

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Савченко М. А. // ФТТ. 1964. 6. С. 864. [2] Савченко М. А., Стефанович А. В. Флуктуационная сверхпроводимость магнитных систем. М., 1986. [3] Ильичев В. И., Савченко М. А., Стефанович А. В. Высокотемпературная сверхпроводимость керамических систем. М., 1992.

Поступила в редакцию  
22.11.93

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 3

УДК 534.222:537.625

### НЕЛИНЕЙНОЕ ВСТРЕЧНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТОУПРУГИХ ВОЛН В ФЕРРИТАХ

Л. К. Зарембо, С. Н. Карпачев, В. Н. Польченко, А. И. Яфасов  
(кафедра акустики)

Приведены данные экспериментальных работ по изучению распространения магнитоупругих волн в монокристаллах марганец-цинковых шпинелей. Описан автоматизированный магнитоакустический спектрометр, применяющийся в эксперименте. Обнаружено, что сигнал спинового отклика встречных магнитоупругих волн в условиях магнитоакустического резонанса увеличивается на несколько порядков. Впервые обнаружено явление автосвертки одиночного магнитоупругого импульса. Обсуждаются вопросы применения полученных результатов в целях дефектоскопии магнитоупорядоченных материалов.

Ранее были получены экспериментальные и теоретические результаты [1, 2], показавшие, что в области магнитоакустического резонанса (МАР) повышается эффективность генерации высших гармоник магнитоупругой волны. Само явление МАР заключается в синхронном взаимодействии упругой и спиновой волны в определенной области внешних магнитных полей и проявляется в увеличении эффективной акустической нелинейности и затухания. Особенно ярким примером резонансного повышения нелинейности является МАР в железиттриевом гранате (ЖИГ) [3], в котором она возрастает на 5—6 порядков по сравнению с нерезонансным значением, характерным для большинства твердых тел. Встречное взаимодействие магнитоупругих волн, однако, до сих пор исследовалось лишь в нерезонансных областях [4, 5]. Между тем вполне логичным был вывод о том, что в условиях МАР такое взаимодействие наиболее эффективно. Тем не менее это не очевидно и влияние резонанса на эффективность процесса неоднократно подвергалось сомнению.

Для неэллиптических образцов из-за неоднородности внутреннего поля условия МАР достигаются локально, и, как показано в [6], в этих локализованных резонансных областях при низкочастотном МАР (десятки МГц) еще сохраняется развитая доменная структура. Согласно [6], для 180°-доменной структуры резонансные области для лево- и правополяризованных магнитоупругих волн (в которых вектор поляризации вращается соответственно против и по часовой стрелке в направлении волнового вектора  $\mathbf{k}$ ) для фиксированного значения внешнего поля разнесены в пространстве и находятся в доменах различного знака. Поскольку обычно в эксперименте используются волны с линейной поляризацией, то, следовательно, для двух поляризационных ком-

понент каждой из них резонансная область раздваивается\*). Кроме того, если учесть, что собственные спиновые волны в неоднородном внутреннем магнитном поле распространяются лишь в направлении его убывания (по модулю), а для резонанса необходимо не только условие равенства частот спиновой и упругой волны, но и совпадение их волновых векторов, то следует вывод, что, очевидно, в области внутренних полей с сильной неоднородностью резонансные условия выполняются лишь для определенного направления распространения упругой волны. То есть, возвращаясь к встречному взаимодействию, следует отметить, что эффективная нелинейность в неоднородном поле возрастает лишь для одной из взаимодействующих волн.

Несколько другая ситуация возникает в центре кристалла, где внутреннее поле достаточно однородно, особенно для тонких и длинных образцов. Здесь уже вполне возможно, что одна и та же область (один и тот же домен) является резонансной для одной из поляризационных компонент первой взаимодействующей волны и для другой (вращающейся в противоположном направлении относительно своего  $k$ ) компоненты встречной волны. Именно в центре кристалла и следует ожидать наиболее эффективного взаимодействия встречных волн. Наиболее простое экспериментальное наблюдение такого взаимодействия заключается в регистрации сигнала спинового отклика — переменного магнитного поля удвоенной частоты, однородного по пространству в пределах области взаимодействия.

