

На правах рукописи



Жуковец Виктор Николаевич

**Разработка модели субдукции Тихоокеанской плиты под
Алеутскую дугу**

Специальность 25.00.10

«Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва-2022

Работа выполнена в лаборатории методов прогноза землетрясений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук.

Научный руководитель: **Лутиков Александр Иванович**, кандидат физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории методов прогноза землетрясений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

**Официальные
оппоненты:**

Родкин Михаил Владимирович доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории регистрации и интерпретации волновых полей Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук;

Кожурин Андрей Иванович доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории активной тектоники и палеосейсмологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт тектоники и геофизики Российской академии наук им. Ю.А.Косыгина (ИТиГ ДВО РАН), г. Хабаровск.**

Защита диссертации состоится 15 сентября 2022 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д.002.001.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации www.vak.minobrnauki.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр.1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Камзолкину Владимиру Анатольевичу.

Автореферат разослан «___» июля 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Изучение областей зон субдукции представляет собой значительный интерес, поскольку понимание физических процессов, приводящих к погружению литосферных плит, может позволить лучше понять распределение напряжений в земной коре в областях близких к слэбу. Моделирование погружения слэба (погружающейся плиты), варьируя различные параметр, такие как ширина и мощность погружающейся и набегающей плит, разница вязкостей и плотностей между погружающейся плитой и подстилающим слоем. Набор всех этих физических параметров влияет на характер субдукции, и, вместе с тем, на предрасположенность к характерному именно для этого режима распределению очагов землетрясений. Хотя, во многом, каждая зона субдукции является уникальной.

Также моделирование может позволить понять причину появления некоторых существующих природных структур. В частности, объяснить причины особенностей глубины залегания эпицентров сейсмических событий в некоторых регионах.

Степень разработанности темы исследования

Сама по себе – задача субдукции существует достаточно давно, какие-то математические модели существовали уже в 60-е годы прошлого века, однако возможность подключения сравнительно мощных компьютеров к решению этой проблемы появилась сравнительно недавно. В настоящее время авторы, рассматривая различные наборы уравнений, описывающих движение сплошной среды, всё равно начинают решать их используя численные методы. Т.к. получить аналитическое решение не представляется возможным. При этом рассматриваются различные физические характеристики, такие как плотность, отношение вязкости подстилающего литосферную плиту слоя к вязкости самой плиты, ширина и толщина плиты, скорость и направление движения плит, сопоставляются различные механизмы субдукции. Но и численные методы имеют свои особенности, порой испытывая проблемы со сходимостью, или отсутствием должной точности.

Целью диссертационной работы

Целью данной работы является моделирование процесса субдукции для выяснения причин особенностей зоны субдукции в районе Алеутских островов. Уникальность данного региона заключается в том, что глубина погружения пододвигающейся плиты под набегающую меняется, основываясь на данных телесейсмической сети станций (CMT – Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) catalog Project, <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>), от 50 км, до ~300 км. При этом, на западе и востоке субдукция практически отсутствует, а в центре дуги глубина погружения слэба максимальна.

Использование данных о поверхностной и глубинной сейсмичности как источников информации для исследования процесса субдукции. Рассмотрение механизмов очагов

землетрясений и их усреднение с целью исследования геодинамики сталкивающихся плит.

Научная новизна

Исследуя пространственное распределение очагов землетрясений, было замечено [Рогожин и др., 2019], что вдоль Алеутской дуги наблюдается изменение глубины расположения гипоцентров. Интерес вызвал наблюдающийся перепад глубин с более заглубленных событий к менее заглубленным в промежутке долгот: 146 з.д. – 164 з.д. . Понимание причины такого необычного распределения землетрясений может пролить свет на особенности процесса субдукции.

Обычно, при решении такого рода задач используют метод конечных разностей, в некоторых случаях и метод конечных элементов. За счёт своей простоты и неплохой точности, в этой работе для численного моделирования выбран алгоритм SIMPLE, представляющий собой метод конечных элементов. Планируется получить модель субдукции, в которой, варьируя величину скорости движения подвижной плиты, можно будет проследивать поведение слэба. При этом исследуется субдукция Тихоокеанской плиты под островную дугу Алеутских островов. Также в этой работе исследуется субдукция Тихоокеанской плиты под островную дугу Тонга-Кермадек, как ещё один возможный вид субдукции. В данной постановке данная задача решается впервые.

Практическая значимость

Понимание причины особенностей погружения Тихоокеанской плиты под Алеутскую дугу вдоль всей островной дуги может помочь экстраполировать полученные знания на процесс субдукции в других частях Земного шара. Хотя и известно, что механизмы субдукции значительно различаются в зависимости от множества факторов, таких как различие в вязкостях погружающейся плиты и подстилающей её поверхности, или величины и направленности движения надвигающейся и пододвигающейся плит – изучение особенности субдукции под Алеутскую дугу может привнести свои элементы в понимание процесса субдукции.

Методология и методы исследования

Для изучения процесса субдукции Тихоокеанской плиты под Алеутскую дугу применяется рассмотрение усредненного поля механизмов очагов землетрясений. Производится сопоставление направления и величины скорости движения Тихоокеанской плиты, полученных на основе данных GPS [Баранов, Монин, 1985; Boyd, Creager, 1991; Song, Simons, 2003; Jicha, et al., 2004; Ryan, Freymuller, 2008; Brown, et al., 2012; Craig et al., 2014], с типами механизмов очагов землетрясений, описывающих напряженное состояние среды. Для построения карт распределения механизмов очагов землетрясений написан скрипт в MapBasic. Информационной базой для выполнения работы служили : Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии (УКЗСЕ) [Уломов, Медведева,

Catalog-СКЗ.pdf], Региональный каталог землетрясений Камчатки (РКЗК) КФ ЕГС РАН [<http://www.emsd.ru>], Каталог службы срочных донесений (ССД) ЕГС РАН [http://www.ceme.gsras.ru/ceme/ssd_news.htm], каталоги NEIC [<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>] и CMT [Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) catalog; Dziewonski et al., 1981].

На основе описанных выше источников данных, также, строились профильные разрезы вдоль Алеутской дуги, что позволило оценить форму и заглубленность слэба.

Научные положения, выносимые на защиту

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.

Личный вклад

Усреднение механизмов очагов землетрясений и построение соответствующих карт. Сопоставление направления и скоростей движения плит с соответствующими им профилями и напряжёнными состояниями. Разработка алгоритма решения двухмерной задачи субдукции океанической литосферной плиты под континентальную плиту и связанного с ним программного кода.

Апробация работы

Результаты проведенных исследований были представлены на «Научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН» (2019, 2020). По теме диссертации опубликовано три статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав: физического и математического моделирования процесса субдукции (глава 1), исследования процесса субдукции под Алеутскую дугу (глава 2), рассмотрение субдукции недалеко от острова Тонга (глава

3), составления подхода к математическому моделированию процесса субдукции (глава 4), заключения и списка литературы (122 наименования), изложенных на 111 страницах текста, и содержит 35 рисунков и 1 таблицу.

Благодарности

Автор диссертационной работы выражает благодарность научному руководителю – кандидату физико-математических наук Лутикову А.И. за помощь в выполнении работы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ №2 19-35-90072 «Математическая модель субдукции Тихоокеанской плиты под Алеутскую дугу» руководитель Лутиков А.И.

Автор благодарит коллектив лабораторий: Методов прогноза землетрясений, Сейсмотектоники и сейсмического микрорайонирования и Палеосейсмологии и палеогеодинамики ИФЗ РАН за поддержку и плодотворные обсуждения.

Автор благодарен сотрудникам лаборатории Методов прогноза землетрясений и лаборатории Фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга ИФЗ РАН за помощь в решении возникающих проблем и содействии в работе. А также за неоценимую моральную поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы, в общих словах рассмотрен вопрос изученности темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, её научная новизна, отражена практическая значимость результатов работы.

Глава 1. Физическое и математическое моделирование процесса субдукции.

Описан вопрос изученности явления субдукции, приводится краткий экскурс в историю развития представлений о процессе погружения одной плиты под другую. Описаны возможные причины возникновения данного явления, приведены физические и математические модели субдукции. Рассмотрены различные типы субдукции и её зависимость от ряда физических параметров. Таких как ширина и толщина пододвигающейся плиты, покоится или движется висячий блок, соотношение между вязкостью пододвигающейся плиты и подстилающего слоя.

В разделе 1.1. Рассматривается история изучения явления субдукции, начиная с момента возникновения концепции тектоники литосферных плит в 30-х годах прошлого века. Описываются основные типы взаимодействия литосферных плит, частным случаем которых и является субдукция, т.е. погружение одной литосферой плиты, океанического типа, под другую плиту как океанического, так и континентального типа.

Разделе 1.2. Посвящён математическому моделированию явления субдукции. Основным инструментом для этого является уравнение Навье-Стокса, описывающее движение вязкой жидкости. Его применение к задачам геофизики обусловлено тем фактом, что на геологических временных масштабах тело Земли можно считать жидким, пусть и сильновязким. Приведены некоторые алгоритмы численного моделирования, которые активно используются в силу того, что получение аналитического решения уравнений Навье-Стокса возможно не для всех задач. Одной из таких задач является и задача о погружении слэба под висячий блок. Описаны реологические допущения нескольких авторов, без использования которых, в частности, не сможет возникнуть субдукция.

В разделе 1.3. Описывается применение полученных в предыдущем разделе моделей для описания эволюции слэба. Рассматривается связь между несколькими параметрами погружающейся плиты и результирующим механизмом взаимодействия этой плиты со средней мантией на глубине 660км, известной как переходная зона. Это глубина, на которой происходят фазовые переходы, т.е. такие преобразования как оливин-шпинель, пироксен-перовскит. В том числе, учтена вероятность отрыва слэба с дальнейшим его погружением в недра Земли. Рассмотрены возможные источники возникновения движущей силы для явления субдукции. Хотя и имеются различные точки зрения даже касательно зон спрединга - являются ли они источником конвекции, или же её следствием. Всё же, на данный момент, общепринятой считается гипотеза о

том, что движение плит от зон спрединга к дивергентной зоне является следствием конвекции в Земных недрах.

Выводы по главе 1. Хотя исследование явления субдукции проводится уже достаточно длительное время, теоретические, математические и физические модели пока не способны в полной мере его описать. Проводятся постоянные совершенствования существующих моделей, рассматриваются различные приближения, позволяющие моделировать процесс таким образом, чтобы он был близок к тому, что наблюдается в природе.

Глава 2. Исследование процесса субдукции под Алеутскую дугу. В тексте главы проводится рассмотрение особенностей процесса субдукции вдоль Алеутской дуги. Отдельно рассматривается Командорская микроплита и относящееся к ней сильное землетрясение 17.07.2017 года, как следствие особенностей геодинамики. Информационной базой для выполнения исследования служили, Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии (УКЗСЕ) [Уломов, Медведева, seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-CK3.pdf], Региональный каталог землетрясений Камчатки (РКЗК) КФ ЕГС РАН [<http://www.emsd.ru>], Каталог службы срочных донесений (ССД) ЕГС РАН [http://www.ceme.gsras.ru/ceme/ssd_news.htm], каталоги NEIC [<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>] и CMT [Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) catalog; Dziewonskiet al., 1981; Лутиков и др, 2019].

В разделе 2.1. Проводится исследование изменения глубины сейсмичности вдоль Алеутской дуги (Рис. 1).

Так, на западе дуги, вдоль Командорских островов, глубинная сейсмичность отсутствует. Далее, приближаясь к Ближним островам, мы замечаем, что появляются события с глубиной гипоцентра до 160 км, однако все они сконцентрированы восточнее островов Атту, Семичи и Агатту, примерно на 175 - 176 восточной долготы. Восточнее 178-ти градусов восточной долготы, вблизи Крысыих островов, появляется значительное количество землетрясений с глубиной залегания гипоцентров больше 150-ти километров. Вдоль всех Андреяновских островов наблюдается значительное количество событий с глубиной залегания гипоцентра выше 250-ти километров. В районе Лисьих островов уменьшается количество событий с глубиной залегания гипоцентра выше 250-ти километров, а вдоль всего продолжения острова Уналашка, 166 - 168 з.д., их и вовсе нет. Восточнее Лисьих островов глубокая сейсмичность с глубиной гипоцентра больше 250-ти исчезает, а количество событий с глубиной гипоцентра большей 150-ти километров постепенно уменьшается. Другими словами, по крайней мере, в областях Крысыих (Rat Islands), Андреяновских (Andreanoff Islands) и Лисьих (Fox Islands) островов существует четко выраженная погружающаяся в северных румбах сейсмофокальная зона Заварицкого—

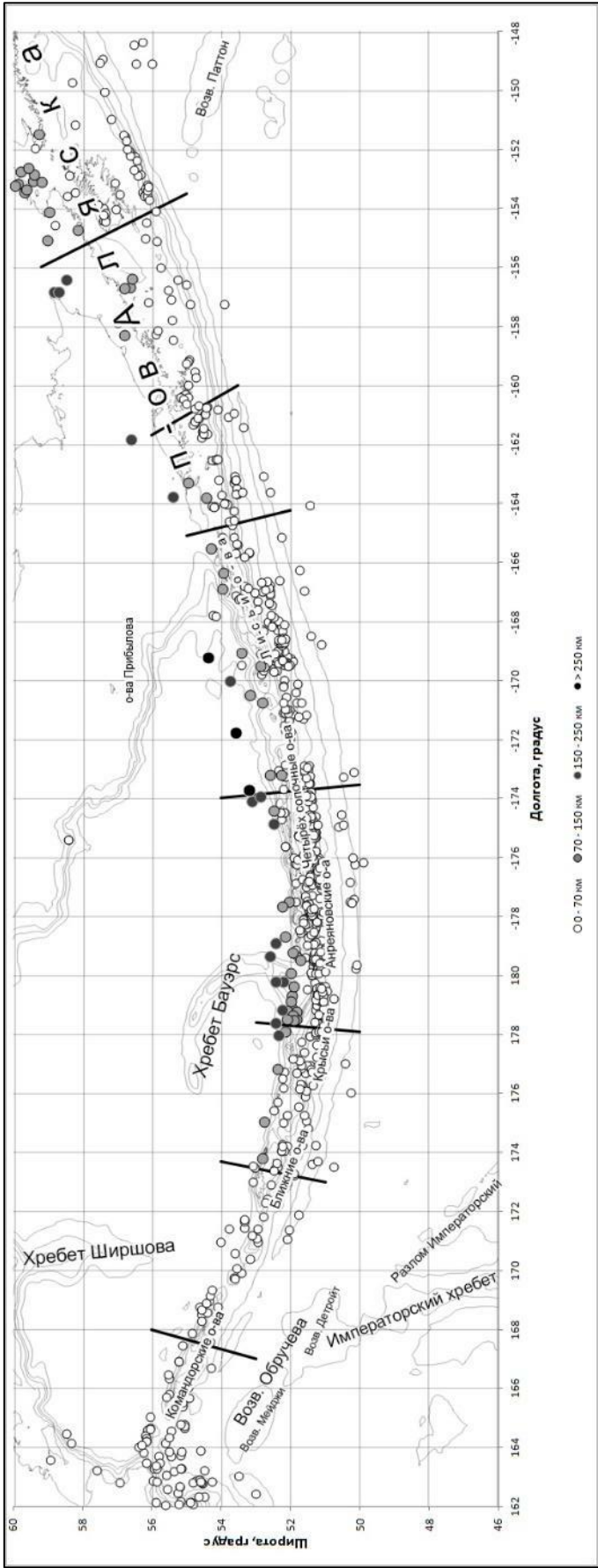


Рис. 1. Ситуационная карта, показывающая сейсмичность ($MW \geq 5.5$) всей Алеутской дуги и п-ова Аляска. Сплошными секущими линиями показаны разрезы через Алеутскую дугу [Рогожин и др, 2019].

Беньофа, которую можно рассматривать в качестве структуры субдукции Тихоокеанской плиты под Алеутскую дугу. Какие-либо признаки существования субдукции Тихоокеанской плиты под Командорский литосферный блок отсутствуют. Отсутствуют на Командорских островах и проявления четвертичного вулканизма.

