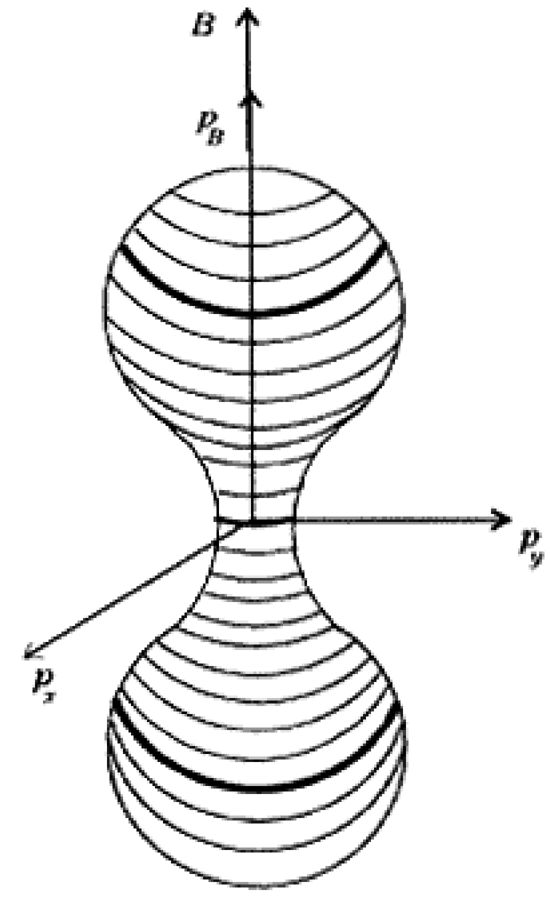

Рис.6. Кантованные траектории на поверхности Ферми. Выделены траектории, которые окружают экстремальные (по p_B) площади

