

## Приложение А.

### Угловые характеристики магнитного поля диполя и угловая диаграмма чувствительности ЛМЛС.

Поскольку критерии магнитолокации (таол.б) содержат производные разных порядков от поля, интересно оценить, какова угловая неоднородность величины сигнала, измеряемого тем или иным каналом. На рисунках А1 - А6 отражена "тригонометрическая часть"  $\Phi$  формул (14)-(28), при этом для Z-компоненты (рис.А1) угловая переменная - одна, поэтому результат можно изобразить в виде графиков; для X- и Y-компонент две угловые переменные (угол  $\alpha$  направления  $\vec{r}$  на диполь и угол  $\varphi$  ориентации диполя относительно вектора  $\vec{r}$ ), так что на рисунках представлены "эквипотенциальные" контуры функции  $\Phi$ , при этом уровни 1 - 8 нормированы относительно максимального и минимального значения  $\Phi$ . На рисунках А2-А6 уровни 1-8 соответствуют величинам  $-0,77\Phi_A(1)$ ;  $-0,55\Phi_A(2)$ ;  $-0,33\Phi_A(3)$ ;  $-0,11\Phi_A(4)$ ;  $+0,11\Phi_A(5)$ ;  $+0,33\Phi_A(6)$ ;  $+0,55\Phi_A(7)$  и  $+0,77\Phi_A(8)$ , где  $\Phi_A$  - амплитудное значение функции  $\Phi$ .

Угловую чувствительность магнитолокатора, измеряющего какую-либо производную поля из представленных на рис. 2А-6А, можно оценить по сечению поверхности  $\Phi(\alpha, \varphi)$  плоскостью  $\alpha = const$  или  $\varphi = const$  (на рисунках 2А-6А след такой плоскости представляет горизонтальную ( $\alpha = const$ ) или вертикальную ( $\varphi = const$ ) прямую). Очевидно, угловая чувствительность тем выше, чем гуще расположены кривые уровня. Например, канал, измеряющий  $\frac{\partial H_x}{\partial y}$  (см. рис. А2б) при  $\varphi \approx 0$  имеет максимальную чувствительность в областях  $|\alpha| \leq 20^\circ$  и  $|k\pi \pm \frac{\pi}{4} - \alpha| \leq 20^\circ$ . При  $\varphi \approx \frac{\pi}{2}$  области максимальной и минимальной чувствительности по этому каналу меняются местами.

Обилие структур и типов ЛМЛС, представленных в табл.2 и 4, не позволяет быстро сориентироваться в том, какая ЛМЛС будет наиболее эффективной для конкретной задачи. Рассмотрим сначала простейшую А-ЛМЛС

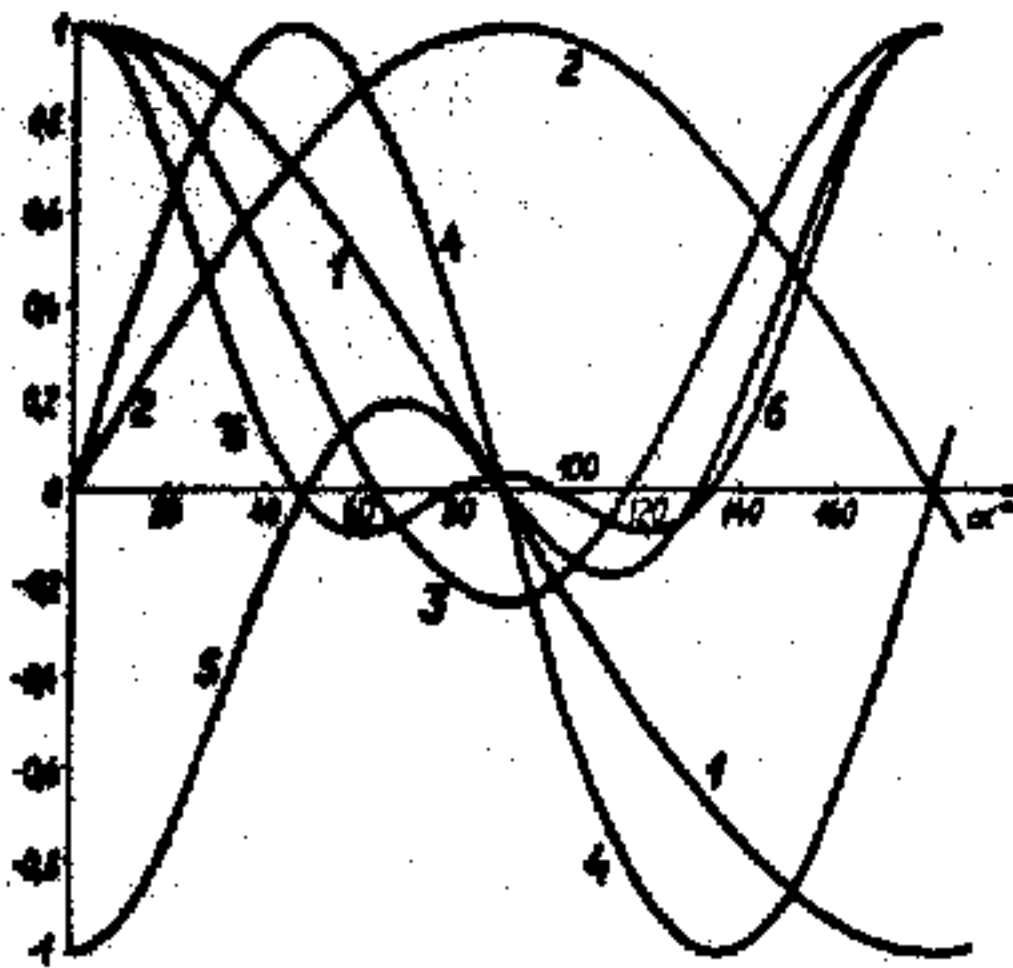


Рис. А1. Угловая зависимость величины производных Z-компоненты магнитного поля. 1-  $\frac{\partial H_z}{\partial x}$  ; 2-  $\frac{\partial H_z}{\partial y}$  ; 3-  $\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2}$  ; 4-  $\frac{\partial^2 H_z}{\partial x \partial y}$  ; 5-  $\frac{\partial^3 H_z}{\partial x^3}$  ; 6-  $\frac{\partial^4 H_z}{\partial x^4}$  .