## 1. Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводились на многофункциональном автоматизированном магнитоакустическом спектрометре (подробное описание которого дано в [7]), блок-схема которого представлена на рис. 1. Управляющим элементом в данной реализации является персональная ЭВМ (6) типа ДВК-2М, сопряженная с крейтом КАМАК (7) и — через последний — с периферийными устройствами. Стробоскопический вольтметр В9-5 (11) позволяет связать аналоговую часть аппаратуры обработки сигнала с крейтом КАМАК. Сама аналоговая часть состоит из тракта излучения радиоимпульса (в эксперименте использовалась частота 30 МГц, длительность импульса 1,5 мкс), тракта приема сигнала (с возможностью приема как на основной, так и на кратных частотах) и блока управления (4) электромагнитом (5). Процесс измерения магнитоакустических спектров (зависимости амплитуды первой или кратных гармоник упругой волны, прошедшей через образец, от магнитного поля) организован следующим образом. Генератор импульсов (15) вырабатывает синхроимпульсы для вольтметра (11), осциллографа (14) и второго генератора импульсов (12), который усиливает этот импульс и запускает генератор радиоимпульсов (9), сигнал с которого поступает на излучающий пьезопреобразователь (10) (или на два пьезопреобразователя) и соответственно в виде упругих волн — в исследуемый образец (13). К другому концу образца может быть приклеен либо приемный (19), либо излучающий преобразователь (в ряде экспериментов использовался

\*) Здесь и далее мы будем рассматривать лишь взаимодействие встречных волн одной и той же частоты. Вопрос о возможности нелинейного взаимодействия волн разной частоты является предметом отдельного рассмотрения, так как очевидно, что для таких волн резонансные условия достигаются в разных частях кристалла согласно формуле  $\omega_{res} = \gamma H_{eff}$ , где  $\omega_{res}$  — резонансная частота,  $\gamma$  — магнитомеханическое отношение для электронного спина,  $H_{eff}$  — эффективное локальное магнитное поле, равное сумме внешнего и внутреннего полей.

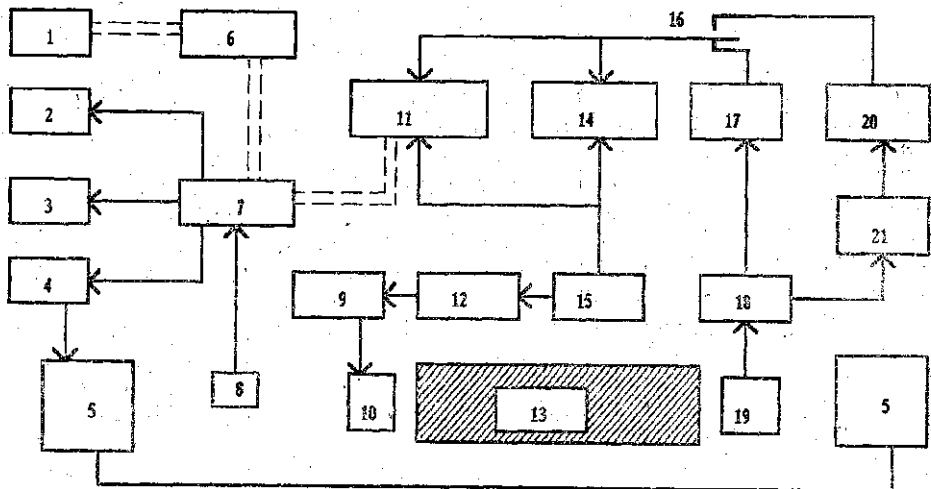


Рис. 1. Блок-схема автоматизированного магнитоакустического спектрометра: 21 — фильтр низкой частоты, служащий для предотвращения перегрузки мощным сигналом основной частоты усилителя У2; 18 — аттенуатор, ослабляющий сигнал на входе У1 для избежания его перегрузки; остальные обозначения приведены в тексте

один и тот же преобразователь для выполнения этих функций). Приемный тракт (усилители: (17) — настроенный на основную, (20) — на вторую гармонику) может принимать сигнал как с приемного пьезопреобразователя, так и с катушки, намотанной вокруг образца. Коммутация каналов осуществляется с помощью ключа (16).

