



ФАНО России
Федеральное государственное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша
Российской академии наук»
(ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)

125047, Москва, Миусская пл., 4 Тел. 8 (499) 972-37-14 Факс 8 (499) 972-07-37

<http://keldysh.ru> E-mail office@keldysh.ru

ОКПО 02699381 ОГРН 1037739115787 ИНН/КПП 7710063939/771001001

27.04.2017 № 11103- 9422/334

На № _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
член-корреспондент РАН

А.И. Аптекарев

«26» апреля 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Галыбина Александра Николаевича
**«Некорректные задачи теории упругости для реконструкции полей напряжений в
земной коре»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

Актуальность темы диссертации. Представленная на отзыв диссертационная работа посвящена разработке комплекса теоретических и прикладных инструментов для решения задачи о восстановлении полей напряжений в земной коре. Указанная тематика является актуальной и представляет несомненный интерес как для анализа фундаментальных геологических процессов (движения тектонических плит, подвижки по геологическим нарушениям, приводящим к землетрясениям и др.), так и для решения прикладных задач, в частности, нефтегазодобывающей промышленности и горного дела. При этом результаты диссертации не ограничиваются геофизическими приложениями и могут быть использованы при решении широкого круга прикладных задач анализа напряженно-деформированного

состояния деформируемых твердых сред в случае, когда прямые измерения характеристик напряженно-деформированного состояния принципиально невозможны либо осложнены наличием ошибок измерений, но в то же время некоторые косвенные данные могут быть доступны для интерпретации.

С теоретической точки зрения самостоятельный и большой интерес представляют содержащиеся в диссертации новые результаты (постановки задач и результаты их исследования) в такой классической области, как краевые задачи теории упругости.

Цели и задачи исследования состоят в разработке комплекса теоретических инструментов и численных алгоритмов для определения полей напряжений в земной коре на основе решения новых задач теории упругости, в которых экспериментальные данные используются не в качестве условий для выбора одного из возможных решений обратной задачи, а в качестве входных данных для решения прямых задач.

Научная новизна работы состоит в успешном решении следующих задач:

- Постановке и исследовании свойств нового класса задач теории упругости. Указанный класс задач естественно связан с задачей реконструкции компонент тензора напряжений в среде в условиях неполноты граничных условий (напряжений, усилий или смещений) на границе области. Разработанные постановки предполагают задание «граничных» условий в дискретном множестве точек, которые могут быть расположены как внутри области, так и на ее границе.
- Разработке специальных методов (вычислительных методик) для определения полей напряжений в среде по дискретным данным, расположенным как на границе, так и внутри области. Восстановленные поля напряжений «автоматически» являются физически корректными в том смысле, что они обеспечивают механическое равновесие одной области или совокупности подобластей, образующих область.
- Применении разработанных методов для анализа ряда актуальных геофизических задач, в частности, задачи восстановления полей тектонических напряжений на основе данных The World Stress Map Project для ряда регионов Земли.

Теоретическая и практическая значимость работы обусловлена:

- Разработанными автором диссертации теоретическими подходами для анализа напряженно-деформированного состояния деформируемой твердой среды, в том числе в условиях неполноты и/или неточности информации о граничных условиях.
- Предложенными в рамках разработанных автором теоретических подходов методиками восстановления полей напряжений в среде с использованием дискретных данных, заданных как внутри области, так и на ее границе.
- Решением с помощью разработанных автором методик ряда прикладных задач, включающих анализ современных полей напряжений в некоторых регионах Земли, в том числе в сейсмоактивных регионах, и изучение эволюции полей палеонапряжений. Представлен подход для идентификации цунамигенных регионов Земли.
- Возможностью применения разработанных методик для решения широкого круга

прикладных задач анализа напряженно-деформированного состояния, включая определения напряжений в пластах горных пород, содержащих полезные ископаемые и требующих привлечения единичных измерений величин напряжений.

Основное содержание работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Количество страниц в диссертации – 325, из них 318 страниц основного текста, в том числе иллюстраций – 72, таблиц - 3. Список литературы содержит 138 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость.