Наибольшие глубины гипоцентров (до ~300 км) наблюдаются в средней и юго-восточной частях Алеутской островной дуги, где последняя ориентирована под крутым углом к направлению движения Тихоокеанской плиты. При этом северо-западный край плиты частично погружается под Алеутскую дугу. В районе Командорских островов вектор движения Командорского блока практически параллелен вектору движения Тихоокеанской литосферной плиты и, соответственно, субдукции Тихоокеанской плиты под Командорский блок не происходит. Собственно, об этом и свидетельствует отсутствие глубокофокусной сейсмичности в районе Командорских островов.

Следующее, что рассматривается в разделе - это деформированное состояние среды, опираясь на данные о механизмах очагов землетрясений. Восточнее Командорских островов, за дугой, наблюдаются преимущественно механизмы очага типа взброса, что соответствует напряженному состоянию сжатия. В то же время, перед Алеутской дугой, имеют место преимущественно механизмы очага типа сброса. Такое поведение типа механизма очага в преддуговой области объясняется изгибом литосферной плиты. Кинематика плиты частично ограничена скоростью и направлением схождения плит, а также геометрией желоба и субдукции. Почти по всей дуге плита достигает глубины отсечки локальной сейсмичности всего за 6 млн лет [Creager, Boyd, 1991]. Таким образом, чтобы смоделировать сейсмически активную часть плиты и переход к ее асейсмическим частям, ведутся поиски количественных тектонических ограничений на геометрию и скорость субдукции в течение примерно последних 6 млн. лет и качественные ограничения за последние 20 млн лет. Особое значение имеет то, можем ли мы предположить установившийся поток в течение последних 6 млн. лет. Из полученной в ходе выполнения данной работы регрессии, можно, как следствие, получить то же значение для возраста слэба. Хотя оценки времени возникновения Алеутской дуги различаются на 30 млн лет, ни одна из них не моложе 43 млн лет. Реконструкции плит показывают, что в восточных Алеутских островах скорость и относительное направление конвергенции были довольно постоянными в течение последних 43 млн. лет. Кроме того, абсолютное движение Тихоокеанской плиты за последние 47 млн лет существенно не изменилось, о чем свидетельствует гавайская цепь подводных гор. Если центральная и западная части Алеутской дуги не были смещены к северу относительно восточной части дуги за этот период времени, скорость и относительное направление конвергенции можно в первом порядке также считать постоянными в этих областях.

В разделе 2.2. Проводится описание геодинамики исследуемого региона (Рис. 2). Начиная от Командорского блока, или микроплиты, у которой на обеих параллельных

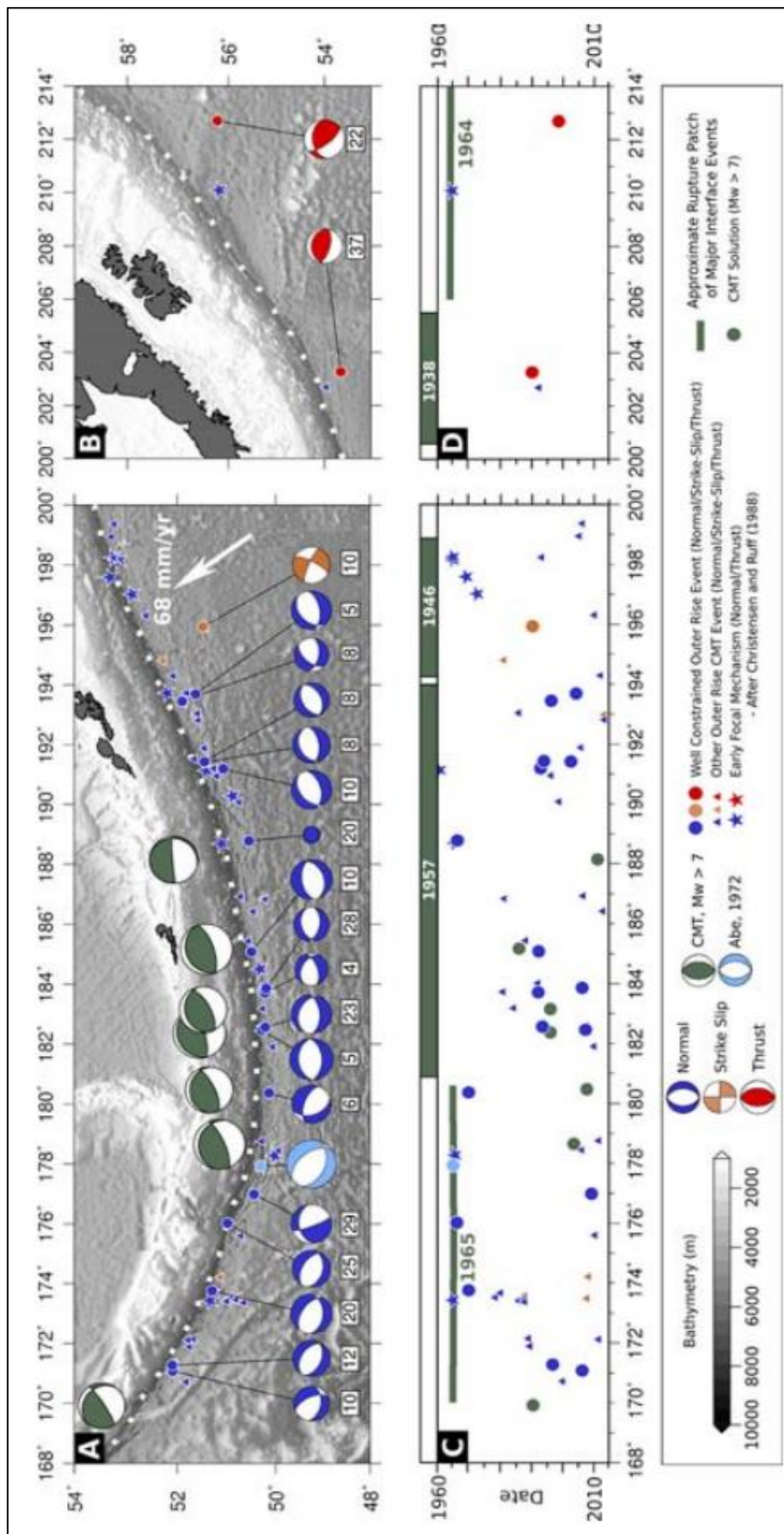


Рис. 2. Сейсмичность вдоль Алеутской дуги [Craig, 2014].

границах в механизмах очагов землетрясений преобладают правые сдвиги, по данным каталога CMT.

Что указывает на то, что узкий линейно вытянутый блок скользит на северо-запад параллельно движению Тихоокеанской плиты, несколько отставая по скорости от последней. Далее, к юго-востоку от о. Медный в районе 170° в. д. наблюдается резкая смена напряженного состояния. Начинают преобладать механизмы взбросо-надвигового типа, обе нодальные плоскости в которых перпендикулярны простиранию островной дуги.

Восточнее 170° в. д. в пределах западного сегмента Алеутской дуги в районе о. Атту и северо-западнее его вновь наблюдается изменение характера фокальных механизмов, при этом эпицентры сейсмических событий смещаются несколько севернее по сравнению с таковыми в пределах Командорской островной дуги. На северо-востоке наблюдаются механизмы с режимом практически чистого сдвига, причем одна из нодальных плоскостей ориентирована вдоль островной дуги. По плоскостям этого простирания осуществляются смещения праводвигового типа, как и на Командорской дуге. С некоторыми отклонениями данное распределение областей сжатия/растяжения совпадает на разных масштабных уровнях.

В разделе 2.3. Рассматриваются особенности движения Тихоокеанской плиты, скорость и направление движения плиты вдоль Алеутской дуги. Обнаруживается зависимость между глубиной отсечки сейсмичности и скоростью движения плиты. Полученная зависимость носит линейный характер (Рис. 3) и имеет весьма высокий коэффициент корреляции:

$$h = 5,99u + 10,134 \pm 44,68 \text{ км}, \quad R^2 = 0,9911, \quad \sigma = 44,68 \text{ км},$$

где h - глубина отсечки сейсмичности для слэба, u – нормальная к оси желоба компонента скорости движения Тихоокеанской плиты.