Схема управления электромагнитом (4) позволяет менять ток в пределах  $\pm 5$  А (реальное поле зависит от расстояния между полюсами электромагнита). Применение двухканального аналого-цифрового преобразователя для контроля магнитного поля (один канал служит для измерения его значения с помощью датчика Холла (8), второй — для измерения тока через магнит) и цифро-аналогового преобразователя позволяет контролировать величину поля, фиксировать его необходимое значение и задавать шаг его приращения в течение определенного времени.

Программное обеспечение спектрометра позволяет, помимо управления электромагнитом, выбирать режим измерения (амплитуда и/или фаза исследуемого импульса, его огибающая и т. д.), проводить эксперимент в автоматическом или ручном режиме, осуществлять запись и чтение результатов с помощью накопителя на гибких дисках (1), организовать визуальный контроль процесса измерения с возможностью интерактивного изменения его параметров и просмотра результатов на графическом дисплее (2) и самописце (3). Использование быстрых алгоритмов позволило проводить измерения в реальном времени. Применение ЭВМ для управления процессом измерений привело к повышению разрешающей способности магнитоакустического спектрометра (по магнитному полю до 0,1 Э) и точности измерения до 1%.

## 2. Результаты измерений и их обсуждение

Экспериментальные исследования проводились на монокристаллах марганец-цинковой шпинели (МЦШ) различной ориентации, поликристаллах МЦШ и ЖИГ и монокристалле ЖИГ. Отметим здесь, что, несмотря на некоторые отличительные особенности, присущие каждому:

классу исследуемых кристаллов, в целом они демонстрировали характерные свойства, которые мы и рассмотрим на примере монокристалла МЦШ ориентации  $[110]$  и размерами  $3 \times 4 \times 20$  мм. На рис. 2 при-

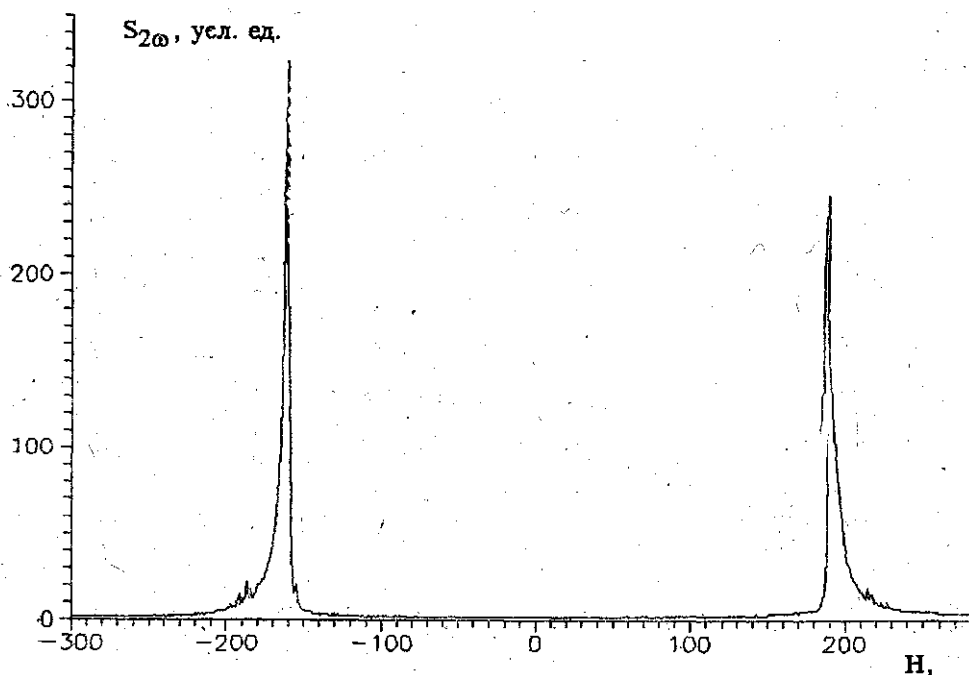


Рис. 2. Зависимость сигнала спинового отклика  $S_{2\omega}$  от магнитного поля.

ведена зависимость амплитуды спинового отклика  $S_{2\omega}$  (снявшегося с катушки) от внешнего магнитного поля  $H$  при встречном взаимодействии двух магнитоупругих волн, встречающихся в центре кристалла. Для сравнения на рис. 3 приведены аналогичные зависимости для амплитуды первого прошедшего импульса основной частоты  $A_{\omega}$  и второй гармоники магнитоупругой волны  $A_{2\omega}$ .

Из рис. 2 и 3 следует, что минимумы первой гармоники (линейный МАР), максимумы второй гармоники (нелинейный МАР) и пики спинового отклика совпадают по полю. Таким образом, встречное взаимодействие (проявляющееся, как уже было указано, в формировании спинового отклика — сигнала свертки) наиболее эффективно именно в резонансной области. Возрастание амплитуды этого сигнала по крайней мере на два порядка хорошо коррелирует с ранее полученными данными о резонансном увеличении квадратичной нелинейности МЦШ в  $400 \pm 100$  раз [2]. Узость резонансной линии (см. рис. 2) свидетельствует о малом градиенте внутреннего поля в центре кристалла и позволяет получить информацию о естественной ширине линии ферромагнитного резонанса (ФМР) на неэллиптических образцах. Из рис. 2 видно, что ширина линии не превышает 3 Э, что хорошо соответствует полученному в [8] значению 2—3 Э. Необходимо отметить, что в [8] использовался метод создания неоднородного внешнего поля для выравнивания внутреннего поля и, как следствие, уменьшения ширины линии нелинейного МАР. Аналогичный результат для естественной ширины линии ФМР может быть получен из оценок времен спиновой релаксации МЦШ, проведенной в [9]. Сравнение рис. 2 и 3 показывает,

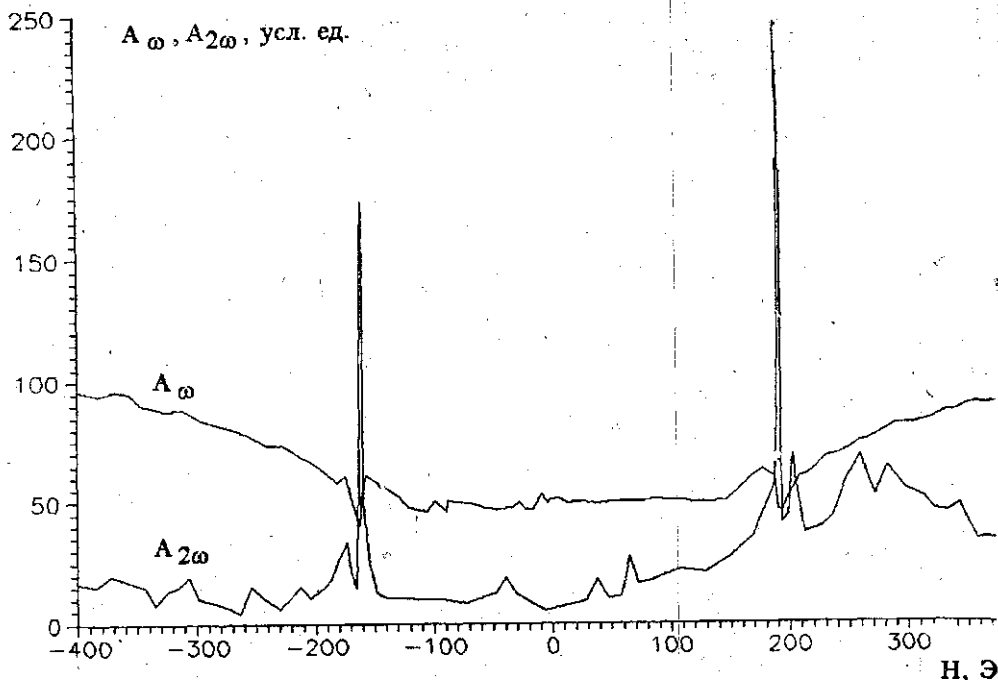


Рис. 3. Линейный ( $A_{\omega}$ ) и нелинейный ( $A_{2\omega}$ ) магнитоакустические спектры марганец-цинковой шпинели

что разрешающая способность МАР-спектроскопии значительно повышается при использовании встречного нелинейного взаимодействия магнитоупругих волн.

Были проведены дополнительные эксперименты по исследованию зависимости амплитуды спинового отклика от угла между направлением внешнего магнитного поля и волновым вектором звука. По мере увеличения этого угла сигнал уменьшался и при  $90^\circ$  исчезал совсем, как при линейном и нелинейном МАР [1, 2]. Данное явление, вероятно, объясняется изменением размагничивающих факторов при повороте образца и уменьшением эффективной длины области МАР.