Первая глава отражает геомеханическую мотивацию работы, содержит обзор экспериментальных методов и вычислительных подходов к изучению напряженного состояния земной коры. Сформулированы основные гипотезы исследования. Рассмотрены общепринятые подходы к анализу напряжений в земной коре и обсуждены их недостатки. В конце главы приведены основные цели работы и направления исследований.

Во второй главе дано систематическое изложение теории упругости в случае плоской задачи теории упругости с использованием методов функций комплексного переменного. Опираясь на эту технику, получены выражения для уравнений теории упругости для произвольных ортогональных координат, в частности вдоль траекторий главных напряжений (уравнения Ламе-Максвелла) и вдоль линий скольжения. Определены необходимые условия, налагаемые на гладкую функцию двух переменных, при которых она может описывать поля траекторий главных напряжений в рамках рассматриваемой модели.

В главе 3 разработана методика исследования краевых задач теории упругости с однородной правой частью. Приведены выражения для краевых значений голоморфных и биголоморфных функций, а также для комплекснозначных функций смещений, напряжений и усилий через вспомогательные величины – плотности скачков комплексных потенциалов. Предложены два подхода для построения численных решений – на основе сведения к уравнению Фредгольма и на основе суперпозиции решений однородного и неоднородного сингулярного интегрального уравнения.

Глава 4 посвящена анализу неклассических краевых задач плоской теории упругости с «неполными» граничными условиями, в рамках которого проведен анализ их разрешимости. Анализ выполнен по схеме, разработанной в главе 3. Результаты главы 4 составляют теоретический базис для разработки численных алгоритмов реконструкции упругих напряжений по наблюдаемым индикаторам напряжений и смещений. Все указанные краевые задачи относятся к классу некорректных, т.к. обладают неединственными решениями.

В главе 5 приведены аналитические результаты решения задач для простейших областей и для особых случаев граничных условий с использованием ранее предложенных методов.

В главе 6 рассмотрены задачи реконструкции полей плоских напряжений в упругой области по дискретным данным о главных направлениях тензора напряжений. Предложен

подход, основанный на методе Треффца для комплексных потенциалов, для которого предложены две модификации: на основе глобальных и кусочно-полиномиальных базисных функций. Основу метода составляет требование минимизации функционала, который отписывает отклонения наблюдаемых ориентаций главных напряжений от предполагаемых, рассчитанных из общего решения теории упругости. Показано, что применение метода не требует интегрирования уравнений равновесия. Представлены результаты применения обоих методов и их сравнение. Приведенные примеры показывают, что поля упругих напряжений могут быть восстановлены по дискретным данным о главных направлениях с удовлетворительной точностью.

В главе 7 суммированы результаты реконструкций упругих напряжений (палеонапряжений), которые используют в качестве входных данных экспериментально установленные направления траекторий главных напряжений, заданные в дискретном множестве точек. Этот факт существенно отличает использованный подход от традиционного моделирования упругих полей, основанного на использовании специально подобранных (или «фиктивных») граничных условий в терминах напряжений, усилий или смещений.

В главе 8 приведена постановка задач для реконструкции напряжений в многосвязных областях, развиваются численные методы, основанные на полиномиальных и конечно-элементных аппроксимациях. Приведены примеры реконструкций полей напряжений для регионов, разграниченных одной границей, а также для областей, состоящих из нескольких тектонических плит. В основном исследованы поля напряжений цунамигенных регионов Земли с использованием данных об ориентациях главных напряжений в мировой базе данных WSM.

Рассматриваемые задачи являются обобщением задач, рассмотренных в главах 6 и 7 диссертации. При этом использованы такие же подходы и численные методы с добавлением в общую систему уравнений новой группы уравнений, выражающих непрерывность вектора напряжений на границах между соседними областями. При численной реализации они выполняются в точках коллокаций.

Приведены результаты применения разработанной методики для реконструкции полей напряжений вблизи Суматры, где расположены эпицентры последних сильных землетрясений, и Антарктической плиты.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций соискателя обеспечена строгостью и обоснованностью используемой автором диссертации совокупности математических методов и подходов, их тщательной валидацией и верификацией, в том числе с использованием точных аналитических решений; воспроизводством предложенными автором методиками результатов фотоупругих экспериментов.