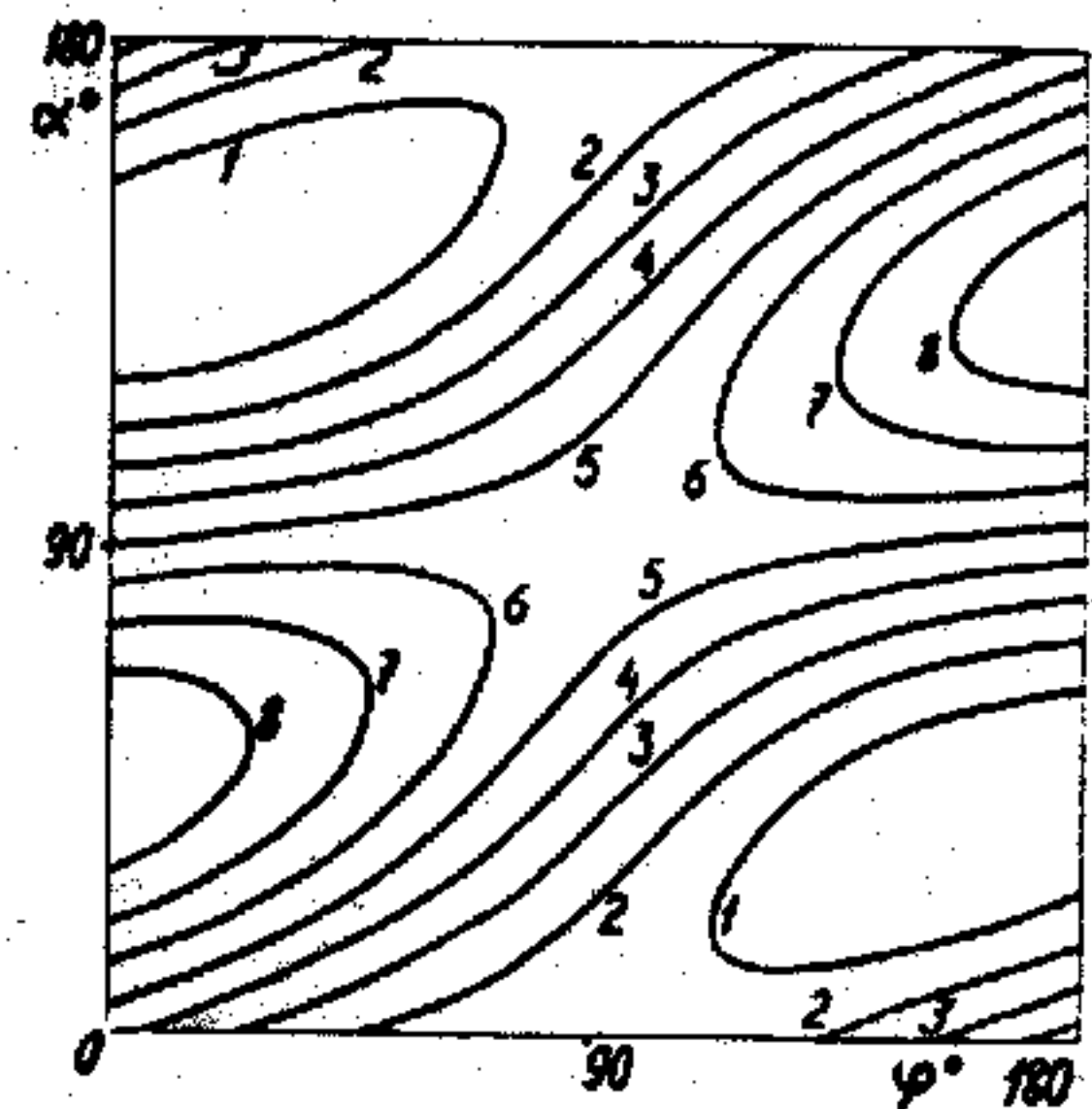
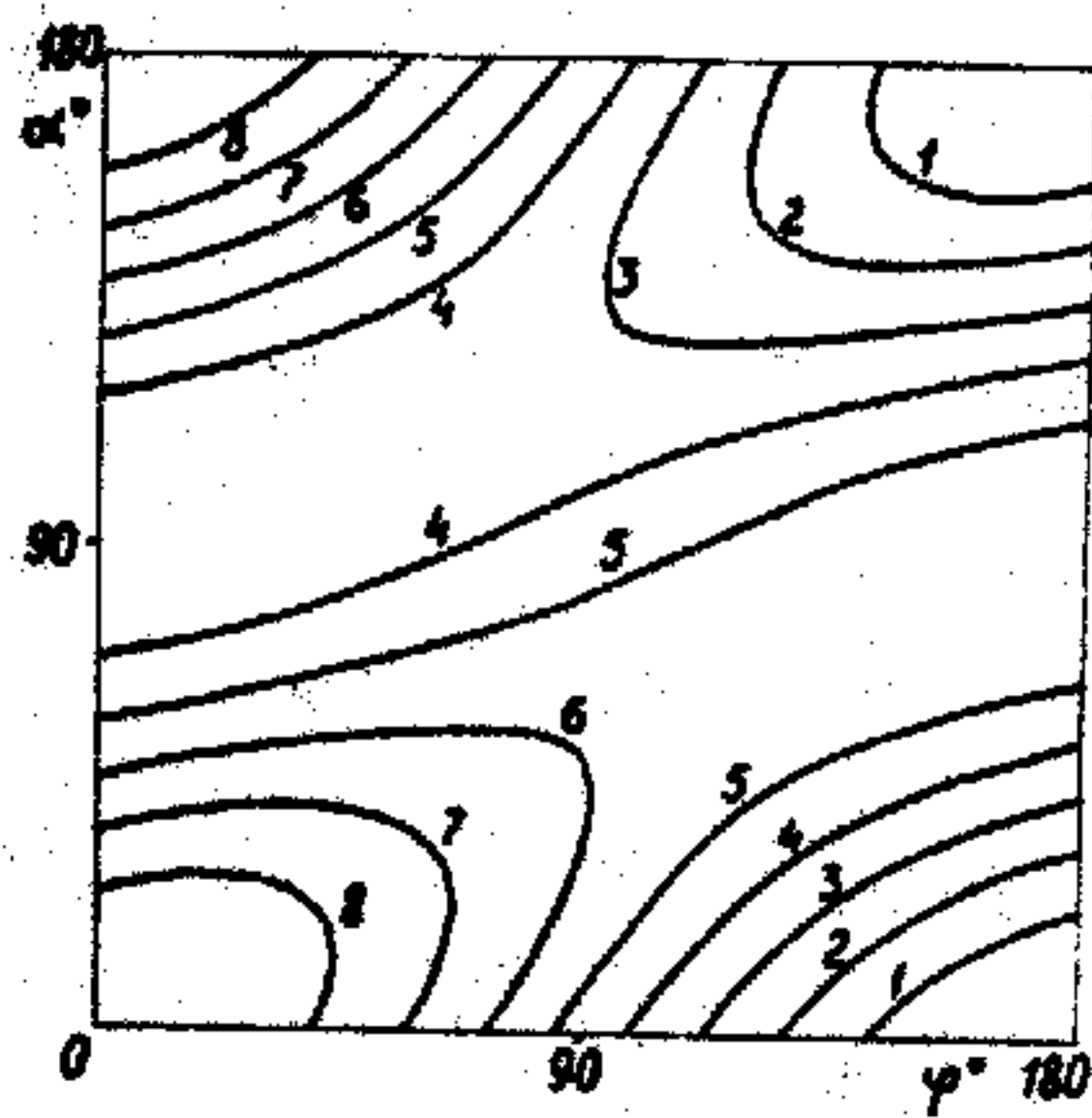


Рис. А2. Зависимость величины производных  $\frac{\partial H_x}{\partial x}$  (а) и  $\frac{\partial H_y}{\partial x}$  (б) от углов  $\alpha$  (направление  $\vec{r}$  на диполь) и  $\varphi$  (ориентации магнитного момента диполя относительно вектора  $\vec{r}$  ). Номера кривых соответствуют уровням, указанным в тексте.