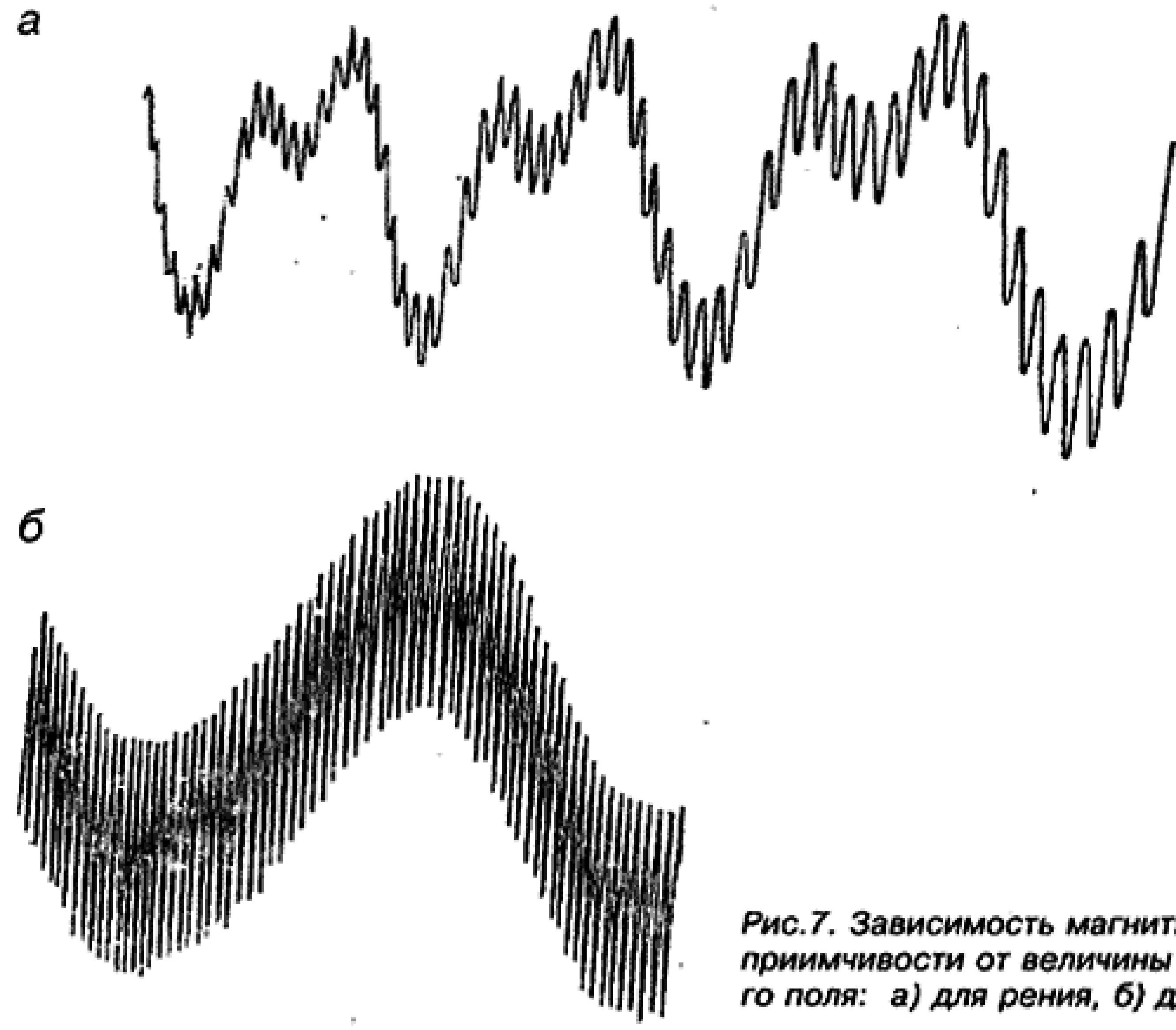

Рис.7. Зависимость магнитной восприимчивости от величины магнитного поля: а) для рения, б) для серебра

щади сечения поверхности Ферми. Перепишем условие (14) так:

$$\frac{1}{B_1}=\frac{2\pi\hbar|e|}{S^F_{extr}}\left(n+\frac{1}{2}\right), \qquad (а)$$

$$\frac{1}{B_2}=\frac{2\pi\hbar|e|}{S^F_{extr}}\left(n+1+\frac{1}{2}\right). \qquad (б)$$

Ситуация (а) отличается от ситуации (б) только тем, что в первом случае с энергией Ферми совпадает n-й уровень, а во втором — $(n+1)$-й. Но n — все равно очень большое число, изменение на единицу номера уровня мало что меняет. В результате — повторение, осцилляции. Вычтя из уравнения (б) уравнение (а), получаем *период осцилляционной зависимости*

$$\Delta\frac{1}{B}=\frac{2\pi\hbar|e|}{S^F_{extr}}. \qquad (17)$$

Полная теория эффекта де Гааза — ван Альфена на основе этой формулы была построена И.М.Лифшицем и его учеником А.М.Косевичем (тогда аспирантом) в 1953 году. Основное достоинство формулы (17) в том, что она была получена *без* предположения о характере зависимости энергии электрона от импульса. Следовательно, она годится для любого металла с поверхностью Ферми любой формы. Более того, она дает возможность решать обратную задачу — по экспериментальным данным, по осцилляционным кривым определять форму поверхности Ферми (об этом чуть ниже).

Теорию эффекта де Гааза — ван Альфена для свободных электронов, т.е. электронов в свободном от сил пространстве, построил Л.Д.Ландау в 30-х годах. Но его работа не могла быть опубликована, так как Ландау в это время был репрессирован (незаконно, как потом выяснилось). В экспериментальной работе, посвященной эффекту де Гааза — ван Альфена в висмуте (Д.Шенберг), вышедшей в Англии, результаты Ландау изложил его друг — физик-теоретик Р.Пайерлс, к этому времени бежавший из фашисткой Германии и живший в Англии. Так в историю науки вплетается история стран и народов, часто, к сожалению, трагическая.

Для свободных электронов формула (17) содержит плотность электронов n_e, поскольку $S^F_{extr}=\pi p_F^2$, а $p_F=2\pi\hbar\left(\frac{3n}{8\pi}\right)^{1/3}$:

$$\Delta\frac{1}{B}=\frac{|e|}{\pi(2\pi\hbar)}\left(\frac{8\pi}{3n}\right)^{2/3}=\frac{2|e|}{\hbar}\frac{1}{\left(3\pi^2n\right)^{2/3}}. \qquad (18)$$

Когда существовала только эта формула для объяснения осцилляционных эффектов, то казалось, что осцилляционные эффекты можно наблюдать лишь в таких экзотических металлах, как висмут. Дело в том, что у висмута аномально мало электронов проводимости и поэтому период $\Delta\frac{1}{B}$ достаточно велик, т.е. наблюдаем. Работа И.М.Лифшица и А.М.Косевича все «поставила на место»: поверхности Ферми металлов сложны, практически все поверхности Ферми обладают малыми сечениями с экстремальными (по p_B) площадями. Взгляните еще раз на рисунок 4!

Как же использовать формулу (17) для определения формы поверхности Ферми? Вспомним, что период определяется площадью сечения, *проведенного перпендикулярно магнитному полю*. Поворачивая кристалл и измеряя периоды, а значит площади сечений поверхности Ферми, имеющие экстремум по p_B, мы можем «прощупать» всю поверхность. И.М.Лифшиц вместе с известным геометром А.В.Погореловым даже вывели специальную формулу, дающую возможность по угловой зависимости периода осцилляций построить поверхность Ферми (1954 г.).

Уже говорилось, что в настоящее время известны поверхности Ферми большинства металлов. Наибольшую информацию о поверхностях Ферми получили из сравнения экспериментальных данных по осцилляционным эффектам с формулой, которую вывели Илья Михайлович Лифшиц и Арнольд Маркович Косевич.