Выводы по главе 2. Рассмотренные в данной главе материалы соответствуют пунктам 1 и 2 защищаемых положений. Изучены особенности сейсмичности вдоль Алеутской дуги, в том числе зависимость глубины отсечения сейсмичности от расположения зоны сейсмичности вдоль дуги, зависимость глубины отсечения сейсмичности от скорости движения Тихоокеанской плиты. Для установления полученных зависимостей были построены подолготные разрезы в нескольких частях дуги. Изначально были построены разрезы для каждой долготы, но позже, ввиду отсутствия необходимости в этом, число разрезов было сокращено до количества разрезов, находящихся только вблизи какой-либо группы островов, как следствие увеличился объём среды для каждого разреза. Для объяснения причин изменения глубины отсечения сейсмичности вдоль дуги, были рассмотрены механизмы очагов землетрясений, приуроченные к исследуемым областям. Установлено, что в западной части дуги преобладают сдвиговые компоненты с обеих сторон от глубоководного желоба. В остальных частях с наружной стороны от желоба (со стороны пододвигающейся Тихоокеанской плиты) наблюдаются механизмы очага типа нормального сброса, с нодальными плоскостями

параллельными оси желоба. В то время как с внутренней стороны, преобладают механизмы очага типа взброса, нодальные плоскости которых, также, параллельны оси желоба. Что говорит о преобладании изгибных деформаций в пододвигающейся плите (проявление сейсмичности с механизмами очага типа нормального сброса) и о преобладающих деформациях сжатия в набегающей плите (проявление сейсмичности с механизмами очага типа взброса) за счёт столкновения двух плит.

Для установления второй зависимости было проведено сопоставление скорости движения различных частей Тихоокеанской плиты в областях, соответствующих полученным разрезам, с глубиной отсечки сейсмичности. Результатом оказалась линейная зависимость этих двух параметров, с коэффициентом корреляции Пирсона равным 0.9911.

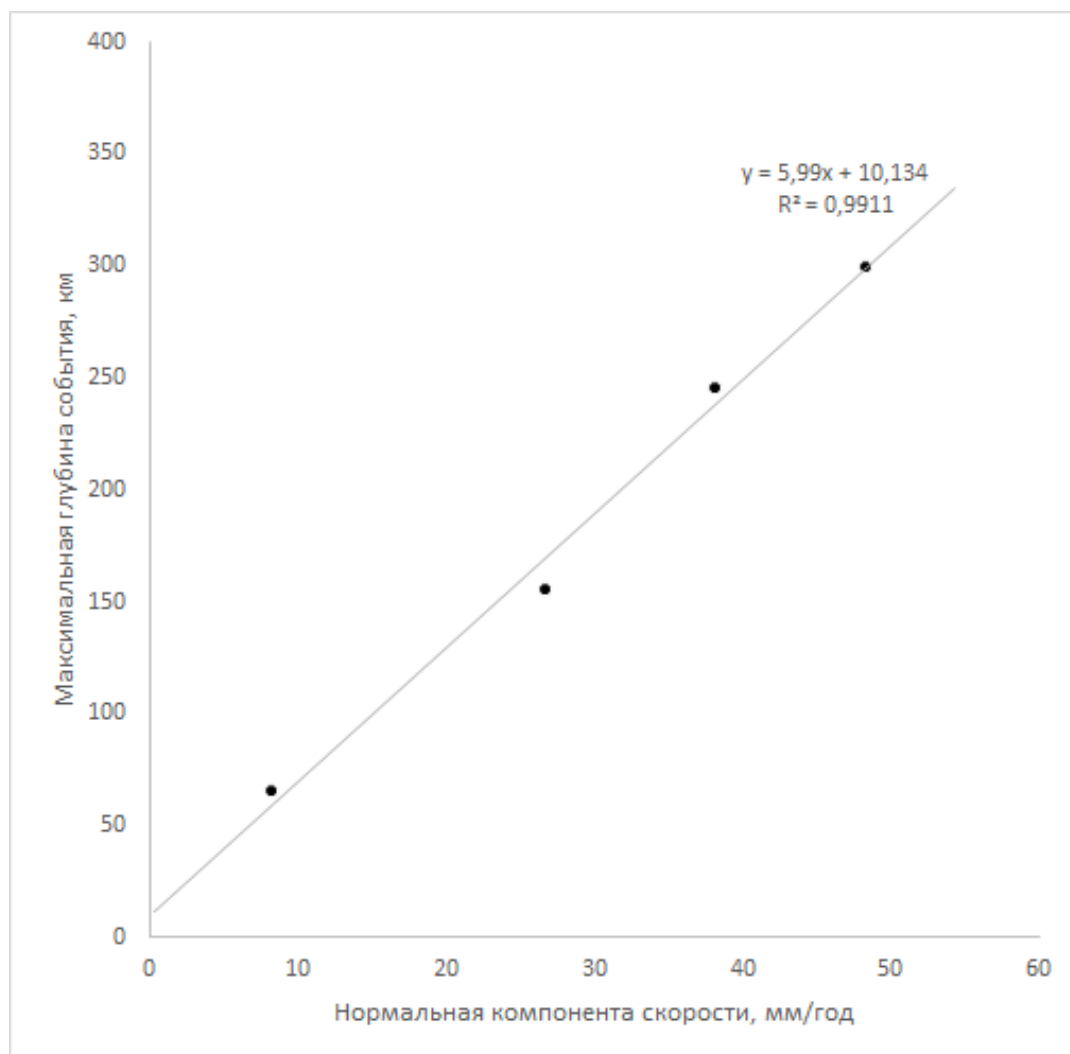
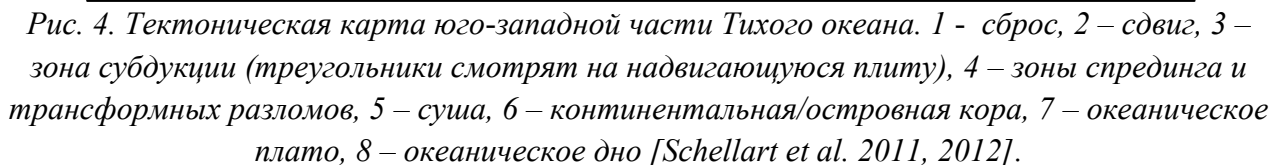


Рис.3. Изменение максимальной глубины слэба в зависимости от величины нормальной компоненты скорости движения Тихоокеанской плиты на основе данных каталога CMT [CMT – Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) catalog Project, <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>] и GPS данных о движении Тихоокеанской плиты [Yongliang et al, 2019; Brown et al, 2013].

Глава 3. Рассмотрение субдукции недалеко от острова Тонга. Глава посвящена изучению глубинной сейсмичности вблизи островов Фиджи и Тонга, в связи с

В разделе 3.1. Исследуется тектоническая позиция и геодинамическая обстановка вблизи островов Тонга. Острова архипелага Тонга образуют островную дугу Тонга–Тофуа северо–северо-восточного простирания, располагающуюся к западу от глубоководного желоба Тонга на стыке двух крупнейших литосферных плит: Индо-Австралийской на западе и Тихоокеанской на востоке (Рис. 4).



Океаническая кора Тихоокеанской плиты на границе с Индо-Австралийской в районе островов Тонга погружается в западном направлении в мантию вдоль выделяемой здесь зоны субдукции. Наиболее очевидным выражением такой зоны здесь является наличие глубоководного желоба и задугового бассейна Лау, а также интенсивной вулканической активности на островах, вызванной погружением океанической коры под континентальную и ее частичным плавлением в литосфере. К западу от островной дуги Тонга наблюдается V-образная в разрезе зона бассейна Лау северо–северо-восточного простирания, который протягивается в южном направлении к островам Новой Зеландии. Вдоль этой межплитной границы 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.

Еще одной структурной особенностью глубоководного желоба Тонга и Тофуа, обрамляющего вулканическую дугу с востока, является то, что эти структуры резко ограничиваются на севере гигантской зоной разломов системы Фиджи. Здесь, в области главного разрыва в коре, известного как зона разломов Витязь, трог Тонга делает резкий поворот на запад. Зона сочленения разломов выступает в качестве гигантского дизъюнктивного узла, на северной границе Тихоокеанской плиты в области ее пододвигания под островную дугу Тонга.

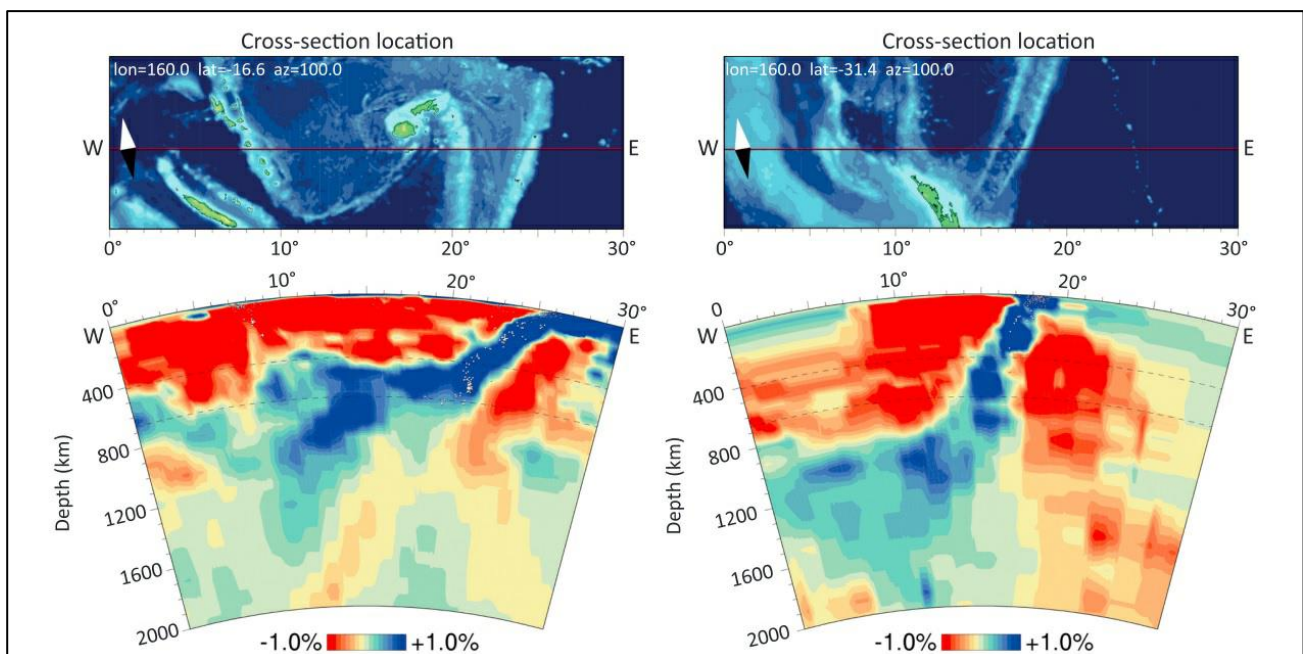


Рис. 5. Сейсмотомографический профиль вдоль широты: с запада на восток, слэба Тонга-Кермадек. Северная окраина островов - левый рисунок, южная окраина островов – правый рисунок, основываясь на модели UU-70P [van de Lagemaat, 2018].

Основываясь на данных сейсмической томографии (Рис. 5), а также на распределении гипоцентров очагов землетрясений в пространстве, можно заметить, что угол

погружения слэба в районе желоба Тонга составляет 45 градусов. При этом слэб достигает границы верхняя-средняя мантия и продолжает своё движение вдоль указанной границы.

В разделе 3.2. Рассматривается очаговая область, а также облако афтершоков землетрясения, $M_w=8.2$ 10.08.2018, которое заняло всю толщину погружающегося слэба, позволяя, тем самым, в явном виде увидеть положение слэба в рассматриваемой области (Рис. 6). Судя по облаку афтершоков за первые сутки, очаг землетрясения имеет в плане форму, близкую к изометрической, с размерами большой и малой осей, соответственно лежащих в пределах $55 \leq L \leq 155$ км, $46 \leq W \leq 126$ км, то есть очаг этого глубокого землетрясения оказывается приблизительно в 2 раза меньше очага корового землетрясения такой же магнитуды.

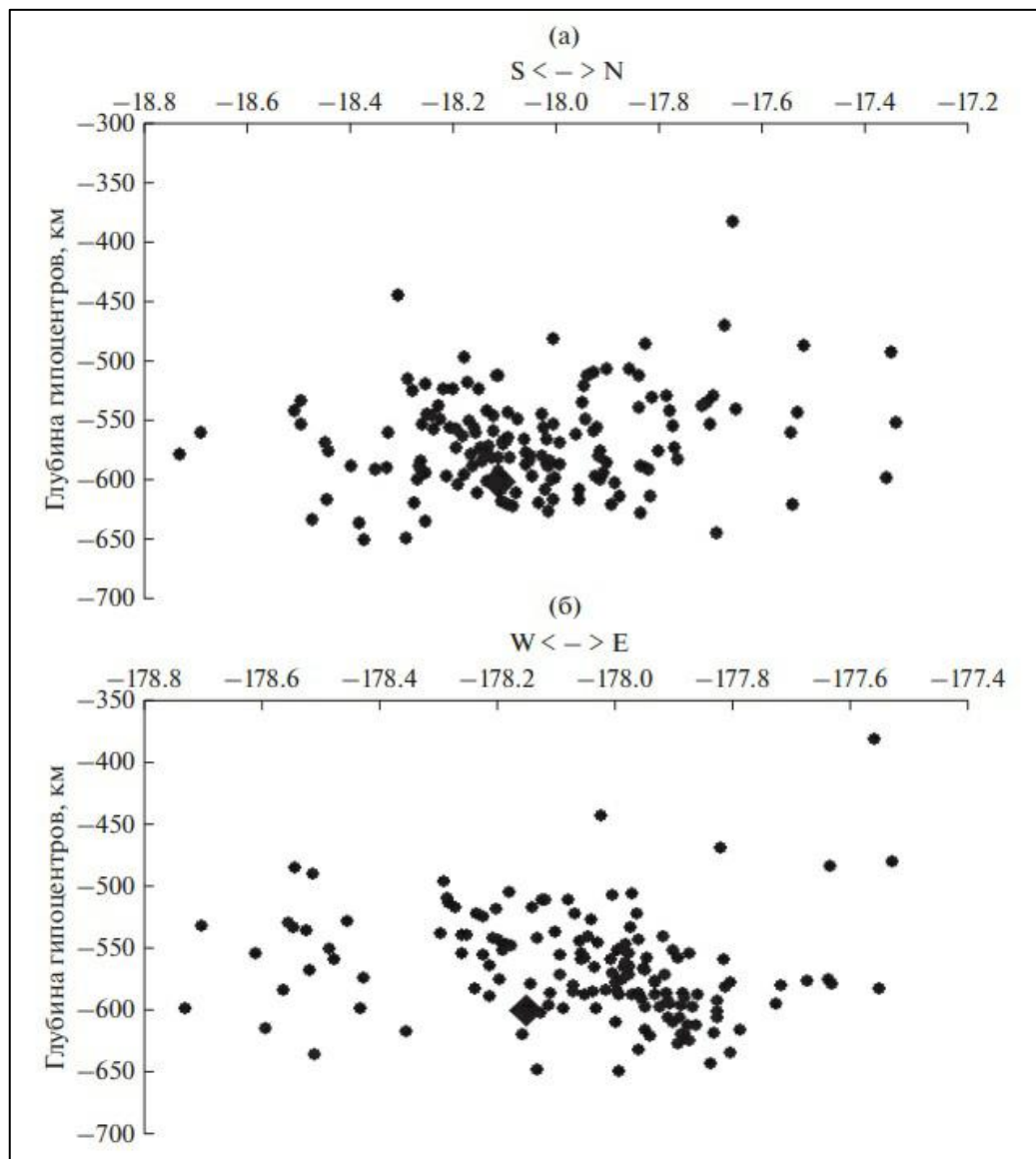


Рис. 6. Глубинный разрез облака афтершоков 1-го дня в направлении юг–север (а); запад–восток (б). Построен по 151 афтершоку ($m_b \geq 4.0$). Главное событие обозначено большим ромбом [Лутиков, 2019].

В разделе 3.3. Исследуются механизмы очагов землетрясений вблизи желоба Тонга. Резкое изменение вида напряжённого состояния вблизи островов Самоа можно

объяснить резким изменением направления оси желоба (Рис. 4, 7). Как следствие, возникает много более глубоких (~40-50км) событий с механизмом очага типа взброса, чем (~5-10км) событий с механизмом очага типа нормального сброса. При этом, в обоих случаях ориентация механизмов субпараллельна направлению желоба.