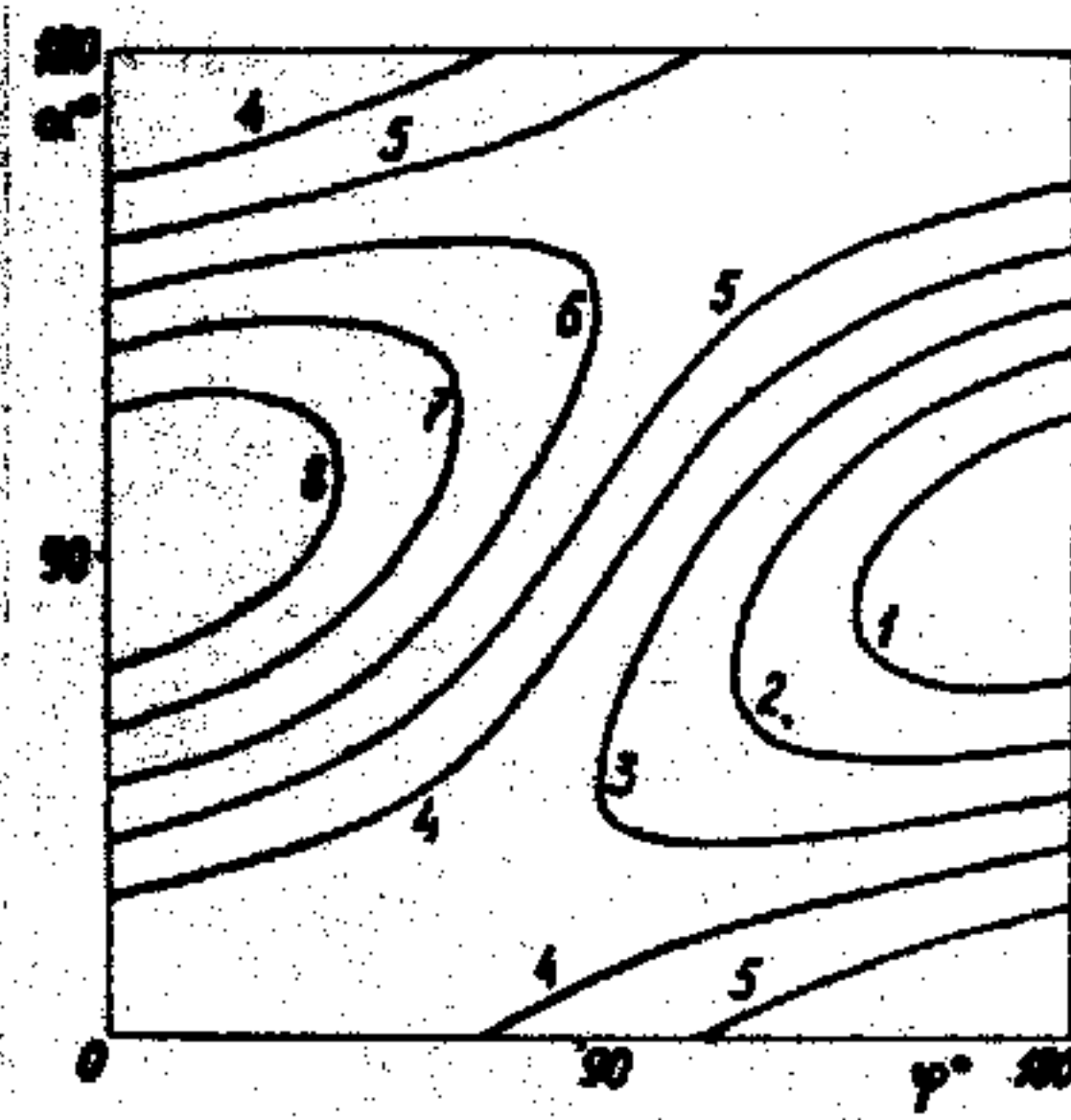
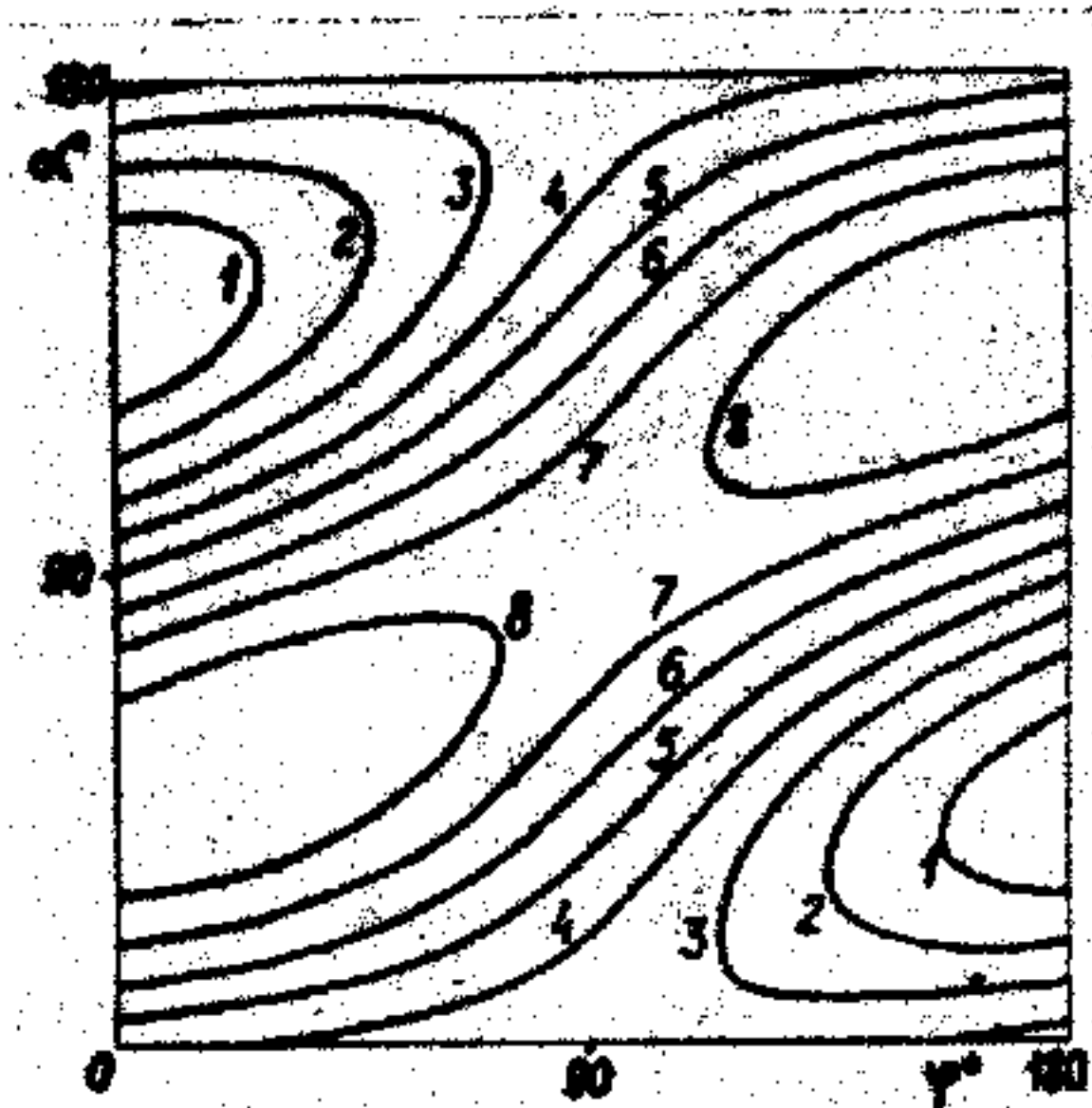


