

10

**И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р**

**И Я Ф 64 - 70**

**О.А.Золотовский, В.И.Коротеев, Р.Х.Куртмуллаев,**

**В.Н.Семенов**

**ТЕПЛОВАЯ УДАРНАЯ ВОЛНА В ПЛАЗМЕ**

**Новосибирск**

**1970**

68

О.А.Золотовский, В.И.Коротеев, Р.Х.Куртмуллаев, В.Н.Семенов

## ТЕПЛОВАЯ УДАРНАЯ ВОЛНА В ПЛАЗМЕ

### А Н Н О Т А Ц И Я

В работе исследованы возмущения, возникающие при расширении облака "горячих" электронов сквозь холодную плазму вдоль магнитного поля.

Обнаружено, что в определенных условиях перенос тепла, запасенного в электронной компоненте плазмы, происходит со скоростью много меньшей тепловой скорости "горячих" электронов, и носит характер скачка температуры. Формирование этой своеобразной тепловой ударной волны связано с возникновением трения встречного потока холодных электронов об ионы, причиной которого может быть ионно-звуковая неустойчивость. Измеренные значения скорости движения и ширины фронта возмущений согласуются с теоретическими представлениями.

Описана область параметров, в которой скорость возмущений близка к тепловой скорости "горячих" электронов. В этой области трудно четко идентифицировать квазистационарный фронт возмущений, и их характер, по-видимому, аналогичен исследованному в [4, 5].

В опытах с бесстолкновительной плазмой было обнаружено, что вдоль магнитного поля возможен перенос тепла, запасенного в электронной компоненте плазмы, со скоростью значительно меньшей тепловой, причём само возмущение имеет подобие ударной волны /1/. В данной работе излагаются результаты детального исследования этого явления.

Эксперименты проводились на установке УН-4 /2/ в условиях, характерных для бесстолкновительных ударных волн. Водородная плазма с начальной концентрацией  $N_0 \sim 6 \cdot 10^{12} - 6 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{см}^3}$  и температурой электронов  $T_e \sim 1-3$  эв создавалась в цилиндрическом объёме (диаметр 16 см, длина 1 м), помещенном в продольное квазистационарное магнитное поле  $H_0 \sim 200 - 1800$  э. В отличие от условий возбуждения МГД ударных волн /2/ в этих экспериментах турбулентный нагрев плазмы осуществлялся благодаря аннигиляции встречно направленных полей - квазистационарного  $H_0$  и быстропеременного  $H_{\sim}$ , которое индуцировалось узким цилиндрическим витком (диаметр 16 см, ширина 5 см), расположенном на одном из концов плазменного объёма.

Изменение магнитного поля и скорость распространения возмущений регистрировались магнитными зондами. Контроль за плотностью плазмы осуществлялся с помощью скоростного СВЧ-интерферометра. Значение потенциала плазмы определялось электрическими зондами с расстоянием между штырьками 20 см. Для регистрации "горячих" (с энергией  $T_e \sim 1$  кэВ) электронов применялись гамма-датчики. Принцип действия датчиков основан на измерении интегральной интенсивности тормозного излучения потока "горячих" электронов, падающих на металлическую мишень. Световой поток, образующийся при поглощении тормозных квантов в органическом сцинтилляторе, с помощью световода выводился на фотоумножитель. Использование трех гамма-датчиков, закрытых металлическими фольгами разной толщины и имеющих общую мишень, позволило оценить энергию и плотность "горячих" электронов. Гамма датчики предварительно калибровались с помощью потока моноэнергетических электронов импульсной рентгеновской трубки.

Измерения показали, что, в результате быстрого нагрева плазмы под возбуждающим витком, возникает возмущение (рис.1), распространяющееся вдоль магнитного поля. Наиболее

характерной особенностью этого процесса является уменьшение магнитного поля в возмущенной области<sup>1)</sup> одновременно с появлением "горячих" электронов, движущихся вдоль поля из под возбуждающего витка. При этом плотность плазмы уменьшается, а магнитное поле вне плазменного объема увеличивается. Поэтому естественно связать указанные особенности наблюдаемого процесса с диамагнитным расширением плазмы.

