

Совсем иначе ведет себя необыкновенная волна. Если $\omega < \omega_B$, второе слагаемое в подкоренном выражении в (10) становится положительным и никаких ограничений со стороны низких частот для необыкновенной волны не существует. Легко убедиться, что при распространении в ионосфере радиоволн килогерцевого диапазона выполняются следующие сильные неравенства: $\omega \ll \omega_B$ и $\omega \ll \omega_p^2/\omega_B$. При этом в формуле (10) для n_1 можно отбросить 1 в подкоренном выражении и записать ее в таком упрощенном виде:

$$n_1 \approx \frac{\omega_p}{\sqrt{\omega\omega_B}}. \quad (12)$$

Напомним, что в плазме без магнитного поля коэффициент преломления всегда меньше 1. Здесь же, в силу сформулированных выше неравенств, $n_1 \gg 1$. Это означает, что рассматриваемая волна имеет очень малую по сравнению с c скорость ($v_\phi = c/n_1 \ll c$). Чтобы наглядно представить себе ее структуру, изобразим напряженность электрического поля волны в виде стрелки \vec{E} и проследим за ее движением. Просматривая такой «мультифильм», мы увидели бы, что начало стрелки движется со скоростью v_ϕ вдоль линий магнитного поля \vec{B}_0 , а ее конец вращается вокруг \vec{B}_0 с угловой скоростью ω , причем вектор \vec{E} все время остается перпендикулярным \vec{B}_0 (рис.2).

Одновременно участие в поступательном и круговом движениях приводит к тому, что конец вектора \vec{E} описывает винтовую спираль. Этим объясняется ее название — спиральная, или геликоидальная, волна (кратко — геликон). В литературе встречаются и другие синонимы: свистовая волна, просто свист или вистлер (от англ. whistle — свистеть). Одна-

ко последняя терминология не имеет никакого отношения к структуре электрического поля, а связана со своеобразными природными явлениями, в которых участвуют спиральные волны. Мы имеем в виду так называемые свистящие атмосферерики. Именно они и используются для осуществления «наземно-космических» исследований, о которых мы обещали рассказать.

Свистящие атмосферерики

Атмосферерики — это естественные электрические разряды в атмосфере, связанные в основном с молниями. С ними легко познакомиться, включив радиоприемник во время грозы: треск и шум в нем — результат атмосферериков. Природа этих помех хорошо известна. При грозовом разряде возникают не только вспышки молний и раскаты грома, но и мощное радиоизлучение в широком диапазоне частот. Впервые это излучение было обнаружено еще в 1895 году, когда заработал грозоотметчик А.С.Попова. Из-за слабой чувствительности первые аппараты были способны обнаруживать только ближние грозы, но после изобретения ламповых усилителей появилась возможность регистрировать разряды молний на очень больших расстояниях. Тогда-то, в 1919 году, и появились первые сообщения о специфических радиосигналах, получивших название свистящих атмосферериков.

Атмосферерики — радиоимпульсы с быстро меняющейся частотой, лежащей в килогерцевом диапазоне. Приемник, предназначенный для их регистрации, представляет собой просто усилитель низкой частоты (без детектора!). После усиления в приемнике импульсы воспринимаются на слух как своеобразный свист — отсюда их название.

Характерное время изменения частоты в одном импульсе составляет доли секунды — секунду, а периоды колебаний $T = 1/f$ значительно короче — порядка $10^{-3} - 10^{-4}$ с. Поэтому можно говорить о «мгновенной частоте» $f(t)$ для данного момента времени t . Далее мы убедимся, что зависимость частоты от времени несет на себе информацию о параметрах космической плазмы на расстояниях в тысячи километров от Земли.

Как правило, регистрируются не одиночные сигналы, а серии импульсов, следующих друг за другом с интервалами, также измеряемыми секундами. Вскоре после открытия свистящих атмосферериков стало ясно, что вся серия порождается одним атмосферным разрядом и представляет собой многократные эхо-сигналы. Но как объяснить столь длительные (секундные) задержки? В пределах земного шара просто нет таких больших расстояний. Ведь даже кругосветное эхо радиоволны, бегущей со скоростью света, появляется примерно через 0,13 с. Решающая гипотеза была высказана только в начале 50-х годов. Суть ее заключается в предположении, что импульсы распространяются от молнии к приемнику не вдоль земной поверхности, а через космическое пространство по линии магнитного поля Земли между магнитосопряженными точками¹ (рис.3). Если разряд произошел недалеко от приемника, сначала регистрируется первичный атмосферерик (он проходит вдоль Земли и воспринимается на слух как кратковременный треск, который называют сфериком), а спустя некоторое время — свист, прошедший по магнитной линии до

¹ Магнитосопряженные точки — точки на поверхности Земли, лежащие на одной магнитной линии.

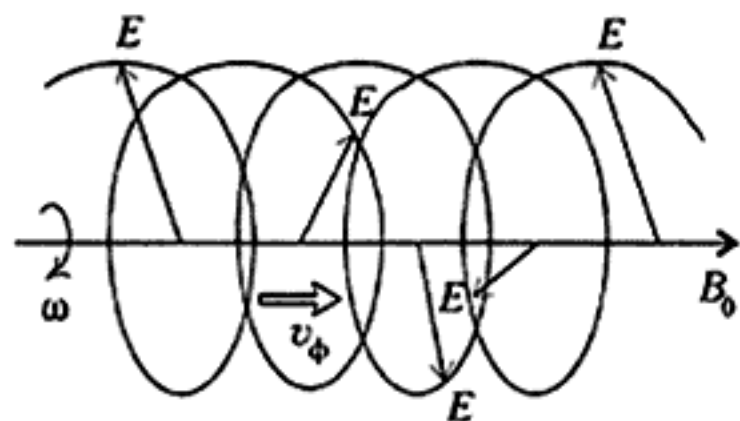


Рис.2. Спиральная волна, распространяющаяся в плазме вдоль постоянного магнитного поля \vec{B}_0 с фазовой скоростью v_ϕ . Конец вектора \vec{E} описывает спираль, вращаясь с угловой скоростью ω

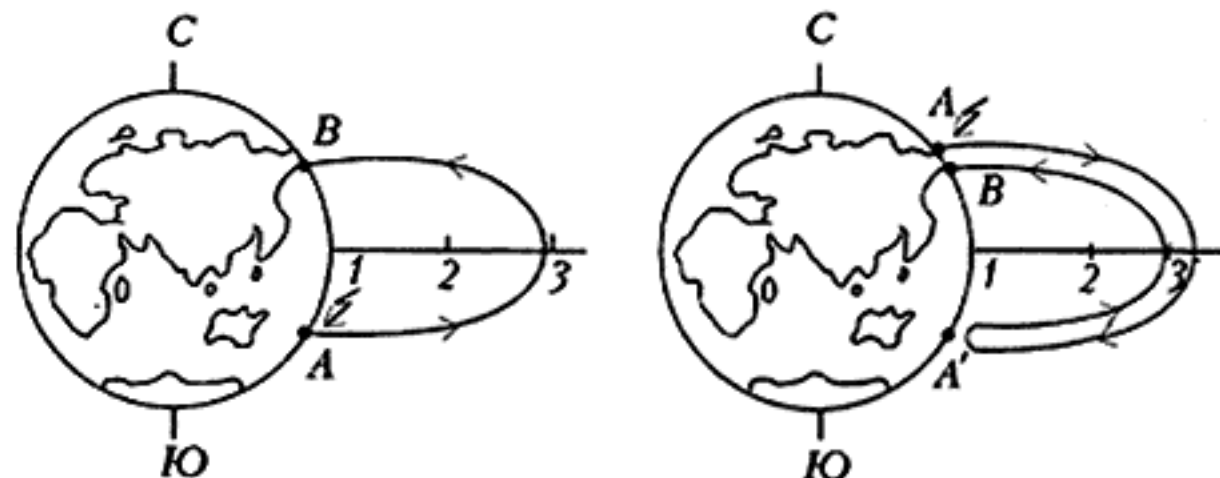


Рис.3. Схемы возникновения короткого (слева) и длинного (справа) свистов. Здесь А — место разряда молнии, В — приемник, А' — точка отражения сигнала. Расстояние указано в радиусах Земли