

гии спиральной волны приближается к направлению \vec{B}_0 . Расчеты показывают, что предельный угол отклонения групповой скорости от этого направления близок к 20° , если частота ω много меньше гирочастоты ω_B . Однако само по себе это обстоятельство не обеспечивает распространения свиста вдоль линии геомагнитного поля. Вот при наблюдениях свистящих атмосфериков со спутника число их значительно выше, чем при наземной регистрации, так как на космическом аппарате принимаются все сигналы, а не только те, которые захватываются в волноводный канал.

Измерение параметров космической плазмы

Геомагнитная линия, вдоль которой распространяется свистящий атмосферик, может удаляться от поверхности Земли на десятки тысяч километров в зависимости от геомагнитной широты пункта наблюдения. Поэтому изменения, которые происходят с радиоимпульсом на пути его следования, несут информацию о свойствах среды на очень больших высотах. Вычисляя запаздывание сигнала в неоднородной плазме, можно показать, что дисперсия D как бы набирается по всей траектории сигнала, причем вклад тех участков траектории, где поле B_0 мало, особенно велик. Такое утверждение станет понятным, если вспомнить, что в формуле для D частота ω_B стоит под корнем в знаменателе, и, следовательно, $D \sim 1/\sqrt{B_0}$. Из-за этого, хотя определить непосредственно плотность плазмы на различных высотах по измеренной величине D нельзя (в формулу входит только интегральная концентрация вдоль всей трассы), можно проконтролировать правильность тех или иных моделей распределения N_0 с высотой. Особенно ценно то, что, благодаря быстрому убыванию B_0 с удалением от Земли, основной вклад в дисперсию дают значения N_0 в окрестности вершины траектории, т.е. на самых больших высотах.

Свистящие атмосферики уже сыграли и продолжают играть заметную роль в исследованиях околоземного космического пространства. Полученные с их помощью данные привели к пересмотру сложившихся ранее пред-

ставлений об ограничении ионосферы Земли самым большим несколькими тысячами километров. Вывод о достаточно высокой концентрации электронов на больших расстояниях вытекал из анализа свистов, а в дальнейшем получил непосредственное подтверждение в прямых измерениях на спутниках и ракетах.

Интересна история открытия так называемого «колена» — резкого уменьшения электронной плотности на высоте 15–25 тыс. км (рис.5). Здесь проходит граница внутренней области магнитосферы, заполненной сравнительно плотной плазмой ($N_0 \geq 10^8 \text{ м}^{-3}$), вращающейся вместе с Землей. Доказательства существования столь обширной плазменной оболочки Земли дали измерения на советской космической ракете в 1959 году и на американском спутнике «Эксплорер-1» в 1963 году. Результаты, получаемые с помощью свистящих атмосфериков, также подтверждают наличие «колена» и дают возможность регулярно регистрировать границу области с точностью до 0,1 радиуса Земли.

Мы проиллюстрировали работоспособность свистов на примере определения электронной концентрации. При этом использовалось соотношение (13), которое, напомним, справедливо в ограниченном интервале частот — примерно от 1 до 7 кГц. На более высоких частотах нарушится условие $\omega \ll \omega_B$, использованное при выводе приближенной формулы для $n_1(\omega)$, а ограничение по частоте снизу связано с тем, что мы с самого начала пренебрегали движением ионов.

Если диапазон частот, в котором регистрируется атмосферик, расширить, то открываются дополнительные возможности, о которых мы здесь только упомянем. Часто наблюдаются свистящие атмосферики с минимальным временем прихода на определенной частоте, которая называется носовым свистом (частота f_N на рисунке 4). Далее возникают две ветви спектрограммы: восходящая с обрывом на некоторой частоте f_{max} и нисходящая, переходящая в исследованную нами область. В этом диапазоне частот, где $\omega \lesssim \omega_B$, влияние магнитного поля проявляется сильнее, и

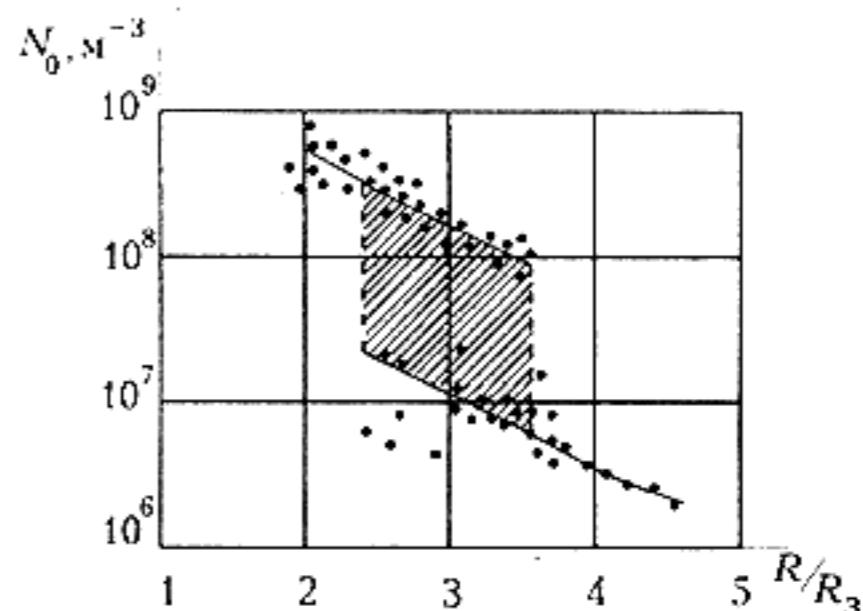


Рис.5. Резкое изменение электронной концентрации («колена») на границе внутренней области магнитосферы (заштрихованная область). Экспериментальные точки получены с помощью свистящих атмосфериков. Расстояние от Земли выражено в земных радиусах

здесь свист играет роль своеобразного «магнитометра».

На очень низких частотах наблюдаются так называемые «ионные свисты». Их спектрограммы несут информацию о массах ионов, что позволяет по существу выполнить химический анализ газа на расстояниях в десятки тысяч километров от Земли. Но и это еще не все. Более точные формулы для $n_1(\omega)$ включают в себя зависимость от температуры электронов, а это открывает возможности использования свистов как дистанционных «термометров».

Подведем итоги нашего рассказа. Создание ракет и космических кораблей, оснащенных сложными измерительными приборами, заслуженно вызывает восхищение перед возможностями человеческого разума. Но разве менее удивителен тот факт, что стоило «только» хорошо подумать, и очень много о космосе удалось узнать, не покидая поверхности Земли. Сама природа обеспечила нам возможность дистанционных космических измерений, создав мощные радиопередатчики — молнии и проложив тысячекilометровые каналы — волноводы вдоль геомагнитных линий от одного полушария Земли к другому через космос. Все это существовало столько лет, сколько существует наша планета, но только изобретение радио позволило воспользоваться столь удивительным «инструментом».