Было обнаружено, что при фиксированных значениях квазистационарного  $H_0$  и быстропеременного  $H_{\sim}$  полей характер возмущений определяется плотностью начальной плазмы. По этому признаку можно выделить две области начальных концентраций.

На рис.1 приведены типичные осциллограммы продольной компоненты магнитного поля для этих областей.

В области концентраций  $n_0 \sim (1 - 6) \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{см}^3}$  возмущения имеют достаточно четко формирующийся фронт (рис.1а), ширина которого сохраняется при движении возмущения вдоль поля на расстоянии  $x \sim 40$  см от возбуждающего витка. В аналогичных экспериментах на установке УН-6 /3/, имеющей большие геометрические размеры, это расстояние достигало значения  $x \sim 120$  см. В дальнейшем эта область концентраций будет называться областью А.

В области концентраций  $n_0 < 1 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{см}^3}$  (область Б) характер возмущения таков (рис.1б), что трудно четко идентифицировать квазистационарный фронт возмущения.

Профили концентрации "горячих" электронов и потенциала плазмы (рис.2) при переходе из области А в область Б трансформируются подобно изменению профиля магнитного поля.

Ширина фронта концентрации "горячих" электронов совпадает с шириной фронта потенциала и несколько меньше ширины фронта магнитного поля, а скорости их движения одинаковы.

В области А, в типичных условиях эксперимента, значения температуры ( $T_r$ ) и относительной плотности ( $\frac{n_r}{n_0}$ ) "горячих" электронов лежат в диапазоне  $T_r \sim 400-900$  эв,

$\frac{n_r}{n_0} \sim 0,1 - 0,5$ . При этом ширина фронта магнитного поля из-

1) Предшествующий уменьшению магнитного поля эффект сжатия поля будет рассмотрен ниже.

меняется от 5 см до 20 см.

Скорость фронта в области А лежит в пределах  $V \sim (1 - 5) \cdot 10^8$  см/сек, что на порядок превышает альфвеновскую, но значительно меньше тепловой скорости "горячих" электронов  $V_{Te} \sim \sqrt{\frac{T_e}{m}} \sim (1 - 2,5) \cdot 10^9$  см/сек, оцениваемой с помощью гамма-датчиков. В области Б, где не существует стационарного фронта, скорости возмущений  $V \sim V_{Te}$ .

Величина скачка потенциала в области А  $\varphi \sim 600 - 1200$  в одного порядка со значением средней энергии "горячих" электронов. В области Б величина потенциала намного меньше этих значений.

Изложенные результаты можно интерпретировать следующим образом. Облако "горячих" электронов, возникающее под возбуждающим витком, расширяется вдоль силовых линий магнитного поля, что, в силу квазинейтральности, приводит к возникновению встречного потока холодных электронов. Тот факт, что скорость распространения возмущения в области Б близка к  $V_{Te}$ , а поляризационный потенциал имеет значение  $\varphi_1 \sim \frac{n_e}{n_0} E_r$  говорит о том, что в этом случае холодные электроны движутся свободно, без трения. Такие возмущения, по-видимому, подобны исследованным в [4, 5].

Уменьшение скорости движения фронта до  $V \ll V_{Te}$ , возрастание поляризационного потенциала до значения  $\varphi \gg \varphi_1$ , и существование стационарного фронта в области А, по-видимому, можно связать с возникновением эффективного трения холодных электронов об ионы. В этом случае скачок потенциала представляет собой потенциальный барьер для "горячих" электронов и одновременно ускоряет холодные электроны невозмущенной плазмы навстречу движению возмущения. Предположение о возникновении трения согласуется со следующим наблюдением: в области А величина скорости холодных электронов  $V_x$  во фронте, оцененная по средней концентрации и средней тепловой скорости "горячих" электронов с учётом условия квазинейтральности ( $n_e V_e = n_0 V_x$ ) превышает пороговое значение, соответствующее возбуждению ионно-звуковой неустойчивости  $V_{rp} \sim C_s = \sqrt{\frac{T_e}{M}}$  ( $T_x$  - температура холодных электронов во фронте возмуще-

ния,  $M$  - масса иона). Напротив, в области Б, где  $V \sim V_{Te}$ , величина  $V_x$  всегда меньше  $V_{gr}$ . Таким образом причиной возникновения трения может явиться ионно-звуковая неустойчивость, возбуждаемая встречным током холодных электронов.

