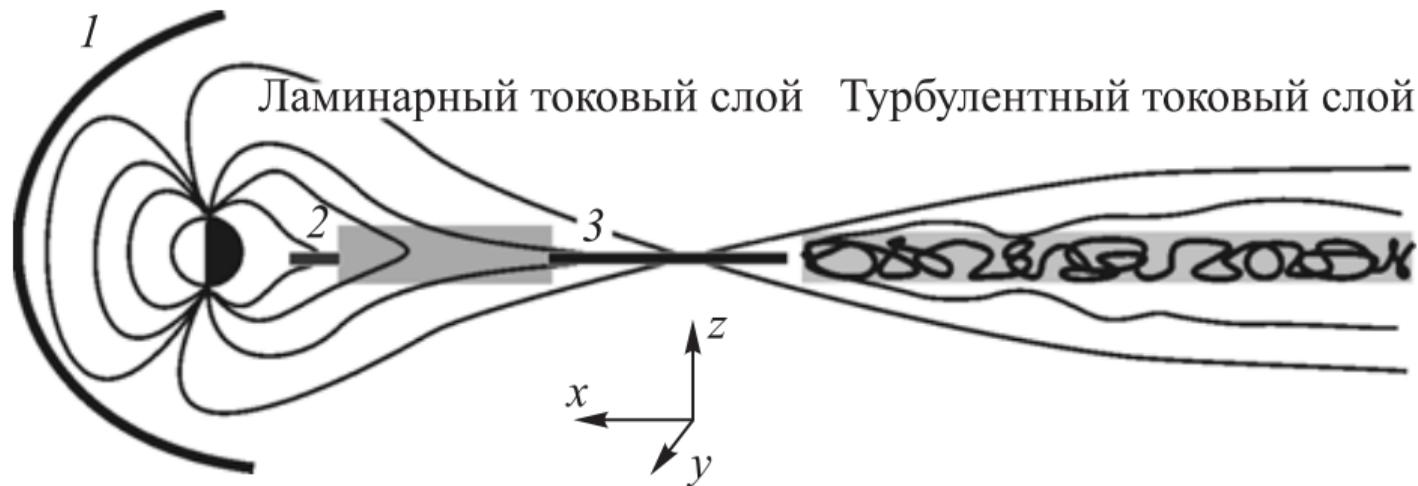


Схема локализации тонких токовых слоев в магнитосфере Земли: 1 – на магнитопаузе, 2 – на ближнем к Земле крае токового слоя ($\sim 15 \div 20R_E$), 3 – вблизи дальней нейтральной линии. Слева от нейтральной линии располагается нетурбулентный («ламинарный») токовый слой с $B_z = 0$. Справа от дальней нейтральной линии показан «турбулентный» токовый слой, в котором $B_z \sim 0$, но существуют сильные флуктуации $\delta B_z = 0$

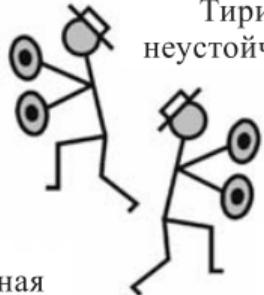
Магнитосфера Земли

Открытая система

Баллонная
неустойчивость



Тиринг-
неустойчивость



Симметричная
кинк-мода



Несимметричная
кинк-мода



Нижнегибридная
неустойчивость

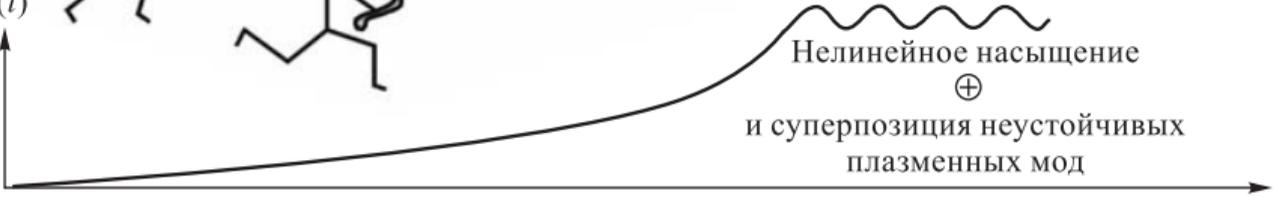


Неравновесное стационарное
состояние

Многомасштабное
фрактальное
структурирование



$B(t)$



Нелинейное насыщение

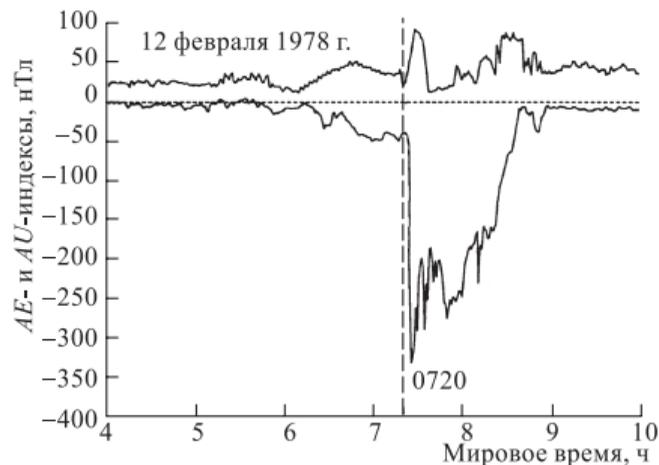
⊕

и суперпозиция неустойчивых
плазменных мод

Геомагнитный хвост – всегда присутствующая в магнитосфере, открытая и очень динамичная система

Магнитосферная суббуря

Пример магнитной суббури. На рисунке показаны геомагнитные индексы AU и AL, представляющие верхнюю и нижнюю огибающие наложенных друг на друга магнитограмм нескольких станций авроральной зоны.

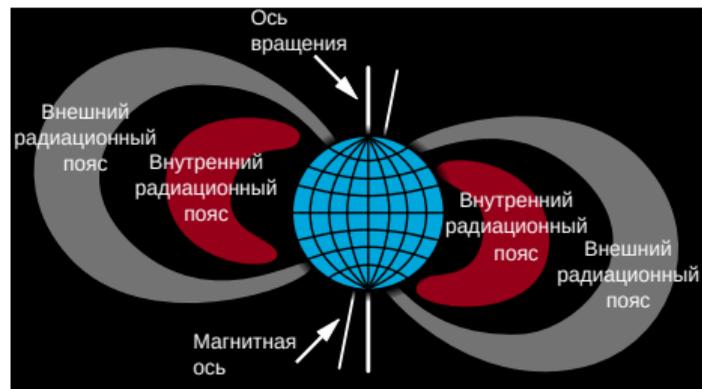


- Исторически первым и, до сегодняшнего дня, самым простым и наглядным способом контроля общего состояния магнитосферно-ионосферной системы является регистрация магнитного поля на земной поверхности.
- Вариации магнитного поля отражают интенсивность токов в этой системе.
- Известно явление, которое получило название **геомагнитной бури** — глобальное понижение интенсивности магнитного поля на низких широтах в течение нескольких часов на величину порядка 100 нТл (иногда до нескольких сотен нТл), и затем восстановление интенсивности магнитного поля за время порядка нескольких суток.

Радиационный пояс Земли

Радиационный пояс Земли

Радиационный пояс (пояс ван Аллена) – область магнитосфер планет, в которой накапливаются и удерживаются проникшие в магнитосферу высокоэнергичные заряженные частицы (в основном протоны и электроны).



- Радиационный пояс был впервые обнаружен американским учёным Джеймсом ван Алленом в феврале 1958 года при анализе данных с американского спутника «Эксплорер-1» и убедительно доказан записью периодически изменяющегося уровня радиации на полном витке орбиты специально модифицированного ван Алленом для изучения обнаруженного феномена спутника «Эксплорер-3».
- В 1958 г. открытие нашло независимое подтверждение в данных советского «Спутника-3». Более поздний повторный анализ данных более раннего советского «Спутника-2» показал что радиационные пояса фиксировались и его оборудованием, предназначенным для анализа солнечной активности, однако странным показаниям солнечного датчика тогда не сумели дать верную интерпретацию.

Радиационный пояс Земли

Магнитное поле приближенно может быть описано полем магнитного диполя, ось которого составляет с осью вращения Земли угол 11° .