Разумеется, применение встречного взаимодействия в целях исследования внутреннего магнитного поля является весьма перспективным, поскольку последнее связано с внутренней структурой образца: доменной и дефектной (упругие и магнитные дефекты). Отличие такого метода от уже известной нелинейной МАР-акустодиагностики заключается в том, что при встречном взаимодействии происходит дополнительная локализация области взаимодействия, связанная с локальностью области перекрытия встречных волн (в отличие от линейного и нелинейного МАР, где, несмотря на локальность самой резонансной области и соответственно эффекта МАР, проводится исследование сигнала, прошедшего через весь кристалл и подвергнувшегося в связи с этим значительному изменению). С точки зрения исследования всего внутреннего поля (и соответственно задач, связанных с дефектоскопией магнетиков) важно иметь возможность изменения местоположения области перекрытия.

Данная задача была решена в следующем эксперименте. Для устранения сложностей, связанных с экспериментальной реализацией регулируемой задержки между радиопульсами, поступающими на пре-

образователи, расположенные на противоположных краях образца, применялась двухимпульсная схема измерений. При этом использовался лишь один излучающий преобразователь, на который подавались парные импульсы с регулируемой задержкой между ними. Таким образом, первый импульс, прошедший образец и отразившийся от его конца, встречался в произвольно выбранной точке со вторым. Предварительные эксперименты показали, что таким образом принципиально можно исследовать большую часть образца \*) (за исключением области вблизи его торцов).

Довольно неожиданные результаты получились при исследовании распространения одиночного импульса с частотой 30 МГц и приеме сигнала удвоенной частоты с катушки, намотанной поверх всего кристалла. Обнаружилось, что в области *практически всех полей, соответствующих резонансным*, наблюдается спиновый отклик, отстający от зондирующего импульса на время задержки  $\tau$ , меньшее времени пробега акустического импульса по кристаллу, причем  $\tau$  изменялось в зависимости от внешнего поля. На рис. 4 приведена зависимость времени

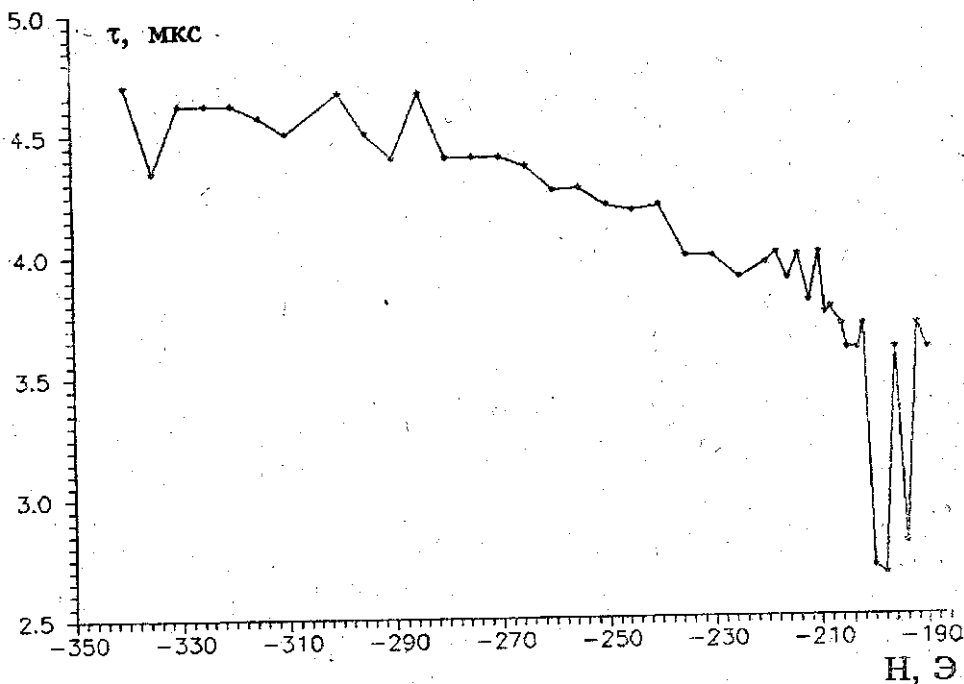


Рис. 4. Зависимость времени задержки сигнала автосвертки  $\tau$  от магнитного поля (задержка на длине кристалла 4,8 мкс)

задержки от внешнего магнитного поля. Из рисунка видно, что в области больших полей импульс смещался к концу кристалла, а в области относительно малых приближался к центру кристалла, т. е. вел себя так же, как и резонансная область. Данное явление можно объяснить следующим образом: проходящий акустический импульс в резонансной области эффективно генерирует синхронную спиновую волну, которая

\*) В данной реализации измерений, разумеется, необходимо учитывать затухание звука, различное при различной величине задержки между импульсами. Более того, для целей дефектоскопии необходимо как можно более уменьшать длительность взаимодействующих импульсов для уменьшения длины области перекрытия.

затем, дойдя до точки поворота (а в наших условиях относительно низких частот точка поворота практически совпадает с концом резонансной области — см. [10]), отражается и бежит навстречу магнитоупругой волне (или, точнее, своему продолжению). В какой-то мере это является аналогом автосвертки импульса в пьезоэлектриках при его отражении от границы кристалла. Отличие состоит в том, что в данном случае эту «границу» можно перемещать по кристаллу внешним полем  $H$ , при этом эффективность свертки на порядок меньше, чем при работе на встречных волнах. Тем не менее вероятно, что с помощью такого метода можно гораздо более детально исследовать тонкую структуру внутреннего магнитного поля (в том числе и применительно к задачам нелинейной дефектоскопии).

В целом, подводя итоги, необходимо отметить, что применение нелинейного резонансного встречного взаимодействия магнитоупругих волн позволяет значительно повысить информативность магнитоакустических спектров.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зарембо Л. К., Карпачев С. Н., Генделев С. Ш. // Письма в ЖТФ. 1983. 9, № 8. С. 502. [2] Зарембо Л. К., Карпачев С. Н. // ЖЭТФ. 1987. 93, № 4(10). С. 1499. [3] Зарембо Л. К., Карпачев С. Н. // ФТТ. 1983. 25, № 8. С. 2343. [4] Губкин М. К., Маматова Т. А., Прокошев В. Г. // Акуст. журн. 1985. 31, № 5. С. 678. [5] Robbins W. P., Lundstrom M. S. // Appl. Phys. Lett. 1975. 26, N 3. P. 73. [6] Зарембо Л. К., Карпачев С. Н., Беляева О. Ю. // ФТТ. 1992. 34, № 5. С. 1327. [7] Карпачев С. Н., Польшенко В. Н., Яфасов А. И. Автоматизированный магнитоакустический спектрометр: Препринт физ. ф-та МГУ № 2/1993 г. [8] Зарембо Л. К., Карпачев С. Н., Генделев С. Ш. // Письма в ЖТФ. 1984. 10, № 17. С. 1050. [9] Беляева О. Ю., Карпачев С. Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992. 33, № 6. С. 83. [10] Штраусс В. // Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона. Т. 4Б. М., 1970. С. 247.

Поступила в редакцию  
07.12.93

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 3

## АСТРОНОМИЯ

УДК 521.14/17:528.21/22

### ОПТИМАЛЬНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С АЛЬТИМЕТРИЕЙ (на примере Атлантического океана)

Н. А. Чуйкова, Т. Г. Максимова  
(ГАИШ)

Практическая проверка разработанной ранее авторами теории оптимизации спутниковых моделей потенциала притяжения планеты для конкретного региона (на примере оптимизации земных спутниковых моделей для альтиметрических данных по региону Атлантики) показала, что эмпирически подобранные оптимизирующие коэффициенты статистически достоверно соответствуют выводам теории; коррекция всех моделей максимальна для номеров гармоник  $n=2-6$ ,  $20-30$  и минимальна для  $n=11$ ,  $12$ ; модель ПЗ-90 в наилучшей степени соответствует исследуемому региону.

В ряде работ [1—4] нами была разработана теория и предложен метод, позволяющий оптимизировать спутниковую модель гравитационного потенциала произвольной планеты для применения ее на физической поверхности. Суть метода состоит в определении коэффициентов  $C_n^{(N)}$ , зависящих от рельефа поверхности, на которые следует ум-