Теоретическое рассмотрение показывает /6/, что при учёте неустойчивости возможны решения для стационарных движений описанного типа, представляющих собой своеобразную тепловую ударную волну. Скорость её распространения  $U \sim \sqrt{\frac{M}{m}} \sqrt{\frac{n_0}{n_r}} \sqrt{\frac{T_r}{m}}$

а ширина фронта  $\Delta \sim \frac{M}{m} \lambda_D$ , где  $\lambda_D = \sqrt{\frac{kT_r}{4\pi n_r e^2}}$ .

При  $T_r$  и  $\frac{n_r}{n_0}$ , соответствующих условиям эксперимента, эти выражения дают  $U \sim (3-5) \cdot 10^8$  см/сек,  $\Delta \sim 5-15$  см, что удовлетворительно согласуется с измеренными значениями этих параметров.

Дополнительный аргумент в пользу описанного механизма формирования наблюдавшихся возмущений дало исследование условий их возникновения. Оказалось, что возмущения в плазме возникают в том случае, если происходит аномальная диффузия быстропеременного ( $H_{\sim}$ ) поля в плазму под возбуждающим витком. Измерения скорости диффузии свидетельствуют о низкой проводимости плазмы  $\sigma \sim 10^{13}$  ед  $C^2/S^2E$  (по сравнению с кулоновской при  $T_e \sim 0,5 - 1$  кэВ), что при больших градиентах магнитного поля должно привести к значительному увеличению электронной температуры.

В связи с указанными особенностями генерации, наблюдаемые возмущения имеют некоторые специфические признаки. Поскольку диффузия начинается с поверхности плазменного столба и поле постепенно проникает вглубь, то нагрев и растекание "горячих" электронов, находящихся на границе плазмы, начинается раньше, чем электронов, находящихся вблизи оси. Исследование радиального распределения фронта волны установлено, что он действительно не плоский, а имеет вид конуса, обращенного основанием в сторону распространения волны (рис.3). Более раннее появление "горячих" электронов в периферийной области плазменного столба приводит к тому, что магнитное поле вытесняется из этой области как наружу, так и внутрь плазмы. Поэтому магнитные зонды, установленные вблизи оси, фиксируют перед фронтом волны сжатие магнитного поля, которое отсутствует на границе плазмы.

Проведенные исследования позволяют заключить, что при разлете облака "горячих" электронов вдоль магнитного поля в определенных условиях может возникать стационарное движение типа ударной волны. В такой волне вещество плазмы в целом остаётся неподвижным, а тепло переносится лишь незначительной его частью - "горячими" электронами.

Авторы выражают глубокую благодарность Р.З.Сагдееву за интерес к работе и полезные обсуждения полученных результатов.



Рис. 1. Сигнал с магнитной головки в разных сечениях (1-2).

а)  $n_0 \sim 3 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{см}^3}$ ,  $H_0 \sim 1200 \text{ э}$ ,  $H_{\text{ср}} \sim 4 \text{ э}$ .

б)  $n_0 \sim 5 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{см}^3}$ ,  $H_0 \sim 1200 \text{ э}$ ,  $H_{\text{ср}} \sim 4 \text{ э}$ .

## Л и т е р а т у р а

1. Р.Х.Куртмуллаев. Доклад на II международном симпозиуме по бесстолкновительным ударным волнам, Фраскати (1969).
2. Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин, В.И.Пильский, Р.З.Сагдеев. Доклад *СМ* - 21/218 на II международной конференции по физике плазмы, Калэм (1965).
3. Р.Х.Куртмуллаев, В.Л.Масалов, К.И.Меклер, В.Н.Семенов. ЖЭТФ, в печати.
4. А.А.Иванов, Л.Л.Козоровицкий, В.Д.Русанов, ДАН, 184, № 4, 811 (1969).
5. Д.Д.Рютов, Р.З.Сагдеев, ЖЭТФ, 58, № 2, 739 (1970).
6. А.А.Иванов, В.Д.Русанов, Р.З.Сагдеев. Письма в ЖЭТФ, в печати.



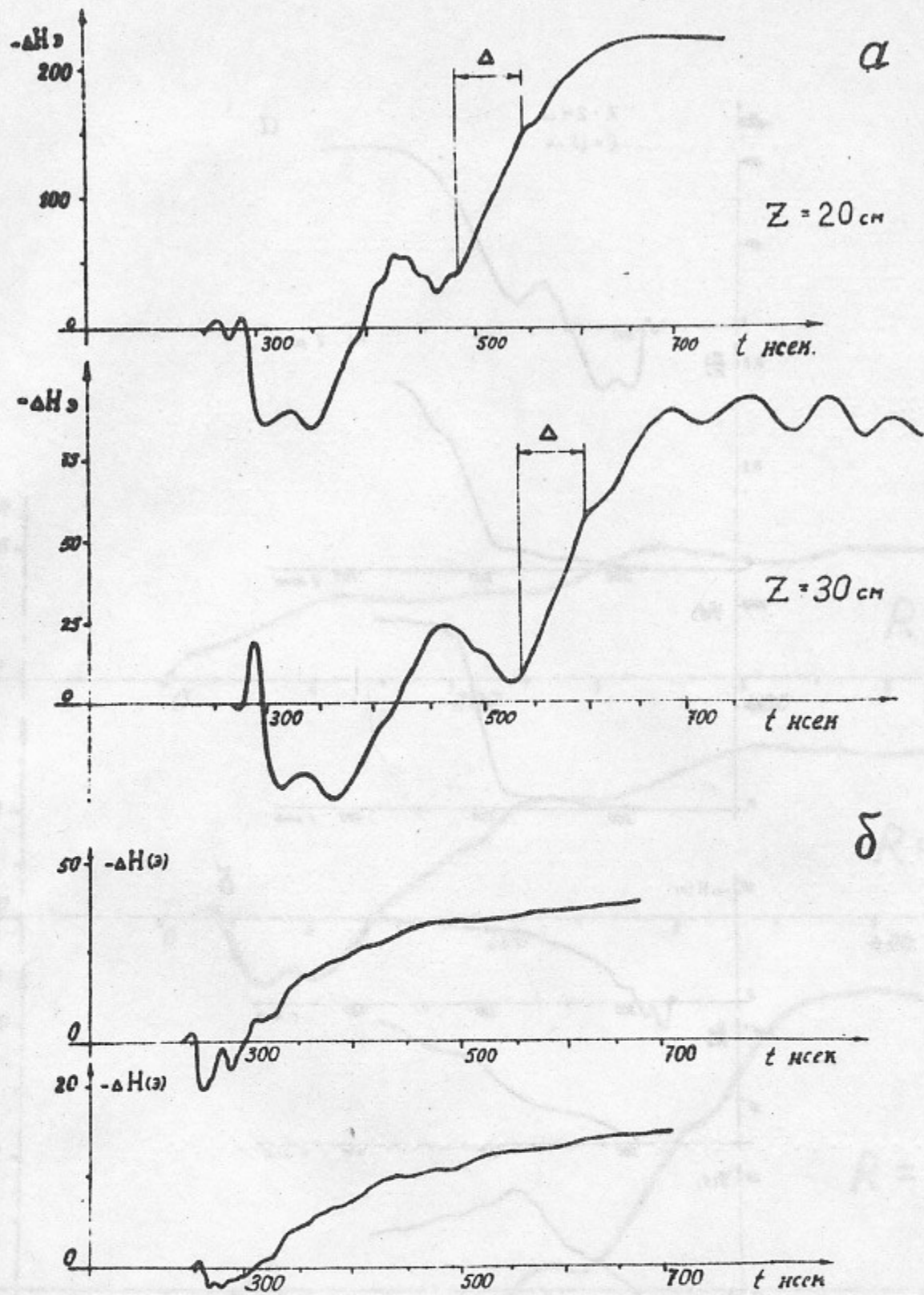


Рис.1. Сигнал с магнитных зондов в разных сечениях ( $Z$ ).