Представленные в диссертации результаты опубликованы в 42 работах, из которых 18 входят в перечень рецензируемых научных журналов ВАК. Значительная часть работ

опубликована в отечественных и международных журналах с высоким индексом цитирования.

Основные результаты работы доложены и обсуждены на 30 российских и международных профильных научных, на семинарах научно - исследовательских институтов РАН, семинарах в зарубежных университетах.

Замечания по диссертационной работе. Рассматриваемая диссертация и форма представления результатов не свободна от недостатков. А именно:

1. Из названия диссертации можно сделать вывод о том, что разработанные автором методы и подходы имеют узкоспециализированную геофизическую направленность. Однако это справедливо только рассмотренных автором примеров применения разработанных методик. Теоретическая часть работы имеет фундаментальный математический характер, а предложенные автором вычислительные алгоритмы и методики имеют большое значения для анализа широкого класса задач, в том числе в инженерных науках. Одновременно с этим целый ряд представленных в диссертации результатов автора верен для сред с более общей, чем упругая, реологией.
2. Автореферат диссертации отражает ее содержание, однако изложение содержания работы выполнено излишне подробно, что препятствует целостности восприятия полученных результатов.
3. Диссертация посвящена анализу задач в пространственно-двумерных постановках. При этом в заключении диссертации на стр. 305 отмечено, что разработанные автором методики могут быть развиты и для пространственно-трехмерного случая. Было бы уместным более детально показать возможные способы такого обобщения на этот случай, что сделало бы представление материала более выигранным.

Заключение по диссертации. Диссертационная работа А.Н. Галыбина представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой решен ряд актуальных задач анализа напряженно-деформированного состояния среды на основе дискретных данных — наблюдаемых индикаторах напряженно-деформированного состояния. Результатом работы является комплекс теоретических инструментов и вычислительных алгоритмов для определения полей напряжений в земной коре на основе решения задач теории упругости в рамках новых предложенных автором математических постановок, в которых экспериментальные данные используются не в качестве условий для выбора одного из возможных решений обратной задачи, а в качестве входных данных для решения прямых задач. Разработанные методы и подходы имеют строгое теоретическое обоснование и позволяют использовать их для решения конкретных теоретических и прикладных задач геофизики. Диссертационная работа является итогом законченного многолетнего цикла научных исследований и несет в себе целый ряд элементов научной новизны и практической значимости. Результаты выполненных исследований позволяют охарактеризовать рассматриваемую диссертацию как решение крупной научной проблемы.

Работа полностью соответствует уровню, предъявляемому ВАК к докторским диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических (пункты 5, 6, 11, 12) паспорта специальности 25.00.10).

Все сформулированные диссертантом защищаемые положения полностью раскрыты в тексте работы. Следует отметить высокое качество изложения материала. Автореферат и 42 опубликованные по материалам диссертации работы (из них 18 статей в журналах из перечня ВАК) отражают основное содержание диссертационной работы. Результаты работы доложены и обсуждены на 30 российских и международных профильных конференциях.

Уникальной особенностью работы является то, что одновременно с важными прикладными результатами она содержит новые содержательные теоретические результаты в такой хорошо разработанной области на стыке математики и механики, как применение методов теории функций комплексного переменного для анализа плоских задач теории упругости. Результаты работы могут рассматриваться как теоретический задел для развития принципиально нового класса теоретически обоснованных методов анализа напряженно-деформированного состояния в геофизических и других задач.

Диссертационная работа «Некорректные задачи теории упругости для реконструкции полей напряжений в земной коре» соответствует всем критериям, указанным в Постановлении Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Галыбин А.Н. заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Отзыв ведущей организации на диссертацию обсужден на семинаре 11-го отдела ИПМ им. М.В. Келдыша РАН 24 апреля 2017 года, протокол заседания № 182.

Зав. отделом №11 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
д.ф.-м.н., профессор



М.П. Галанин

Галанин Михаил Павлович – заведующий отделом № 11 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
доктор физико-математических наук.
Тел: +7 (499) 220-78-54, эл. почта: galan@keldysh.ru

125047 Москва, Миусская пл., д 4, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН