

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Жуковца Виктора Николаевича «Разработка модели субдукции Тихоокеанской плиты под Алеутскую дугу», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Рассматриваемая диссертационная работа посвящена актуальной теме изучения и моделирования зон субдукции. Автор анализирует геофизические, в первую очередь, сейсмологические данные и предлагает использовать (но не реализует) новый метод теоретического описания процесса погружения литосферной плиты в зоне субдукции.

Актуальность тематики работы сомнений не вызывает. Несмотря на интенсивные исследования и важность проблемы ряд особенностей процесса субдукции остаются не ясными, не вполне ясен и механизм этого явления. Представленная работа претендует на решение некоторых из этих вопросов, а именно, предлагается объяснение ряда особенностей сейсмичности зон субдукции Алеутских и Командорских островов и островов Тонга и предлагается новый метод математического моделирования процесса субдукции.

Содержание диссертации:

Диссертации В.Н.Жуковца состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (122 наименования), диссертация содержит 111 страниц текста, 35 рисунков и 1 таблицу.

Введение включает в себя обоснование актуальности и практической значимости темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, охарактеризованы научная новизна, практическая значимость, указана апробация полученных результатов. Заметим, что некоторые дискуссионные моменты видны уже здесь. Автор во введении пишет, что к западу и востоку от центра Алеутской дуги «заглубление очагов землетрясений весьма незначительно, можно сказать, что субдукция и вовсе отсутствует». При такой формулировке возникает вопрос, полагает ли автор, что существование субдукции и глубина зоны субдукции полностью определяется максимальной глубиной землетрясений? Неясности высказываний встречаются в диссертации и далее, и не только по этому вопросу.

При обсуждении механической задачи описания процесса субдукции автор обоснованно заключает, что аналитическое решение задачи не представляется возможным, и предлагает еще один вариант численного ее решения на основе реализации алгоритма SIMPLE (Semi-implicit method for pressure linked equations). Указывается, что этот метод достаточно прост в реализации и обеспечивает необходимую точность решения; однако реальных примеров использования метода автор не приводит. Заметим, что первая ссылка на метод не сопровождается указанием источника, такие неаккуратности в оформлении работы встречаются и далее.

На защиту автором выносятся 3 положения (приведены ниже). Обоснованность и оригинальность этих положений также характеризуется в завершении отзыва.

В первой главе – «Физическое и математическое моделирование процесса субдукции» - охарактеризована степень изученности процесса субдукции, дан краткий экскурс в историю

развития представлений о процессе субдукции. Автором «рассмотрены различные типы субдукции и её зависимость от ряда физических параметров, таких как ширина и толщина поддвигающейся плиты, покоится или движется висячий блок, соотношение между вязкостью поддвигающейся плиты и подстилающего слоя». Заметим, что уже в постановке проблемы видна определенная дискуссионность понимания научной задачи автором. Что значит «ширина поддвигаемой плиты»? Не ясно также, полагает ли автор, что физика процесса субдукции зависит от относительной скорости контактирующих плит, или также от скорости надвигающейся плиты, если это последнее, то относительно какой системы отсчета должна измеряться эта скорость?

В качестве одной из задач исследования автор указывает, что «Интересен не только факт, что максимальная глубина погружения Тихоокеанской плиты под Алеутскую дугу не превышает 300 км, но и то, что глубина погружения максимальна в центре дуги и постепенно убывает к востоку - Аляске и западу - Камчатке, где исчезает совсем», стр. 10. Отсюда как бы следует, что автор характеризует процесс субдукции ТОЛЬКО развитием землетрясений, а не нахождением высокоскоростного литосферного блока (плиты) в области верхней мантии под континентальной или островодужной плитой. Такое понимание ситуации представляется неверным.

История вопроса и основные положения тектоники плит приводятся диссертантом в разделе 1.1. Изложение достаточно полное, но при этом автор ошибочно расшифровывает известную модель PREM как Preliminary Earthquake Model (стр. 11), а не Preliminary Reference Earth Model. Также не вполне корректно автор пишет, что нижняя часть литосферы «представляет собой подплавленное вещество – пластичная астеносфера», стр. 11. Также не вполне корректно автор пишет, что «на некоторой глубине опускающаяся плита подплавляется, формируя вулканические цепи - островные дуги - на поверхности висячего блока». В настоящее время принято полагать, что подплавление испытывает вещество не погружающейся высокоскоростной холодной плиты, а островодужного блока, где подплавление происходит под воздействием поднимающегося из зоны субдукции флюида – продукта дегидратации погружающейся плиты.

В разделе 1.2 кратко обсуждаются математические методы описания процесса субдукции на основе использования уравнения Навье-Стокса. Автор формулирует задачу, что модель должна быть «способна соблюдать сохранение напряжений для больших диапазонов величин вязкостей, а также соблюдать сохранение теплового потока для различных коэффициентов теплопроводности и температурных градиентов в больших диапазонах, с учётом сдвигового подогрева», (стр. 15). Под «сохранение напряжений» автор, видимо, имеет в виду возможность описания поля напряжений при больших изменениях вязкости; аналогично, для теплового поля. Более подробно вопросы такого моделирования обсуждаются в четвертой главе диссертации.

В разделе 1.3 обсуждается применение моделей для понимания поведения (формы) погружающейся плиты и физики процесса субдукции, вполне обосновано подчеркивается роль вязкости и вариаций плотности как плиты, так и мантии, выбирается теоретическое выражение для расчета вязкости. Вопросы изменения плотности при этом учитываются недостаточно, роль фазовых переходов только упоминается. На рисунках обозначения часто видно плохо, слишком мелкие. На рис.4 сопоставляются данные GPS и по сейсмичности за разные интервалы времени, поэтому и исходно не очевидно, что они должны быть связаны между собой. К принципиальным результатам можно отнести вывод автора, что в районе

Командорских островов «в последние 9 млн. лет субдукция в области этих островов могла отсутствовать, либо быть касательной к дуге». Здесь не ясно, полагает ли автор, что погружающаяся плита в этом районе отсутствует? При этом автор подчеркивает (стр. 30) наличие высокоскоростной аномалии в области Алеутской дуги глубже области развития самых глубоких землетрясений. Также автор аргументирует, что нет оснований полагать, что за последние 10 млн лет скорость и направление движения Тихоокеанской плиты существенно изменились. Тогда, если субдукции – нахождения пододвигаемой плиты на уровне верхней мантии – в районе Командорских островов нет, то не ясно, куда исчезает часть плиты с глубинами очагов до 300 км и более (по данным сейсмотомографии), наблюдаемая в районе Алеутской дуги; исходя из характера тектонических движений, она должна была бы сместиться за миллионы лет из области Алеутской дуги (где глубокие землетрясения и плита есть), к западу в район Командорских островов (где глубоких землетрясений действительно нет).

Складывается впечатление, что по многим обсуждаемым вопросам у диссертанта нет сложившегося логически непротиворечивого мнения, хотя бы в плане гипотезы.

Вторая глава – «Исследование процесса субдукции под Алеутскую дугу» посвящена детальному анализу этой зоны субдукции. Рисунок 7, по видимому, основной обзорный, тогда на нем должны быть указаны и быть читаемыми все географические названия упоминаемые в тексте.

В разделе 2.1 исследуется изменение максимальной заглубленности очагов вдоль Алеутской дуги (включая Командорские острова). Автор детализирует сделанное уже ранее утверждение, что «глубина погружения максимальна в центре дуги и постепенно убывает к востоку - Аляске и западу - Камчатке, где исчезает совсем»; в частности, говорится «... далее, к западу до 146° з. д. плавно спадает до 70 км - субдукции нет».

Но это утверждение не точно. Автор сам, на рис. 14, показывает очаги землетрясений в районе Аляски (уже даже не Алеутской дуги) с глубиной 250 км. Сейсмичность глубже 70 км действительно начинает исчезать в районе 150 з.д., но это уже не зона субдукции Алеутского желоба, даже не Аляска, а начало глобальной сдвиговой зоны вдоль западного побережья Северной Америки. Здесь движение Тихоокеанской плиты субпараллельно границе плит, во многом аналогично ситуации в районе Командорских островов. Приведенные на рис. 15б данные с уменьшением глубин землетрясений в основном характеризуют не западную часть Алеутской дуги, а область Аляски и даже зону еще более к востоку. Применительно к Алеутской дуге диссертант противоречит сам себе. Он пишет (рис. 18), что максимальная глубина землетрясений линейно растет с ростом нормальной к желобу компонента скорости субдукции, а на западе Алеутской дуги нормальная компонента скорости субдукции остается достаточно высокой. В интервале примерно 155-165° з.д. действительно имеется некий минимум более глубокой сейсмической активности, но активность (по данным объединенного каталога GEM-GCMT) не прерывается, и этот минимум может иметь случайный характер.

Обсуждая геометрию зоны Заварицкого-Беньофа автор связывает кривизну дуги и характер напряженного состояния, и величину угла погружения. Эти сопоставления представляются интересными и вполне правдоподобными, но их стоило бы проверить по данным о других зонах субдукции; интерпретация на основе только Алеутской дуги и, отчасти, островов Тонга может оказаться преждевременной и даже ошибочной.

В разделе 2.2 рассматривается геодинамика региона. Приводятся данные по механизмам очагов. Показано преобладание сдвиговой компоненты на западе дуги (где скорость движения Тихоокеанской плиты субпараллельна желобу) и преобладание надвигов в восточной ее части (где имеет место значительная нормальная компонента скорости субдукции).

В разделе 2.3 данные по сейсмическому режиму увязываются с данными по движению Тихоокеанской плиты. Автор формулирует (рис. 18) что максимальная глубина сейсмичности линейно зависит от нормальной к желобу компоненты скорости субдукции. Вывод правилен, но уже в 1982 году (Калинин, Родкин) по данным о совокупности разных зон субдукции было показано, что максимальная глубина сейсмичности зон субдукции растет с величиной скорости субдукции; но связь не линейная (что и следует ожидать из теоретических соображений). Диссертант не ссылается на указанные работы. Вывод диссертанта почти правилен (правда, не вполне точен, связь не линейная), но не оригинален.

Рис. 19 не ясен, нет легенды к рисунку, а обозначения слишком мелкие и плохо видны читателю.

Третья глава – «Рассмотрение субдукции недалеко от острова Тонга» посвящена анализу характера сейсмичности области островов Тонга и ее сравнению с сейсмичностью Алеутской островной дуги.

В разделе 3.1. «Тектоническая позиция и геодинамическая обстановка» дается описание довольно сложной геодинамической ситуации района островов Тонга. При этом некоторые утверждения диссертанта представляются не вполне точными. Так, например, диссертант пишет «Тихоокеанская плита опускается под Индо-Австралийскую в результате непрекращающегося давления в литосфере от сближения этих двух огромных областей. Скорость, с которой происходит этот процесс, относительно высока, в среднем около 7 см в год. Нет полной ясности, является ли этот процесс непрерывным, или он протекает в виде серий внезапных скачков, возможно связанных с крупными землетрясениями.» Мы привели эту длинную цитату чтобы показать два момента не полного владения автором информацией. Уже довольно давно показано, что развитие процесса субдукции в большей степени связано не с давлением плит друг на друга (такая точка зрения устарела), а с погружением более плотной и тяжелой плиты. Во-вторых, по данным GPS измерений (например, в Японии) убедительно показано, что на границах имеет место как относительно непрерывное движение, так и резкие его возмущения в связи с сильнейшими землетрясениями (например, землетрясением Тохоку).

В некоторых местах автор не всегда последователен. Так, на стр. 60 он пишет «очаги наиболее крупных сейсмических событий иногда занимают всю толщу слэба», а на стр.62 «Такая интерпретация подвижки в очаге коррелирует с геодинамическими представлениями о приуроченности гипоцентров глубоких сильных толчков к верхней поверхности погружающейся Тихоокеанской плиты.» Второе из этих утверждений не вполне верно. В частности, уже довольно давно работами Л.М.Балакиной и других показано, что тенденция приуроченности очагов землетрясений к границе раздела плит имеет место только для самой верхней части зон субдукции.

В разделе 3.2. «Геометрическая модель очага землетрясения 19.08.2018 г.» диссертант более подробно рассматривает данные по главному событию и афтершокам этого сильного землетрясения. Полученный результат дает основу для одного из защищаемых положений. Аргументируется, что очаг этого землетрясения имеет изотропный характер и занимает всю

мощность погружающейся плиты. Подчеркивается, что изотропный характер очага «в корне отличает форму очага глубокого землетрясения 19.08.2018 г. вблизи о-вов Тонга от формы очагов близких по магнитуде литосферных землетрясений.» Отметим, что при верных и обоснованных утверждениях имеют место и неточности стиля, а может и противоречия. Так, на стр. 65 диссертант пишет «очаг этого глубокого землетрясения оказывается приблизительно в 2 раза **меньше** очага корового землетрясения такой же магнитуды.», а на стр. 71 диссертант пишет «очаговая область произошедшего 19.08.2018 г., $MW = 8.2$, $h = 600$ км события заняла всю ширину слэба, что в несколько раз **больше** области, которую занимал бы очаг землетрясения на маленькой глубине.»

В выводах по третьей главе автор пишет «плита, погружающаяся под острова Фиджи, Тонга и Кермадек длительное время располагается вдоль границы верхняя-средняя мантия, прежде чем погружается в среднюю мантию.». Складывается ощущение, что диссертант немного путается в общепринятой терминологии. Обычно говорят, что плита может выполаживаться перед погружением в нижнюю мантию.

В четвертой главе – «Подход к математическому моделированию процесса субдукции» достаточно детально обсуждается предлагаемый (но не реализуемый) автором новый метод расчета механической задачи погружения литосферной плиты в зоне субдукции, метод SIMPLE (Semi-Implicit method for preassure-linked equations). Метод представляется интересным, но из текста главы не ясен характер вклада автора в разработку этого метода. Примеров применения метода для расчета зон субдукции не приводится. Заметим также, что по требованию ВАКа диссертация должна содержать только опубликованные материалы диссертантов. Содержанию данной главы в списке публикаций автора отвечают только тезисы на конференции молодых ученых ИФЗ РАН. Такой уровень опубликованности не отвечает требованиям ВАКа, и, таким образом, материал четвертой главы не должен был бы быть включен в диссертацию.

В Заключение диссертантом приводятся основные выводы по проделанной работе. Эти выводы лишь отчасти соответствуют защищаемым положениям, поэтому остановимся на характеристике указанных выше трех защищаемых положений:

1. Механизмы очагов землетрясений вдоль линии соприкосновения плит зависят от нормальной к линии соприкосновения компоненты скорости погружающейся плиты таким образом, что когда скорость близка к нулю, то это – сдвиг, а когда скорость приближается к максимальной - взброс. При этом количество взбросов растет по мере увеличения нормальной составляющей скорости погружающейся плиты.

2. Маркируемая гипоцентрами землетрясений глубина проникновения слэба при одном и том же времени начала субдукции линейно зависит от нормальной компоненты скорости набегания погружающейся плиты.

3. При субдукции Тихоокеанской плиты под островную дугу Кермадек-Тонга, на примере афтершоков первого дня глубокого землетрясения 19.08.2018 у о-вов Тонга установлено, что размеры очага сильнейших глубоких ($MW \approx 8$, $h \approx 600$ км) землетрясений ограничены толщиной достигшей нижней границы верхней мантии погружающейся литосферной плиты, при этом очаг занимает всю толщину погружающейся плиты.

Защищаемые положения сформулированы неудачно.

Первое защищаемое положение представляется интересным и правдоподобным, но будучи основано только на данных по Алеутской островной дуге может иметь и случайный характер.

Второе защищаемое положения, вообще говоря, не оригинально, и не вполне точно. Связь, в общем виде, если не ограничиваться случаем Алеутской дуги, нелинейная (что и ожидаемо из теоретических соображений).

Третье защищаемое положение касается весьма частного вопроса (данного отдельного землетрясения), поэтому не представляет особого интереса. В более общей трактовке оно не согласуется с данными других авторов.

К замечаниям более редакционного характера можно отнести то, что автор часто использует собственные термины, вместо общепринятых, такие как «набегающая плита», «область отсечения сейсмичности»; смысл этих терминов из контекста понятен, но формально диссертант их не вводит. Не ясно также, зачем понадобилось их использовать, вместо общепринятой терминологии.

Не одиночны примеры не ясных по смыслу предложений, например «... в окрестностях центральной Алеутской дуги (Рис. 10, 11, 12) преобладает обычный слэб, проходя и погружаясь под сейсмическую зону», (стр.41).

Неоднократно встречаются очевидные опечатки, такие, например, как упоминание «действующей обдукции», имеется в виду процесс абдукции (стр. 12); или плита «отпускается», а не опускается (стр. 30), «рис. 1а» вместо рис. 21а (стр.59).

Разнообразных погрешностей довольно много. Складывается даже впечатление, что автор возможно не перечел внимательно свою диссертацию и не вполне владеет общепринятой терминологией. Заметим, что и в литературном отношении стиль текста диссертации не вполне традиционный для диссертаций и научных статей; много сленга, некоторые фразы построены не вполне правильно, и потому воспринимаются не вполне однозначно, о том, что хотел сказать автор приходится догадываться.

Заключение. Диссертационная работа Жуковца Виктора Николаевича содержит интересные моменты, автор проявил определенный профессиональный уровень, но в настоящей редакции работа не отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на присуждение учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией регистрации и интерпретации волновых полей Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики
Российской академии наук

15 августа 2022 г.



Родкин Михаил Владимирович

Я, Родкин Михаил Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Адрес: 117997, Москва, ГСП-7, Профсоюзная ул., 84/32
Тел.: 8(495)333-45-13. Факс: 8(495)333-41-21
e-mail: rodkin@mitp.ru

Подпись д.ф.-м.н. М.В. Родкина удостоверяю.
Ученый секретарь ИТПЗ РАН



Селюцкая О.В.