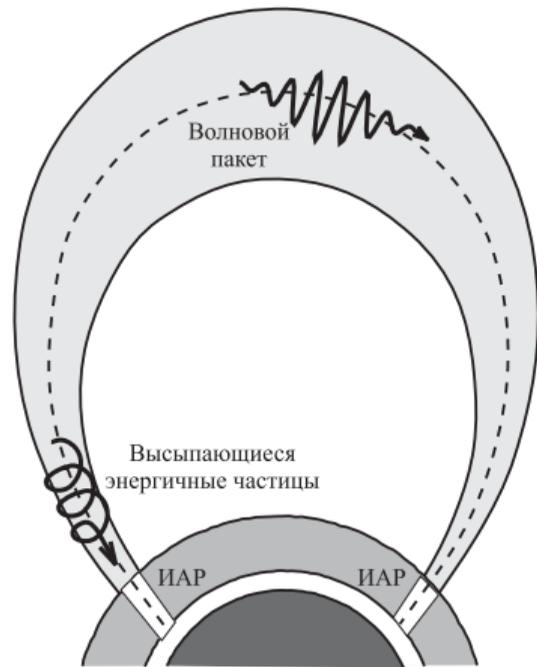


- В таком поле есть области (зоны захвата), недоступные для частиц с энергией $E < E_k$. Те же частицы, с такой энергией, что уже там находятся, не могут эту область покинуть.
- Выделяют две области поясов:
 - внутренний радиационный пояс на высоте ≈ 4000 км, состоящий преимущественно из протонов с энергией в десятки МэВ;
 - внешний радиационный пояс на высоте ≈ 17000 км, состоящий преимущественно из электронов с энергией в десятки кэВ.
- Между внутренним и внешним радиационными поясами имеется щель, расположенная в интервале от 2 до 3 радиусов Земли.

Циклотронный мазер

Циклотронный мазер

- **Мазеры** это генераторы электромагнитных волн, основанные на эффектах стимулированного излучения.
- Необходимыми атрибутами мазеров являются активное вещество и электродинамическая система, определяющая собственные электромагнитные моды таких генераторов.



- В случае магнитосферных циклотронных мазеров (МЦМ) электродинамической системой служит заполненная фоновой (холодной) плазмой магнитная силовая трубка, а в качестве активного вещества выступают энергичные электроны и ионы, вращающиеся в магнитном поле.
- Причиной стимулированного излучения является циклотронная неустойчивость, обусловленная перенаселенностью вращательных уровней энергичных частиц.

Циклотронный мазер

В магнитосфере Земли действуют два типа циклотронных мазеров (ЦМ), которые существенно отличаются друг от друга.

- **Первый тип ЦМ** функционирует в основном на авроральных силовых линиях магнитного поля на высотах между 10^3 и 10^4 км в плазменных кавернах с низкой плотностью электронов, где электронная плазменная частота много меньше электронной гирочастоты.
- Активным веществом в этих ЦМ являются электроны с энергиями 1-10 кэВ, вызывающие полярные сияния, а собственными модами служат электромагнитные волны с частотой, близкой к гирочастоте электронов, и волновым вектором, почти перпендикулярным направлению геомагнитного поля.

Циклотронный мазер

- **ЦМ второго типа** в магнитосфере Земли действуют, как правило, в замкнутых магнитных силовых трубках, заполненных плотной холодной плазмой, т. е. внутри плазмосферы или в областях с достаточно плотной холодной плазмой за пределами плазмосферы.
- Активным веществом в этих ЦМ служат энергичные электроны и ионы радиационных поясов Земли, а собственными модами являются свистовые и альвеновские электромагнитные волны, частоты которых меньше гирочастот соответствующих компонент РП в экваториальном сечении магнитной силовой трубки, где действует ЦМ.
- Принципиальным для таких ЦМ является то обстоятельство, что во взаимодействие с волнами вовлечены все энергичные частицы РП, захваченные в геомагнитную ловушку.
- Таким образом, функционирование ЦМ этого типа определяет состояние и динамику захваченной в околоземном пространстве радиации (заряженных энергичных частиц) в целом, особенно в период магнитных бурь, когда происходит активное пополнение РП новыми частицами.

Хотите узнать больше?

- Очень подробно эти и другие вопросы описаны в двух томах «**Плазменной гелиогеофизики**» под ред. Л.М. Зеленого и И.С. Веселовского.