

Отзыв
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

Диссертационная работа А.Н. Галыбина посвящена построению теории двух новых классов некорректных задач теории упругости, предназначенных для решения проблемы определения напряжений и палеонапряжений в земной коре по пространственно дискретным данным натуральных индикаторов и инструментальных замеров. В отличие от классических постановок задач, в которых в качестве граничных условий задаются напряжения и/или смещения, новые классы задач в качестве входных данных используют, в основном, лишь информацию о направлениях главных напряжений и/или смещений, но не о их величинах. Имеет смысл назвать эти данные «геофизическими», т.к. именно они могут быть получены геолого-геофизическими методами из анализа натуральных индикаторов напряжений и палео-кинематических реконструкций. Первый класс задач представляет собой краевые задачи, в которых данные о направлениях напряжений, усилий на контуре и смещений приняты в качестве граничных условий. Исследование разрешимости и степени неединственности решения этих задач автор проводит, используя технику сингулярных интегральных уравнений. Во втором классе задач экспериментальные данные о направлениях главных напряжений известны в дискретных точках внутри исследуемой области. Здесь А.Н. Галыбин использует 2 подхода – глобальную интерполяцию данных с учетом уравнений теории упругости и предложенную им разновидность метода конечных элементов (МКЭ), сформулированного в терминах ориентаций главных напряжений. В обоих классах задач рассматриваются и анализируются постановки как для отдельного блока (литосферной плиты), так и для ансамбля взаимодействующих разномодульных плит, исследуется влияние зашумленности входных данных. Предложенные теоретические методы опробованы на решении задач с синтетическими данными и данными из фотоупругости, убедительно показана работоспособность методов. В качестве геофизических приложений реконструированы поля напряжений и палеонапряжений для земной коры ряда конкретных регионов, для отдельных регионов исследована эволюция этих полей (в частности после

сильных землетрясений). В терминах напряженного состояния предложен и проанализирован для нескольких регионов критерий выделения потенциально цунамигенных участков земной коры.

Работа А.Н. Галыбина построена следующим образом. В Главе 1 приводится обзор методов определения локальных определений элементов НС, а также критический разбор некоторых предложенных ранее подходов к реконструкции равновесного упругого поля напряжений. Показана некорректность подходов, которые основаны на решении классических задач упругости с граничными условиями, подбираемыми так, чтобы расчетные ориентации главных напряжений внутри области соответствовали экспериментальным. Глава 2 посвящена развитию некоторых разделов теории упругости, которые существенно используются далее в подходе А.Н. Галыбина. В частности, выводятся условия на поле траекторий главных напряжений (ТГН), гарантирующие совместимость этого поля с упругим состоянием среды. Главы 3-5 составляют основное содержание отмеченного выше первого класса задач, в котором экспериментально определяемые данные об ориентациях напряжений, перемещений и усилий принимаются в качестве граничных условий. Основным методическим приемом здесь является сведение задач к исследованию разрешимости систем интегральных уравнений. В математическом плане автор следует подходам, представленным в фундаментальном труде Ф.Д. Гахова «Краевые задачи», но при этом существенно их модернизирует. А.Н. Галыбин рассматривает разные комбинации «геофизических» данных на границе и показывает, что в каждом из анализируемых случаев разрешимость задачи и число независимых решений разрешимой задачи (а, следовательно, число произвольных констант в решении) зависит от так называемого индекса задачи. Последний определяется числом и знаком оборотов направлений, выбранных в качестве граничных условий в том или ином случае, при обходе контура исследуемой области против часовой стрелки. Полученные результаты автор для областей простой геометрии проверяет независимыми способами. Глава 6 целиком посвящена исследованию второго класса задач, в которых экспериментальные данные об ориентации главных напряжений распределены в дискретных точках внутри области, заменяя тем самым граничные условия. Минимизация невязки этих данных с расчетными достигается либо заданием упругих потенциалов в виде полиномов с неизвестными коэффициентами, либо разбиением области на конечные элементы, которые связываются между собой вполне определенными условиями в точках коллокации. Оба способа приводят к переопределенной

системе алгебраических уравнений, которая решается с использованием различных методов регуляризации. В главе 6 подход тестируется на известных результатах фотоупругости, а в Главах 7, 8 приводятся результаты приложения теории к реконструкции напряжений в земной коре конкретных регионов. В Главе 7 реконструкция поля современных напряжений проведена для Западно-Европейской платформы и континентальной Австралии (где впервые А.Н. Галыбиным с соавторами обнаружено существование особой точки поля траекторий главных напряжений). Кроме того, в Главе 7 реконструирована эволюция новейших палеонапряжений в 4-х регионах, примыкающих к зоне конвергенции Аравийской и Евразийской плит. В Главе 8 поля напряжений реконструируются для нескольких смежных динамически взаимодействующих между собой плит с условиями непрерывности вектора напряжений на границах между соседними плитами: для Антарктической плиты и окружающих ее плит; для региона, прилегающего к разлому Сунда и содержащего эпицентр разрушительного Суматранского землетрясения 26.12.2004. Для Суматры, Соломоновых островов и островов Тонга-Самоа проанализированы изменения полей упругих напряжений, вызванные суматранским землетрясением 2004. На основе анализа полей напряжений для различных регионов А.Н. Галыбин выдвигает гипотезу, гласящую, что сильные цунамигенные землетрясения зарождаются в местах, где величина максимального касательного напряжения в плоском поле горизонтальных напряжений существенно понижена.

Прежде, чем оценивать диссертационную работу А.Н. Галыбина в целом, следует отметить следующее. Классические постановки краевых задач механики сплошной среды возникли, благодаря нуждам технических приложений, в которых выставление граничных условий в терминах напряжений и/или смещений естественно и, как правило, не вызывает трудностей. В случае геосреды ситуация меняется коренным образом. Здесь величины, например, движущих сил определяются умозрительно и в разных моделях могут меняться на 1-2 порядка, что не дает возможности считать правдоподобными результаты, полученные на основе постановки прямых задач. Но в случае геосреды, в отличие от технических приложений, существуют натурные индикаторы напряжений внутри и на границе исследуемых областей, анализируя которые можно определить пространственно дискретное 2D распределение главных осей напряжений. Подход, основанный на решении обратных задач, в которых производится подбор классических граничных условий с целью минимизации невязки

расчетных и экспериментальных ориентаций главных осей не решает проблемы из-за существенной неединственности. Даже если решение задачи удовлетворяет всем наложенным ограничениям внутри региона, расчетные поля величин напряжений остаются чувствительными к неоднозначным граничным условиям. Вследствие этого возникают значительные отличия в результатах для одного и того же региона. Это убедительно показано в диссертации как с помощью модельных примеров, так и на основе анализа результатов отдельных авторов. Заметим, что в диссертации не обсуждаются распространенные подходы, претендующие на реконструкцию поля напряжений лишь по недоразумению, т.к. в них не выполняются полевые соотношения, которыми в данном случае являются уравнения равновесия.

Диссертацию А.Н. Галыбина следует оценивать как первое систематическое исследование прямого подхода к реконструкции полей напряжений, в котором исходные экспериментальные «геофизические» данные используются не как ограничения на искомое решение, а непосредственно в качестве входной информации. Первый класс (краевых) задач, исследованных в рецензируемой работе, может иметь приложения при реконструкции напряжений в плитах или в ансамблях взаимодействующих плит, ограниченных разломами, в окрестности которых имеется в наличии достаточное число индикаторов напряжений и смещений. Преимущество прямого подхода здесь проявляется в том, что исследователь, имея на руках результаты А.Н. Галыбина, может по поведению ориентаций напряжений и/или смещений на границах непосредственно и априорно к решению задачи сразу сделать вывод о количестве произвольных констант, входящих в решение. Число этих констант конечно, следовательно, можно оценить число дополнительных инструментальных замеров величин напряжений с тем, чтобы выделить единственное и близкое к реальному поле напряжений. Иллюстрацией к сказанному является поле напряжений в континентальной Австралии, где даже по весьма ограниченному количеству данных, нанесенных на карту мировых напряжений WSM, можно визуальным образом сделать вывод о вращении оси максимального сжатия $S_{H,max}$ на угол $-\pi$ по часовой стрелке при обходе контура Австралии против часовой стрелки, что соответствует 4-м произвольным константам в решении для поля девиатора напряжений и наличию особой точки в поле траекторий главных напряжений внутри континента.

Второй класс задач, рассмотренных в диссертации, приложим тогда, когда ориентации напряжений известны внутри плиты. Если по этим данным удастся реконструировать поле траекторий главных напряжений,

совместимое с упругой моделью, то поле полного тензора напряжений зависит от 5-и или 2-х произвольных констант в зависимости от того, является ли угол наклона траекторий гармонической функцией или нет. В общем случае задача минимизации невязок между расчетными и экспериментальными ориентациями сжатия сводится к переопределенной системе алгебраических уравнений, методы решения которой подробно описаны в диссертации.

Диссертация А.Н. Галыбина представляет собой прорывное исследование, позволяющее на строгом уровне реконструировать поля напряжений, что и продемонстрировано в последних Главах работы. Математический уровень работы чрезвычайно высок. Достаточно сказать, что техникой сингулярных интегральных уравнений свободно владеет весьма ограниченное число специалистов, и автор принадлежит к их числу. Несмотря на математические сложности теории, конечные результаты вполне наглядны. Они могут быть освоены геологами и геофизиками, не имеющими специального математического образования.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что диссертация «Некорректные задачи теории упругости для реконструкции полей напряжений в земной коре» отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, А.Н. Галыбин, заслуживает присвоения ему искомой степени по специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Научный консультант,

доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

Адрес: 123995, Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1. Тел.: (499) 2541082.
Факс: (499) 7662654. E-mail: shamil@ifz.ru



Шамиль Ахмедович Мухамедиев