а)  $n_0 \sim 3 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{см}^3}$ ,  $H_0 \sim 1200$  э,  $H_z \sim 4$  кэ.

б)  $n_0 \sim 8 \cdot 10^{12} \frac{1}{\text{см}^3}$ ,  $H_0 \sim 1200$  э,  $H_z \sim 4$  кэ.

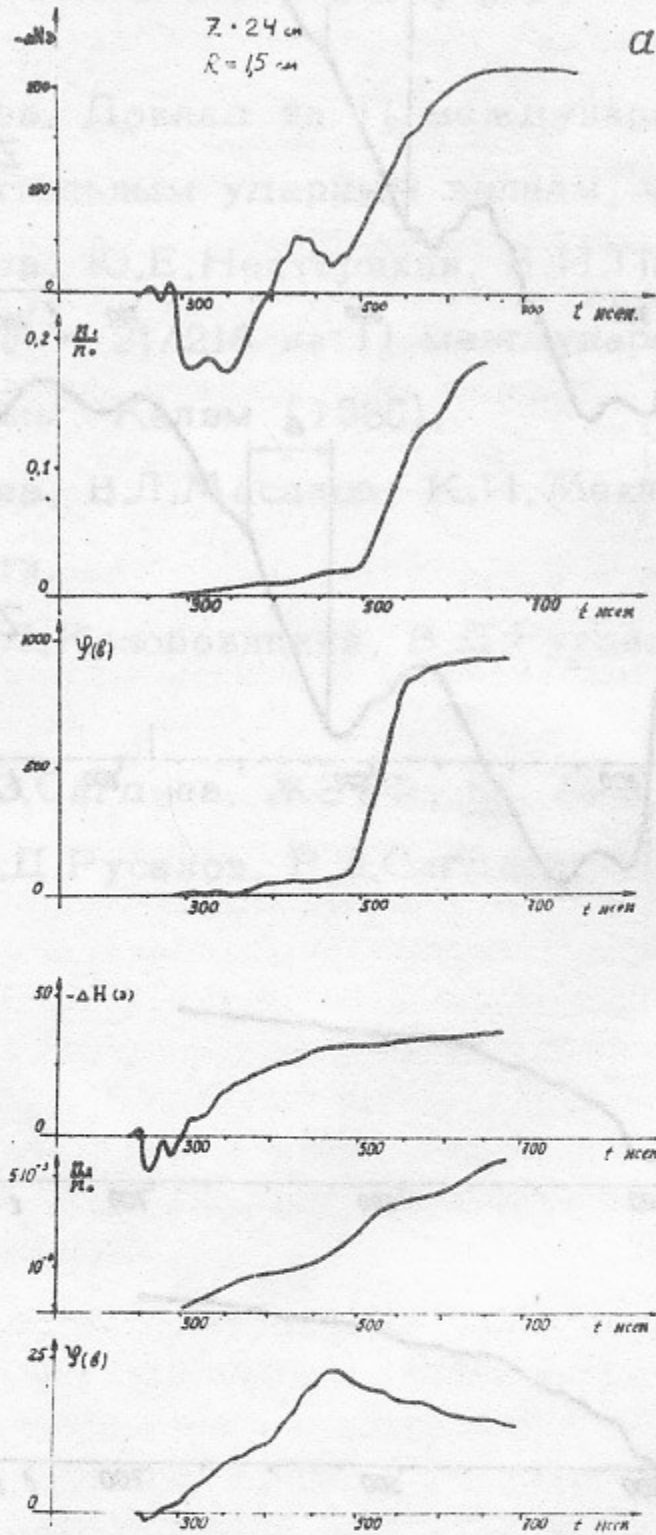


Рис.2. Профили магнитного поля, концентрации "горячих" электронов и потенциала плазмы. а)  $n_0 \sim 3 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{см}^3}$ ,

$H_0 \sim 1200 \text{ э}, H_{\sim} \sim 4 \text{ кэ.}$  б)  $n_0 \sim 8 \cdot 10^{12} \frac{1}{\text{см}^3}$ ,  $H_0 \sim 1200 \text{ э}, H_{\sim} \sim 4 \text{ кэ.}$

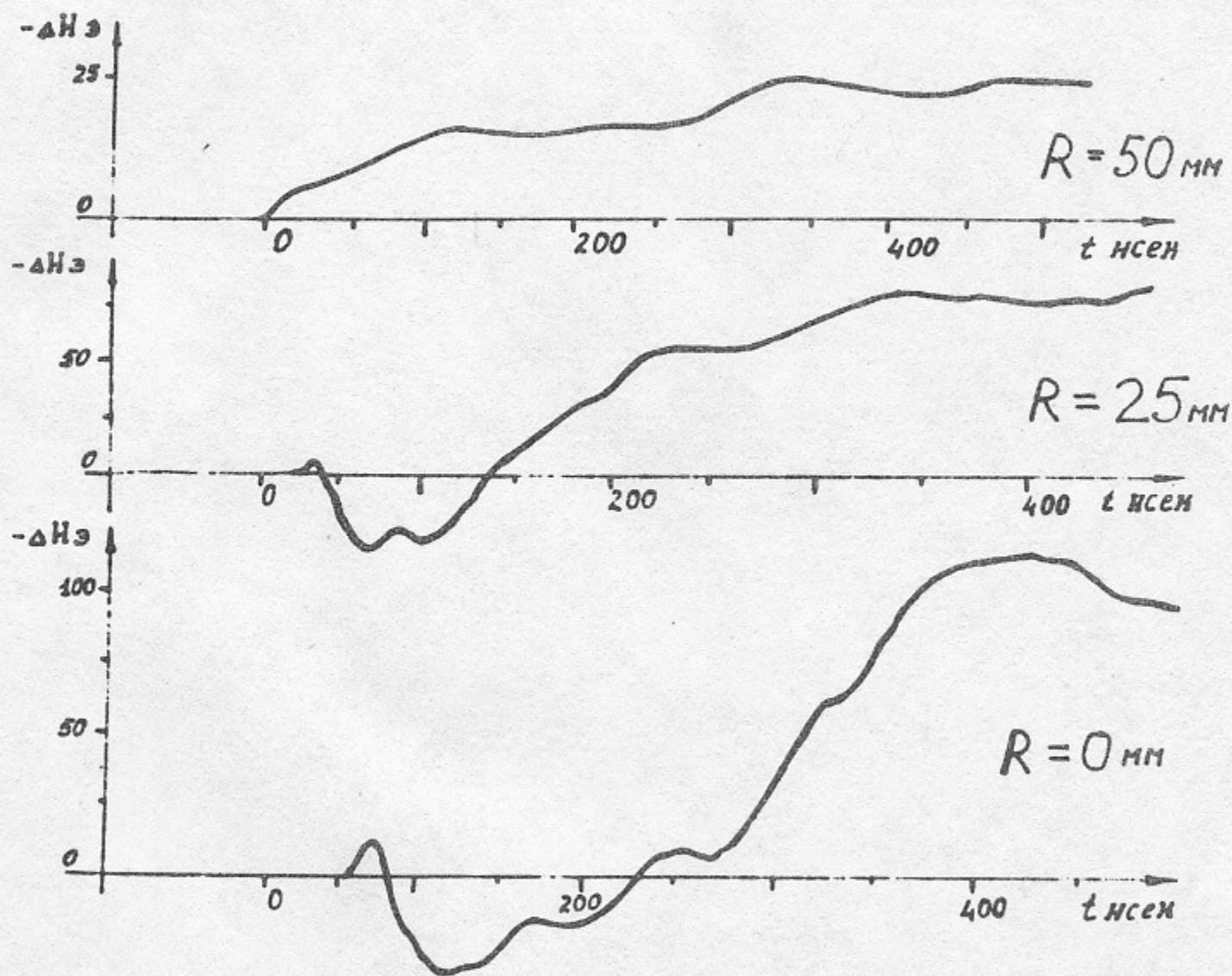


Рис.3. Сигналы с магнитных зондов на разных расстояниях от оси ( $R$ ).

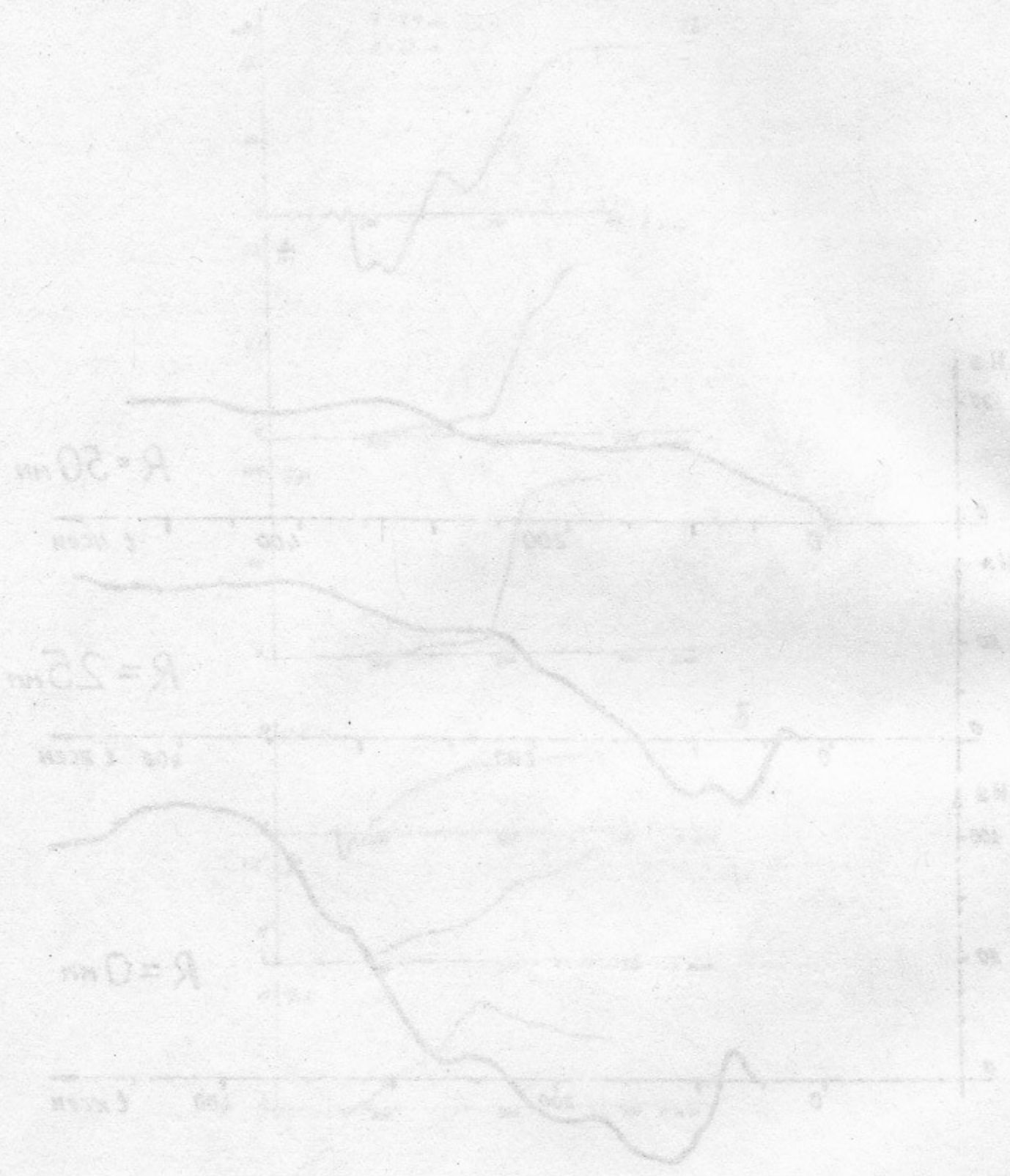


Рис. 2. Профили метрического поля, соответствующие "горным" зонам

---

Ответственный за выпуск В.И.Коротеев  
 Подписано к печати 19.УШ.70г.  
 Усл. 0,6 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно.  
 Заказ № 64 . ПРЕПРИНТ

---

Отпечатано на ротапинтере в ИЯФ СО АН СССР, нв.