Рис.А3. Зависимость величины производных  $\frac{\partial H_x}{\partial y}$  (а) и  $\frac{\partial H_y}{\partial y}$  (б) от углов  $\alpha$  и  $\varphi$ . Обозначения кривых - те же, что и на рис.А2.

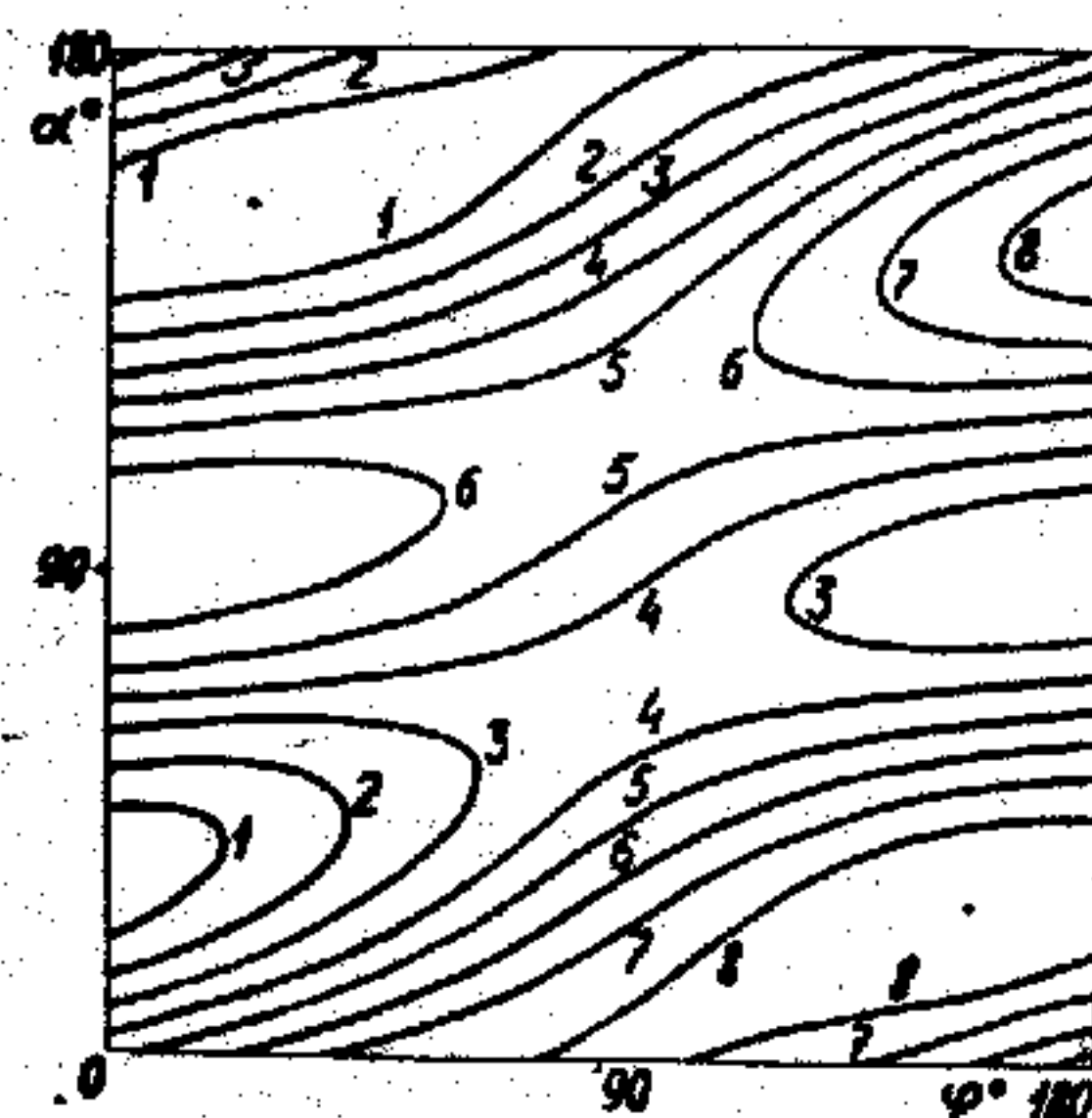
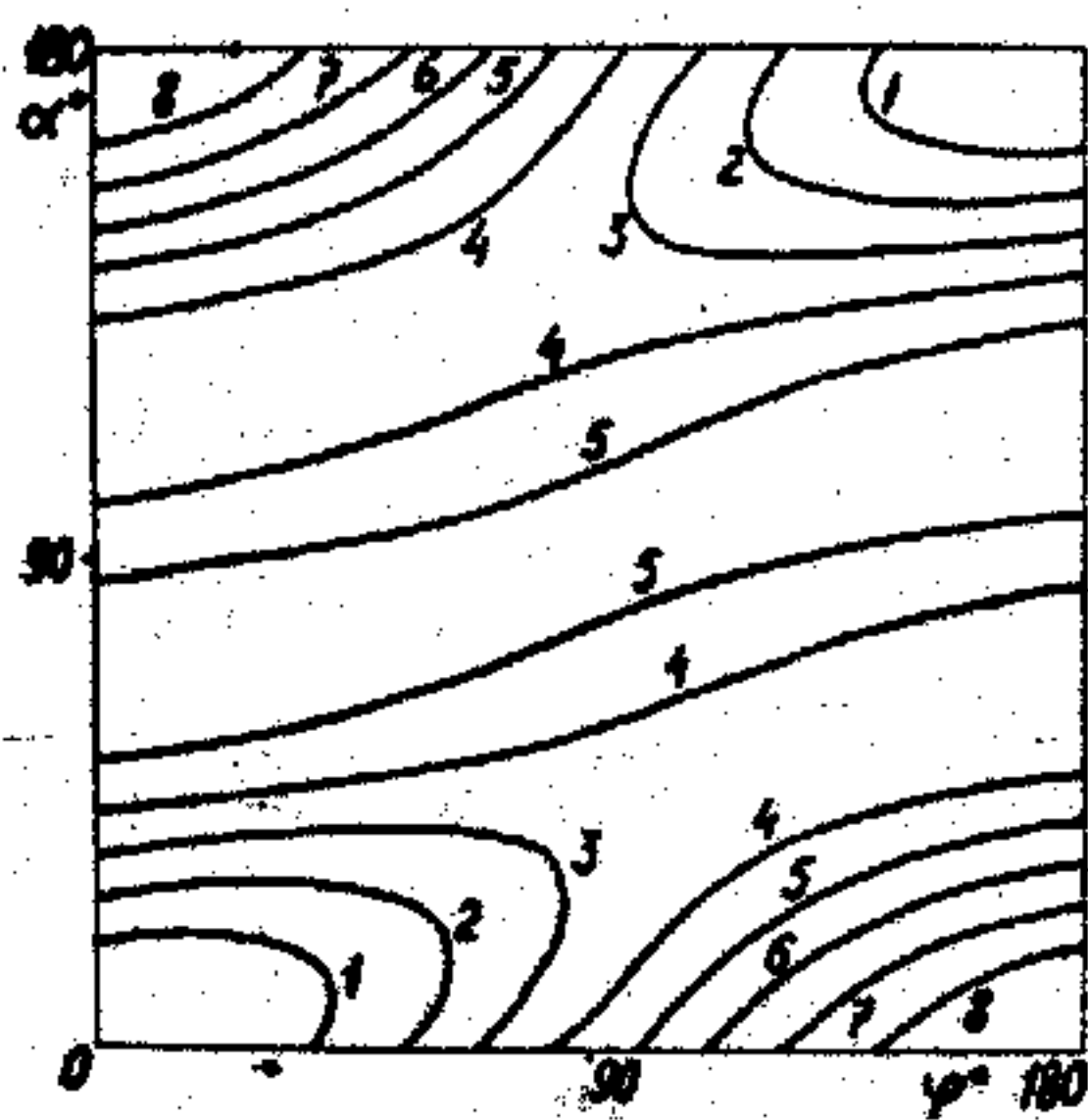