Выводы по главе 3. Данная глава соответствует 3-му пункту защищаемого положения. Опираясь на рассмотренные в данной главе материалы, можно сделать вывод, что плита, погружающаяся под острова Фиджи, Тонга и Кермадек длительное время располагается вдоль границы верхняя-нижняя мантия, прежде чем погружается в нижнюю мантию. При этом, в плите преобладают механизмы типа сброса, что, обычно, объясняется наличием напряжений растяжения, или же наличия изгиба. По полученным томографическим разрезам видно, что при совпадении направления движения плит слэб погружается в нижнюю мантию сразу, не ложась на границу верхней и нижней мантии (Рис. 4, 5). В свою очередь, при противоположном направлении движения плит, Тихоокеанской и плиты Тонга - видно, что слэб не способен сразу погрузиться в нижнюю мантию и некоторое время движется вдоль границы верхняя-нижняя мантия (Рис. 4, 5). Скорее всего это происходит из-за угла погружения и скорости, с которой плита движется и пытается продвинуться в нижнюю мантию.

Глава 4. Подход к математическому моделированию процесса субдукции. Глава посвящена численному моделированию процесса субдукции. Для реализации моделирования предлагается использовать алгоритм SIMPLE (Semi-Implicit method for pressure-linked equations), так как он достаточно прост, его решение даже на грубой сетке удовлетворяет точным интегральным балансам, вынуждает контролировать скорость сходимости, но, в то же время, позволяет решать задачи гидродинамики.

В разделе 4.1. Вводится математическая постановка задачи субдукции, состоящая из фундаментальных уравнений сохранения массы, импульса и энергии, которые необходимы для моделирования геомеханических задач. В первую очередь, эта система дифференциальных уравнений в частных производных включает в себя уравнения Навье-Стокса (1) и (2). Сохранение массы представлено уравнением неразрывности, в котором плотность принимаем неизменной (3). А для описания плавучести используется приближение Буссинеска (4) [Moresi, 1995], с помощью которого реализуется большинство программных кодов, осуществляющих численное моделирование мантийной конвекции. Вязкость потока [Turcotte et al., 2002; Kirby, 1987] определяется реологическим уравнением (5).

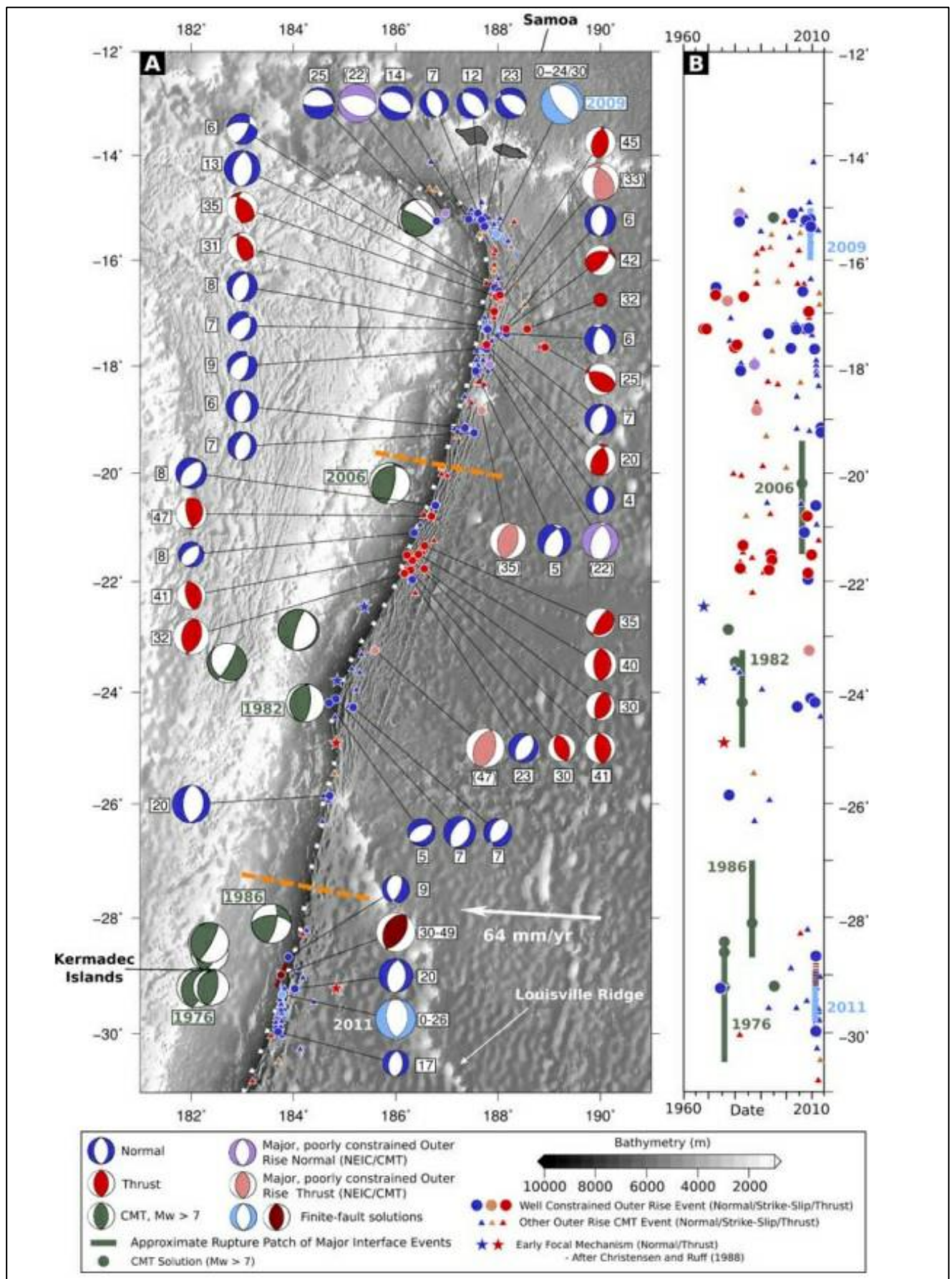


Рис. 7. Преддуговая сейсмичность вдоль зоны субдукции Самоа-Тонга-Кермадек [Craig et al., 2014].

$$\begin{cases} \frac{du_x}{dt} = j_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{2}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right) - \frac{2}{3\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \left(\frac{-1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \right) \right) & (1) \\ \frac{du_z}{dt} = j_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{2}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \right) - \frac{2}{3\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \left(\frac{-1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \right) \right) & (2) \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + u_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0 & (3) \\ \rho = \rho_0 * [1 - \alpha(T - T_0)][1 + \beta(P - P_0)] & (4) \\ \eta = N \exp \left(1 - \frac{T - T_0}{T_0} \right) \exp \left(\frac{E}{RT_0} \right) & (5) \end{cases}$$

где E - энергия активации, R - универсальная газовая постоянная, N - предэкспоненциальная реологическая константа.

В качестве начальных и граничных условий были выбраны следующие:

- Равенство нулю напряжений на свободной поверхности;

$$\sigma_{ij} = 2\eta \dot{\epsilon}_{ij} = \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0, \quad i = x, z \quad (6)$$

- Условие прилипания на нижней, покоящейся, поверхности;

$$u_i = 0, \quad i = x, z \quad (7)$$

- Условие свободного скольжения на нижней границе континентальной (неподвижной) плиты.

$$u_{i+1}|_{i=h_{continent}} = u_i|_{i=h_{continent}} \quad (8)$$

- Некоторое постоянное значение скорости на левой границе исследуемой области.

Рассматривается модельная задача, которая используется для проверки корректности расчётов.

В разделе 4.2. Описываются подходы к решению задачи поставленной в предыдущем разделе. Рассматриваются виды методов численного моделирования. Показаны основные достоинства смещенной, или шахматной сетки. При расположенной в шахматном порядке сетке составляющие скорости рассчитываются для точек, лежащих на гранях контрольных объемов. Таким образом, составляющая скорости u вдоль оси x рассчитывается на гранях, перпендикулярных направлению оси x . И, тем самым, рассчитывается относительно последующих узлов, а не предыдущего и следующего относительно центрального. Одно из главных достоинств шахматной сетки — при формировании разности для давлений, во время решения уравнения непрерывности, получаем, что нам известны значения горизонтальных компонент скорости u на восточной и западной границах контрольного объема, а значения вертикальных компонент скорости v на северной и южной границах. Тем самым, нет необходимости в интерполяции скоростей в двух соседних точках. Помимо этого, как уже говорилось ранее, значения рассчитываются не через точку, а в каждом узле. Однако, для расчета коэффициента диффузии и массового расхода на гранях контрольного объёма всё равно потребуется соответствующая интерполяция.

В разделе 4.3. Вводится разностная схема, соответствующая алгоритму SIMPLE. Имея начальную систему уравнений Навье-Стокса, преобразуем исходные уравнения к виду [Патанкар, 1984]:

$$A_O^u u_O + A_S^u u_S + A_N^u u_N + A_W^u u_W + A_E^u u_E = S_O^u$$

Для упрощенной системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u^2 - \eta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho v u - \eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u v - \eta \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho v^2 - \eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v) &= 0 \end{aligned}$$

Соответствующие коэффициенты принимают вид:

$$\begin{aligned} A_O^u &= \frac{|\rho_e u_e| + \rho_e u_e}{2} \Delta z + \frac{\eta_e}{\Delta x} \Delta z + \frac{|\rho_w u_w| - \rho_w u_w}{2} \Delta z + \frac{\eta_w}{\Delta x} \Delta z + \\ &+ \frac{|\rho_n v_n| + \rho_n v_n}{2} \Delta x + \frac{\eta_n}{\Delta z} \Delta x + \frac{|\rho_s v_s| - \rho_s v_s}{2} \Delta x + \frac{\eta_s}{\Delta z} \Delta x \\ A_S^u &= -\frac{|\rho_s v_s| + \rho_s v_s}{2} \Delta x - \frac{\eta_s}{\Delta z} \Delta x \\ A_N^u &= -\frac{|\rho_n v_n| - \rho_n v_n}{2} \Delta x - \frac{\eta_n}{\Delta z} \Delta x \\ A_W^u &= -\frac{|\rho_w u_w| + \rho_w u_w}{2} \Delta z - \frac{\eta_w}{\Delta x} \Delta z \\ A_E^u &= -\frac{|\rho_e u_e| - \rho_e u_e}{2} \Delta z - \frac{\eta_e}{\Delta x} \Delta z \\ S_O^u &= (p_w - p_o) \Delta z \end{aligned}$$

Аналогичную форму имеют уравнения для второй компоненты скорости, за исключением выражения для «источника»:

$$\begin{aligned} A_O^v &= \frac{|\rho_e u_e| + \rho_e u_e}{2} \Delta z + \frac{\eta_e}{\Delta x} \Delta z + \frac{|\rho_w u_w| - \rho_w u_w}{2} \Delta z + \frac{\eta_w}{\Delta x} \Delta z + \\ &+ \frac{|\rho_n v_n| + \rho_n v_n}{2} \Delta x + \frac{\eta_n}{\Delta z} \Delta x + \frac{|\rho_s v_s| - \rho_s v_s}{2} \Delta x + \frac{\eta_s}{\Delta z} \Delta x \\ A_S^v &= -\frac{|\rho_s v_s| + \rho_s v_s}{2} \Delta x - \frac{\eta_s}{\Delta z} \Delta x \\ A_N^v &= -\frac{|\rho_n v_n| - \rho_n v_n}{2} \Delta x - \frac{\eta_n}{\Delta z} \Delta x \\ A_W^v &= -\frac{|\rho_w u_w| + \rho_w u_w}{2} \Delta z - \frac{\eta_w}{\Delta x} \Delta z \end{aligned}$$

$$A_E^v = -\frac{|\rho_e u_e| - \rho_e u_e}{2} \Delta z - \frac{\eta_e}{\Delta x} \Delta z$$

$$S_O^v = (p_s - p_o) \Delta x$$

Разница между коэффициентами A_O^u и A_O^v заключается в использовании разнесенной сетки. Так, одно и то же обозначение u_e будет представлять собой разностную величину:

$$u_e = \frac{u_O + u_E}{2},$$

для уравнения момента X (1), и:

$$u_e = \frac{u_E + u_{SE}}{2},$$

для уравнения момента Z (2).

На следующем шаге производится составление пятидиагональной матрицы.

Главная диагональ матрицы, соответственно, будет состоять из коэффициентов A_O^u ($A[i, i]$), соседняя диагональ слева от A_O^u будет состоять из коэффициентов A_W^u ($A[i - 1, i]$), соседняя диагональ справа от A_O^u будет состоять из коэффициентов A_E^u ($A[i + 1, i]$), диагональ с коэффициентами A_N^u начинается со второй строки начальной сетки, поэтому её положение определяется ($A[i + n/2, i]$), диагональ с коэффициентами A_S^u по аналогии с A_N^u определяется ($A[i - n/2, i]$). Где n – число узлов начальной сетки, т.к. при решении используется смещённая сетка, то число узлов уменьшается вдвое. За счёт особенности понятия узла для смещенной сетки. Размер матрицы A равен $\left(\frac{m}{2} \times \frac{n}{2}, \frac{m}{2} \times \frac{n}{2}\right)$, где m – число узлов начальной сетки по вертикали, n – по горизонтали.

После того, как СЛАУ для уравнений моментов была решена, производится аналогичный подсчет для уравнений давлений:

$$A_O^p = \frac{\rho_e (\Delta z)^2}{A_O^u|_{i+1,j}} + \frac{\rho_w (\Delta z)^2}{A_O^u|_{i,j}} + \frac{\rho_n (\Delta x)^2}{A_O^v|_{i,j+1}} + \frac{\rho_s (\Delta x)^2}{A_O^v|_{i,j}}$$

$$A_S^p = -\frac{\rho_s (\Delta x)^2}{A_O^v|_{i,j}}, \quad A_N^p = -\frac{\rho_n (\Delta x)^2}{A_O^v|_{i,j+1}}$$

$$A_W^p = -\frac{\rho_w (\Delta z)^2}{A_O^u|_{i,j}}, \quad A_E^p = -\frac{\rho_e (\Delta z)^2}{A_O^u|_{i+1,j}}$$

$$S_O^p = -[(\rho_e u_{i+1,j} - \rho_w u_{i,j}) \Delta z + (\rho_n v_{i,j+1} - \rho_s v_{i,j}) \Delta x]$$

После чего получаем поправки для давлений и скоростей. Глобальная итерация продолжается до тех пор, пока либо величина остаточного члена не станет меньше некоторого значения, например, 10^{-6} , либо пока не будет достигнуто установленное предельное количество итераций.

После чего алгоритм повторяется сначала для следующей глобальной итерации.

В разделе 4.4. Приводится частичное решение модельной задачи.

Имеется ёмкость, полностью заполненная водой размера $100 \times 100 \text{ м}$ (Рис. 8). На всех границах величины компонент скоростей u и v равны нулю, везде, кроме как на верхней границе, где величина горизонтальной компоненты скорости задается некоторым постоянным числовым значением, например, 2 м/с . Давление в начальный момент времени везде задаём равным 10^5 Па . Плотность — принимаем равной плотности воды при н.у. 1000 кг/м^3 . Коэффициенты сжимаемости $\beta = 0.00000000001 \text{ 1/Па}$ и теплового расширения $\alpha = 0.0000119 \text{ 1/К}$ [Вильнер, 1976] берём из известных табличных значений для воды при комнатной температуре $T = 293 \text{ К}$. Вязкость считаем постоянной $\eta = 0.00089 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Добавляются граничные условия к уравнениям, описанным в разделе 4.3. И приводится решение для первой итерации.

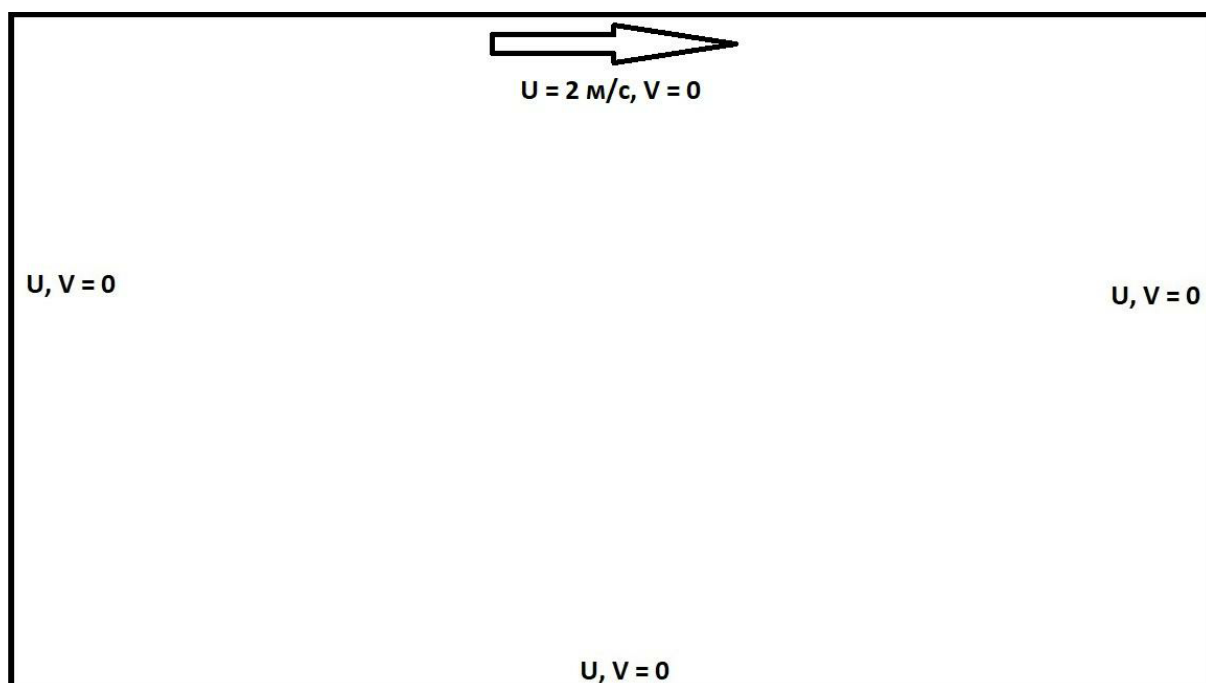


Рис.8. Графическое представление модельной задачи.

В разделе 4.5. Приводится формулировка задачи для процесса субдукции.

Построена сетка 200 на 200 узлов ($i = 1:200$; $j = 1:200$), с промежуточными узлами $(i+1/2, j+1/2)$ между ними, откуда получаем 400×400 узлов и примерно 160000 клеток. В плитах начальная скорость нулевая, в континентальной плите всегда будет нулевая (она жестко закреплена). Под плитами имеется ненулевая скорость (один из вариантов задания начального движения плиты) – в центрах клеток изображены вектора скоростей такие, что вертикальные скорости на начальный момент отсутствуют, а горизонтальные равны определенному начальному значению.

Глубина океана взята равной 3 км . Мощность океанической коры 8 км . Мощность гранитного слоя на континенте равна 30 км , базальтового 40 км . После 11 км под океаном до 90 км и 70 -ти км под континентом до границы 200 км идёт слой верхней мантии, который является частью литосферной плиты. Начальные значения распределения плотностей по глубинам были взяты из модели emc stw-105.

Позже рассчитаны по формуле:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 - \alpha(T - T_0)) \cdot (1 + \beta(P - P_0))$$

где ρ_0 – плотность при нормальных условиях, T_0 - температура на поверхности Земли, P_0 - давление на поверхности Земли, α - коэффициент теплового расширения, β - коэффициент сжимаемости. Величины α и β для горных пород берутся взяты из книги [Петрунин, 2011].

Величины давлений на различных глубинах и температур взяты с Аризонского сайта [<https://www.geo.arizona.edu/xtal/geos306/geotherm.htm>].

Величина ускорения свободного падения рассчитывается на основе уравнения:

$$dg = \frac{M \cdot G}{(R_3 - R_i)^2}$$

Где M – масса слоя, R_i – расстояние от центра Земли до i -го слоя с массой M .

$$M = \frac{4}{3} \pi \rho * ((R_3 - R_1)^3 - (R_3 - R_2)^3) \cdot 10^9$$

Где R_1 и R_2 - расстояние от центра Земли до определенного слоя в emc stw-105. 10^9 – коэффициент от перевода километров в метры.

Выводы по главе 4. В ходе данной работы был написан код программы, осуществляющей решение уравнения Навье-Стокса в двухмерном случае, состоящего из двух уравнений количества движения, дополненного уравнением непрерывности. Для численного решения полученной системы уравнений использован алгоритм, который имеет название SIMPLE.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы, полученные в ходе работы:

1. Основываясь на данных сейсмических каталогов и на данных сейсмической томографии, можно отследить изменение глубины погружения слэба вдоль всей дуги. Вблизи Командорских островов субдукция практически отсутствует, здесь же, на границе Тихоокеанская плита-желоб, преобладают механизмы очага типа сдвига. Совокупность этих двух факторов говорит о том, что Тихоокеанская плита движется субпараллельно Алеутской дуге в области Командорских островов.
2. Было показано, что по мере движения вдоль дуги с запада на восток, начиная с Командорских островов - глубина отсечки сейсмичности растет от отсутствующей субдукции вблизи Командорских островов, до слэба глубиной ~350 км вблизи Лисьих островов. При этом, меняется и угол, под которым Тихоокеанская плита пододвигается под желоб. Причем, оказывается, что глубина погружения слэба прямо пропорциональна величине нормальной компоненты скорости движения Тихоокеанской плиты (нормальной к оси желоба). И имеет вид:

$$h = 5,99u + 10,134 \pm 44,68 \text{ км}, \quad R^2 = 0,9911, \quad \sigma = 44,68 \text{ км},$$

где h - глубина отсечки сейсмичности для слэба, u – нормальная к оси желоба компонента скорости движения Тихоокеанской плиты.

3. Скорость движения желоба Тонга примерно в 2 раза превышает величину скорости Тихоокеанской плиты, при этом направление их взаимного движения встречное. И именно в этой части дуги наблюдается картина слэба, при которой он не сразу погружается в среднюю мантию на границе 660км, а некоторое время движется вдоль этой границы. Исследованное в ходе данной работы землетрясение 19.08.2018 г., $MW = 8.2$, $h = 600$ км и его афтершоки хорошо очертили ту часть плиты, которая движется вдоль указанной выше границы. В свою очередь, южнее скорость движения желоба ниже и движется он против движения Тихоокеанской плиты. Как следствие - плита не переходит в субгоризонтальное положение, а просто продолжает погружение под подошву верхней мантии.
4. Из всего сказанного выше можно сделать вывод, что направление и скорость взаимного движения желоба и пододвигающейся под него плиты играют немаловажную роль в формировании слэба, глубине зоны отсечения сейсмичности и типе напряженного состояния среды в окрестности места соприкосновения набегающей и пододвигающейся плит.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Лутиков А.И., Рогожин Е.А., Донцова Г.Ю., **Жуковец В.Н.**, Сильное глубокофокусное землетрясение 19.08.2018 Г. ($MW = 8.2$) к западу от островов Тонга в контексте развития наших представлений о глубоких землетрясениях // Физика Земли, 2021, №2, <https://doi.org/10.31857/S0002333721020034>
2. Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Донцова Г.Ю., **Жуковец В.Н.**, Землетрясение 17.07.2017 г., $MW = 7.8$ вблизи Командорских островов его тектоническая позиция и геодинамическая обстановка // Физика Земли, 2019, №4, <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019472-88>
3. Лутиков А.И., Рогожин Е.А., Донцова Г.Ю., **Жуковец В.Н.**, Землетрясение 17.07.2017 г., $Mw = 7.8$ вблизи Командорских островов и сильные сейсмические проявления в западном сегменте Алеутской островной дуги // Вулканология и сейсмология, 2019, №2, <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019252-66>

Публикации в сборниках и материалах конференций:

1. **Жуковец В.Н.**, Численное решение уравнений Навье-Стокса // В книге: Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов и программа конференции. 2020. С. 26.
2. **Жуковец В.Н.**, Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Донцова Г.Ю., Изучение землетрясения 17.07.2017 $MW=7.8$, геодинамика региона, введение в тектонику Алеутской дуги // В книге: Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов и программа конференции. 2019. С. 36.

Подписано в печать __. 07.2022 г.
Формат 64×84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.

Тираж 100 шт. Заказ №__

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1
Тел./факс: (499) 254 90 88