

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук  
Сетухи Алексея Викторовича на  
на диссертационную работу 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 исследований. Объект и предмет исследований.**

В диссертации рассматривается актуальная проблема анализа напряженного состояния земной коры на основе имеющихся результатов измерений. Для изучения процессов, происходящих в земной коре, поиска полезных ископаемых, предсказания землетрясений и во многих других разделах науки о земле необходимо иметь подробную информацию о распределении тензора напряжений по поверхности земли. Вместе с тем имеющиеся данные измерений дают такую информацию только для отдельных точек. В связи с этим возникает общее научное направление аппроксимации параметров напряженно-деформированного состояния земной коры на основании имеющихся результатов измерений математическими методами.

Трудность задачи аппроксимации напряжений в земной коре вызвана такими факторами, как большой разброс точек, для которых есть результаты измерений и их неравномерное и нерегулярное размещение на поверхности земли, отсутствие достоверной информации о распределении напряжений в горизонтальном направлении, неполнота информации о напряжениях даже в точках измерения (большинство имеющихся данных содержит информацию только о направлении главной оси тензора напряжений), большая погрешность результатов измерений.

Малый объем имеющейся информации требует построения математических моделей аппроксимации данных, которые используют не только результаты измерений, но и накладывают их на физические модели сплошной среды, требуя от возникающих в результате интерполирования полей напряжений соответствия уравнениям механики деформируемого тела.

В настоящее время для решения задачи реконструкции полей напряжений в земной коре широко используются подходы, основанные на постановке и решении обратных задач теории упругости, где ищется решение краевой задачи со свободными параметрами, которые подбираются из критерия наилучшего соответствия результатам наблюдений. Однако существенная проблема здесь состоит в постановке граничных условий, поскольку такие условия есть только на направления векторных полей, но не на их модули.

В связи с этим автором диссертации была поставлена цель разработать теоретические методы и реализующие их численные алгоритмы для определения полей напряжений на основе решения задач теории упругости, в которых экспериментальные данные используются в качестве входных данных для решения прямых задач.

В диссертации, на основе анализа физических аспектов проблемы, сформулирован ряд задач плоской теории упругости с неклассическими граничными условиями, которые могут быть использованы для решения задачи реконструкции полей напряжений в области на плоскости по имеющейся специфической информации о напряжениях на границе области. Рассмотрено несколько типов таких задач, с постановкой граничных условий на направления векторных полей. Поставленные задачи исследованы методом граничных интегральных уравнений. При этом возникли сингулярные интегральные уравнения, разрешимость

которых была исследована с привлечением теории функций комплексного переменного. Также разработан метод численного решения этих уравнений, включающий выделение решения на основе наилучшего соответствия имеющимся данным о решении внутри области.

Также в диссертации разработан и реализован метод реконструкции полей напряжений по заданным направлениям главных напряжений внутри области на основе оптимизации невязки между расчетными и известными ориентациями главных напряжений и на методе Трефтца для комплексных потенциалов теории упругости.

Разработанные математические модели апробированы на примерах решения большого числа реальных задач о реконструкции полей напряжений в конкретных регионах земли.

#### **Научная новизна работы.**

Во-первых хочу отметить, что рассмотрены новые, нетипичные постановки плоских краевых задач теории упругости с граничными условиями на направления векторных полей, связанных с неизвестными функциями. На основе известного подхода со сведением таких задач к системам граничных интегральных уравнений с сингулярными интегралами, разрешимость которых исследуется сведением к краевой задаче Римана для функций комплексных переменных, получены новые математические результаты о разрешимости исходных задач и связанных с ними конкретных интегральных уравнений.

Во-вторых, автором разработан и протестирован новый численный метод реконструкции напряжений на основе метода Трефтца. Несомненную научную новизну имеют и полученные новые реконструкции реальных полей напряжений земной коры.

### **Научная и практическая значимость результатов диссертации.**

Результаты о разрешимости рассмотренных новых классов краевых задач теории упругости и связанных с ними систем сингулярных интегральных уравнений представляют значительный интерес с точки зрения уравнений математической физики и теории интегральных уравнений. Полученные методы аппроксимации векторных полей на основе решения не классических краевых задач и на основе оптимизации невязки между расчетными и известными ориентациями главных напряжений могут быть применены как для теоретического, так и для численного решения различных задач ассимиляции данных наблюдений. При этом последний метод показал свою применимость и практическую значимость при решении ряда задач реконструкции полей напряжений земной коры для ряда регионов, а сами эти реконструкции полей напряжений являются важными для геофизики.

**Достоверность выносимых на защиту положений** подтверждается применением строго математического аппарата и решением целого ряда тестовых задач. Все результаты о разрешимости рассмотренных краевых задач с нестандартными граничными условиями сформулированы в виде математических утверждений и доказаны. Численный метод реконструкции напряжений на основе метода Трефтца протестирован путем сравнения получаемых решений с точными для ряда простых областей, сравнением решений модельных задач теории упругости с результатами экспериментов, а также сравнением решений, получаемых для напряжений в земной коре по некоторой выборке из известных результатов наблюдений, с оставшейся частью этих результатов.

#### **В качестве замечаний отмечаю следующее:**

- представляло бы интерес сравнить решения, получаемые при решении краевых задач с нестандартными граничными условиями,

рассмотренными в главах 3-5, с решениями, получаемыми методом реконструкции напряжений по заданным направлениям главных напряжений внутри области, рассмотренным в главе 6. Это могло бы послужить дополнительным подтверждением достоверности обоих методов.

- обращает на себя внимание, что при решении практических задач использован, главным образом второй метод, развитый в главе 6. Метод, основанный на решении краевых задач с нестандартными граничными условиями, по-видимому не всегда применим, из-за требования иметь информацию о полях напряжений именно на границе рассматриваемой области.

Однако, сделанные замечания я не считаю принципиально влияющими на оценку работы. В целом работа написана на высоком научном уровне, аккуратно оформлена. Результаты диссертации опубликованы в большом числе печатных работ, из которых 18 входят в перечень рецензируемых научных изданий ВАК. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

#### **Вывод.**

Таким образом, диссертация Галыбина Александра Николаевича выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и содержит новое решение научной проблемы реконструкции полей напряжений в земной коре по имеющимся результатам наблюдений, имеющей существенное значение для геофизики, а результаты автора по анализу разрешимости краевых задач с нестандартными граничными условиями представляют отдельный интерес для математической физики.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от **24 сентября 2013 г. № 842**) для учёной степени

доктора наук, а её автор А.Н. Галыбин достоин присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

*Я, Сетуха Алексей Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.*

Официальный оппонент  
Ведущий научный сотрудник  
Научно-исследовательского вычислительного центра Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова,  
доктор физико-математических наук, профессор

25.04.2017

Алексей Викторович Сетуха

Адрес организации: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 4, НИВЦ МГУ  
Телефон: (495) 939-15-71  
e-mail: setuhaav@rambler.ru

Личную подпись доктора физико-математических наук Сетухи Алексея Викторовича удостоверяю.  
Директор научно-исследовательского вычислительного центра Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

профессор



А.В.Тихонравов.