Рис.А4. Зависимость величины производных  $\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2}$  (а) и  $\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2}$  (б) от углов  $\alpha$  и  $\varphi$ . Обозначения кривых - те же, что и на рис.А3.

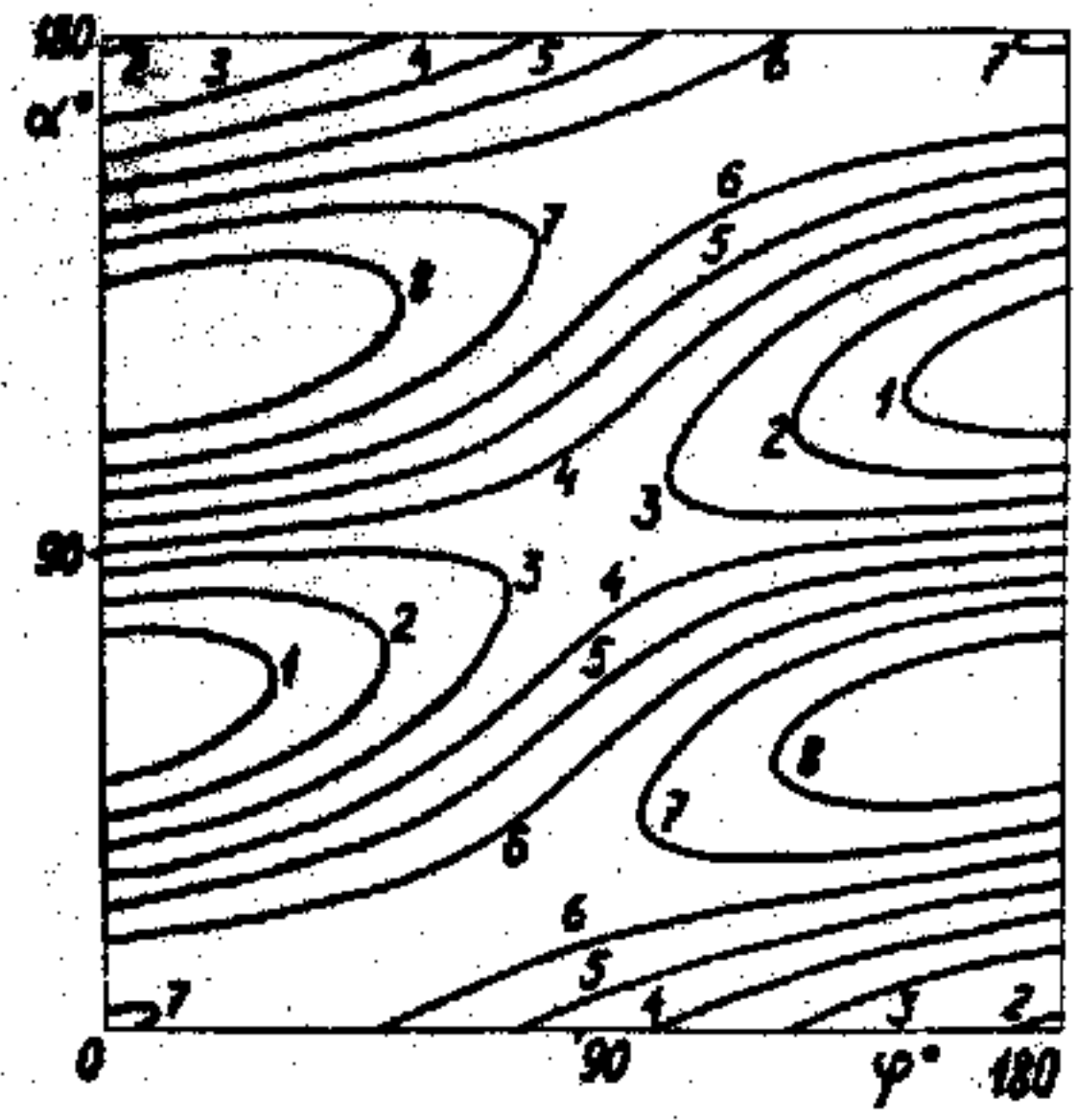
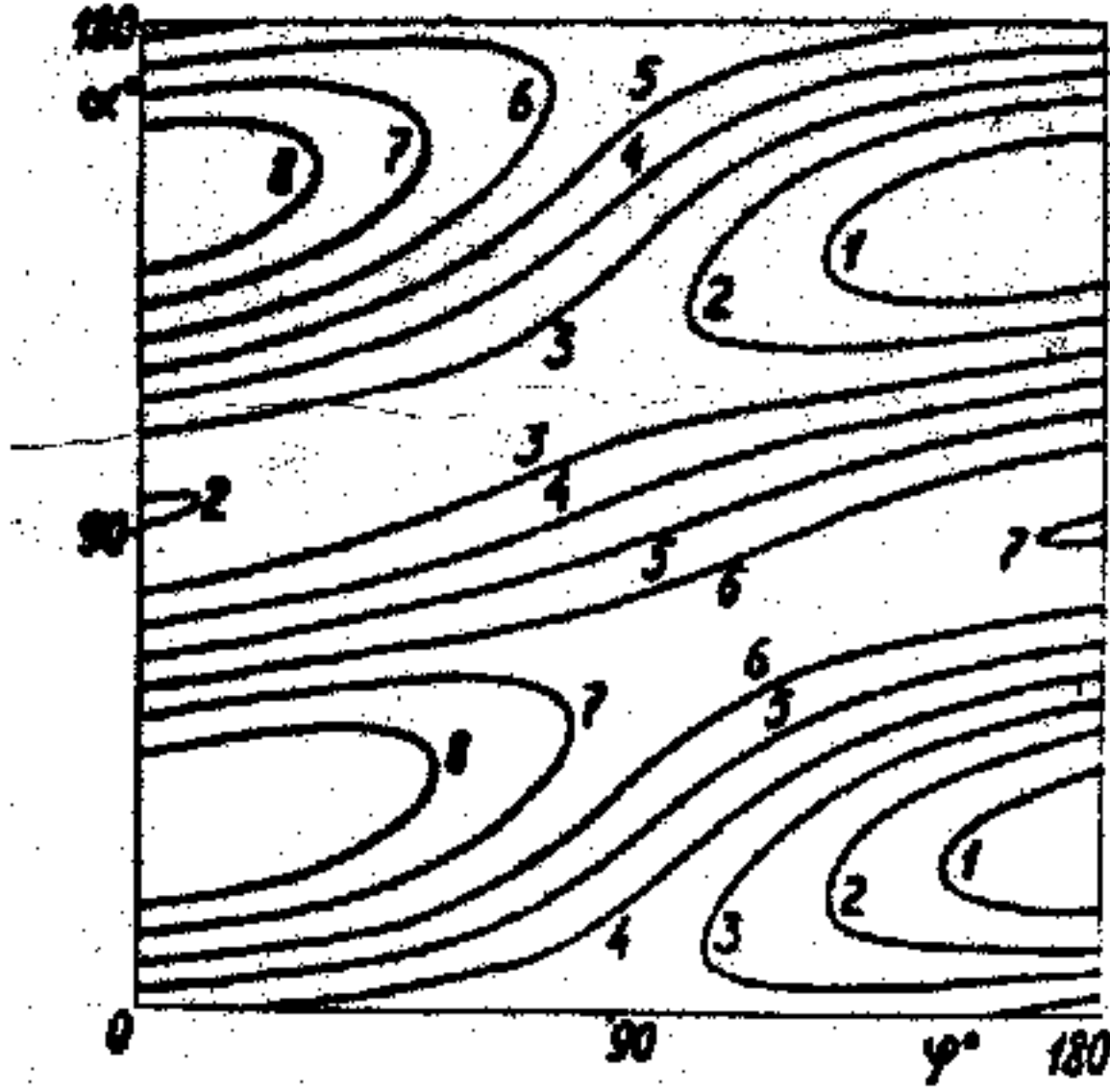


Рис.А5. Зависимость величины производных  $\frac{\partial^2 H_x}{\partial x \partial y}$  (а) и  $\frac{\partial^2 H_y}{\partial x \partial y}$  (б) от углов  $\alpha$  и  $\varphi$ .

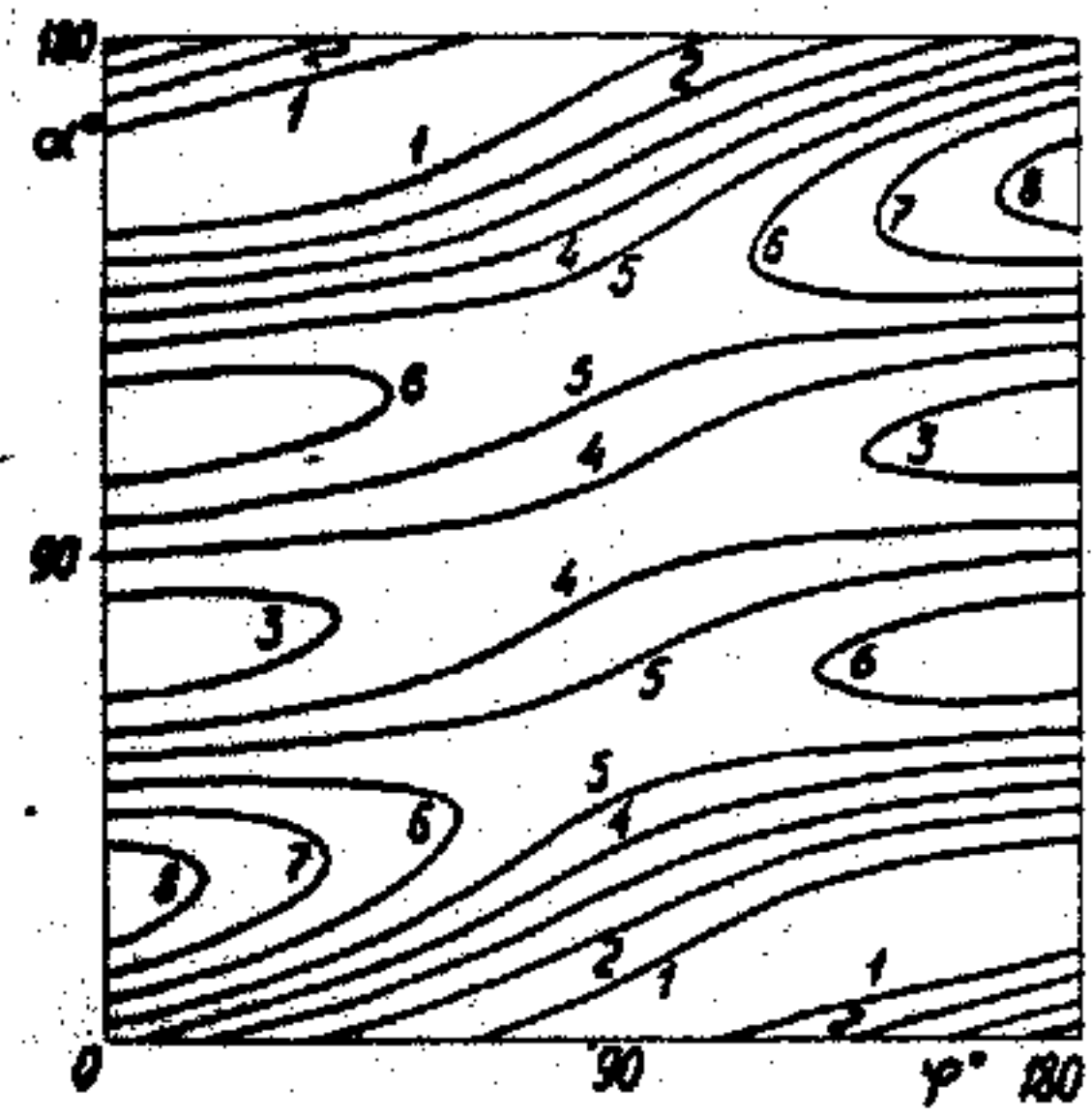
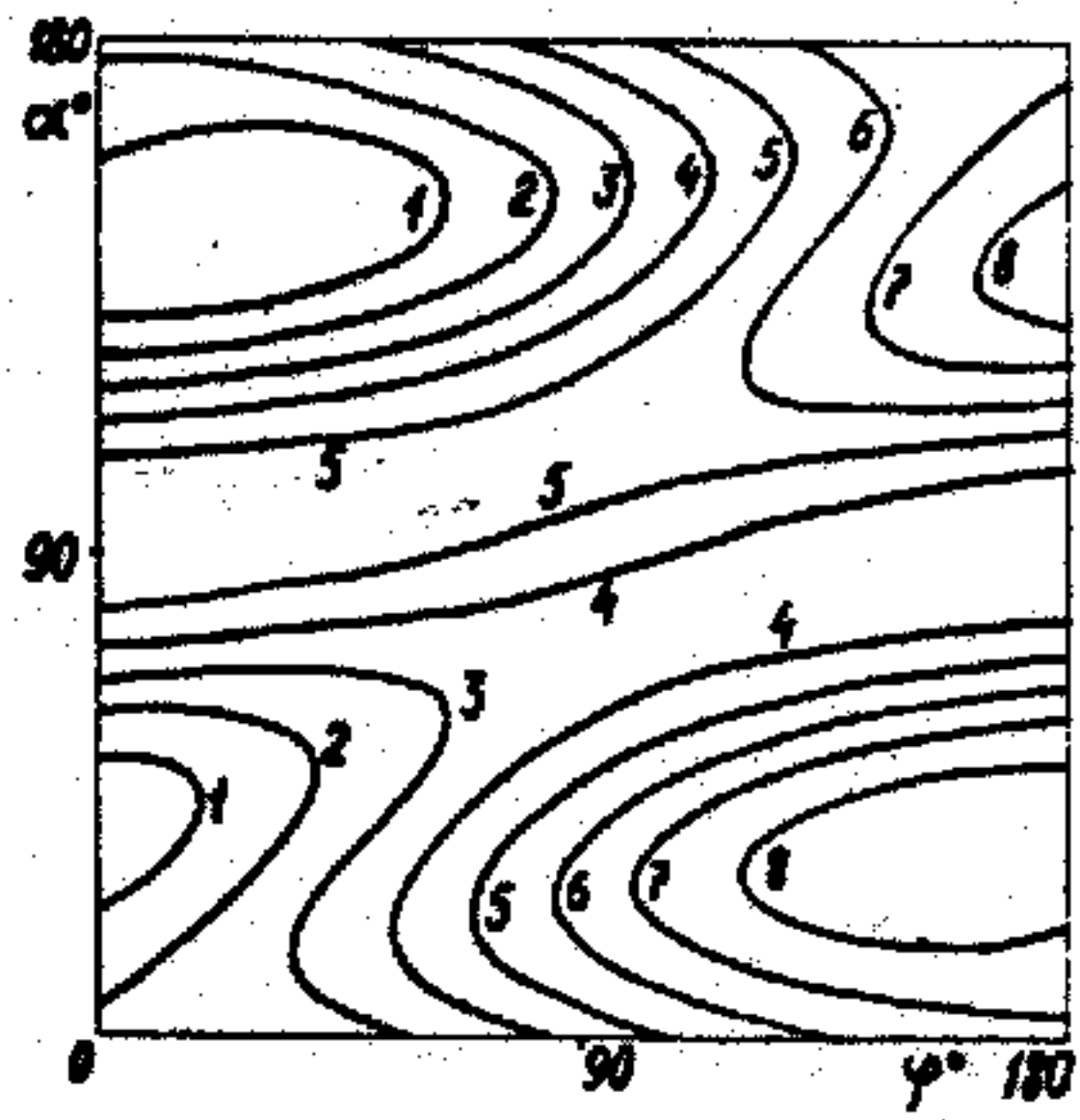


Рис.А6. Зависимость величины производных  $\frac{\partial^3 H_x}{\partial x^3}$  (а) и  $\frac{\partial^3 H_y}{\partial x^3}$  (б) от углов  $\alpha$  и  $\varphi$ .

типа  $\delta(H)$ . Для одномерной задачи (на прямой линии) при  $\alpha=0$  нетрудно получить предельные расстояния по каждой задаче для объектов с разными моментами, такие данные сведены в таблицу А1.

Таблица А1. Предельные расстояния (м) работоспособности А-ЛМЛС по разным задачам линейной магнитолокации при  $\alpha=0$  ( $L=100$  м, чувствительность магнитометра  $2 \cdot 10^{-13} \text{Тл} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{А/м}$ ).

Задача Величина магн. момента	Обнару- жение	Локация	Идентифи- кация
$10$	145	120	90
$10^2$	256	200	145
$10^3$	455	315	235
$10^4$	810	510	380
$10^5$	1440	810	610
$10^6$	2560	1290	970

При переходе к задаче на плоскости появляется еще задача угловой локации (определение направления на объект). Угловая диаграмма чувствительности (и предельного расстояния работоспособности по каждой задаче) для А-ЛМЛС может быть рассчитана следующим образом:

1. Обнаружение. Из (14) нетрудно получить (для той же чувствительности датчиков  $1,6 \cdot 10^{-7} \text{А/м}$ ):

$$r(m) < 81 \text{ м}^{1/4} |\cos \alpha|^{1/4} \quad \text{при } \alpha \neq \frac{\pi}{2} \quad (A1)$$

$$r(m) \approx 81 \text{ м}^{1/5} \quad \text{при } \alpha = \frac{\pi}{2} \quad (A2)$$

2. Угловая локация. Для нее нужно знать производные поля до третьего порядка включительно. Если  $|H''| \neq 0$ , то критерий работоспособности  $|H''| > 2\delta_{H''}$  записывается в виде:

$$r < 57 \text{ м}^{1/6} |\cos \alpha (3 \sin^2 \alpha - 4 \cos^2 \alpha)|^1 \quad (A3)$$

Тригонометрический множитель на большей части интервала близок к единице (из-за показателя степени  $1/6$ ), однако при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  и  $\alpha = \arctg \frac{\sqrt{3}}{2} = 49^\circ$  ситуация меняется и требуются дополнительные сведения, чтобы выявить причину "обнуления"  $H'''$ .

При  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  одновременно с  $H'''$  обращается в нуль и  $H'$ , так что здесь угловая локация осуществляется при более мягком условии (A2). Если  $H''' = 0$ , а  $H'' \neq 0$  и  $H' \neq 0$ , то остается неясным, то ли объект слишком далеко и третья производная просто меньше порога чувствительности из-за множителя  $1/r^6$ , то ли виноват тригонометрический множитель. Для  $\alpha \neq 49^\circ$  можно оценить величину  $H'''$  из измеренных ненулевых  $H'$  и  $H''$ :

$$H''' \approx \frac{(H'')^2}{5H'} \quad (A4)$$

что позволяет записать критерий угловой локации при  $\alpha = 49^\circ$ :

$$\frac{(H'')^2}{5H'} > 26H'' \quad (A5)$$

который после несложных подстановок приводит к:

$$r < 57 \text{ м}^{1/6} \quad (A3a)$$

т.е. к тому же условию (A3), только без тригонометрического сомножителя.

3. Определение расстояния до объекта. Интересно, что эта операция осуществляется точнее, чем угловая локация, и критерий работоспособности по дальности выполняется раньше, чем по углу. Исключение составляет угол  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , когда все нечетные производные равны нулю и для вычислений необходимо знать и четвертую производную. Если положить  $\frac{\sigma_{H''''}}{\sigma_H} \approx 10^{-5}$ , то получается условие:

$$r \lesssim 71 \text{ м}^{1/7} \quad \text{при } \alpha = \frac{\pi}{2} \quad (A6)$$

(впрочем, не сильно отличающееся от (A3a)).

Надо заметить, что влияние тригонометрических множителей на угловую диаграмму чувствительности по расстоянию локации довольно слабо, т.к. "провалы", обусловленные равенством нулю той или иной комбинации тригонометрических функций, очень узки и обычно на

уровне 0,5 измеряются десятками долями градуса.

Попробуем теперь оценить угловую диаграмму I-ЛМЛС. Критерий обнаружения (по каждой из компонент поля) при  $\varphi = 0$  требует выполнения любой из формул:

$$r < 97 M^{1/4} |1 - 4 \cos^2 \alpha|^{1/4} \quad (A7)$$

или

$$r < 115 M^{1/4} |\sin 2\alpha|^{1/4} \quad (A8)$$

что в итоге дает картину, изображенную на рис. А7.

Интересно, что угловая локация (для заданной ориентации дипольного момента объекта) осуществляется практически сразу же после обнаружения объекта, т.к. здесь для нее используются только те же первые производные. Что же касается определения расстояния до объекта, то здесь четырехкратное дублирование расчетных формул (любая из двух первых производных может комбинироваться с любой из двух вторых) делает диаграмму чувствительности практически круговой при максимальном расстоянии пространственной локации

$$r_{\text{макс}} \approx 76 M^{1/5} \quad (A9)$$

что для объектов с разными дипольными моментами составляет:

M (А.м <sup>2</sup> )	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
r <sub>макс</sub> (м)	120	190	300	480	760	1205

Нетрудно составить мнение и о работоспособности трехкоординатной Р-ЛМЛС типа 6(Н), поскольку она является суммой независимых А- и I-ЛМЛС.

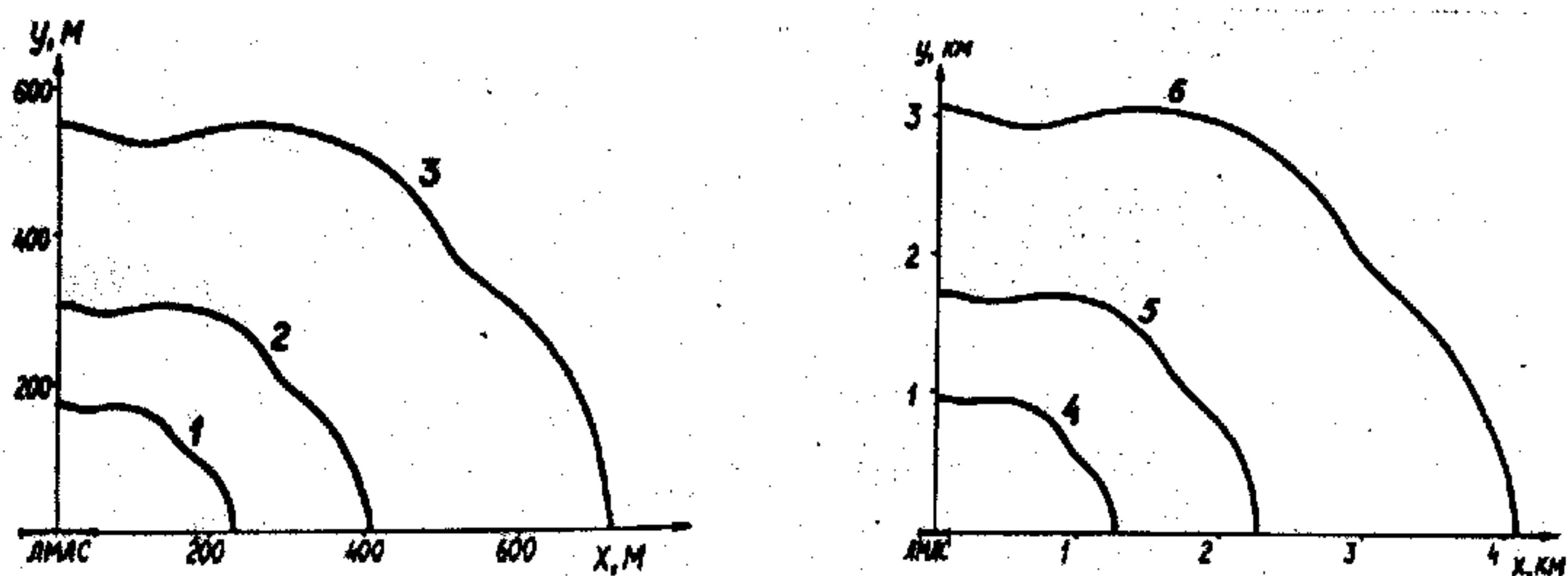


Рис. А7. Угловая диаграмма чувствительности I-ЛМЛС по задаче обнаружения объекта с моментом  $M = 10$  (1),  $10^2$  (2),  $10^3$  (3),  $10^4$  (4),  $10^5$  (5) и  $10^6$  (6)  $\text{А}\cdot\text{м}^2$  в первом квадранте ( $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ ).