



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ЭФА

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Прогноз землетрясений по спутниковым снимкам»

Исполнитель Колосова Дарья Олеговна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Федосеева Наталья Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой


(подпись)

Кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

«03» 06 2024 г.

Санкт-Петербург

2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ: ПРИРОДА И МЕХАНИЗМЫ	5
1.1 Компоненты литосферы.....	7
1.2 Сейсмологические приборы.....	11
1.3 Классификация землетрясений	12
1.3.1 Тектонические землетрясения.....	14
1.3.2 Вулканические землетрясения	15
1.3.3 Моретрясения	17
1.3.4 Обвальное-провальные землетрясения	18
1.3.5 Антропогенные землетрясения	20
1.4 Интенсивность и магнитуда.....	22
1.5 Сейсмические волны.....	24
2. ОБЛАЧНЫЕ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ	26
2.1 Классификация ОСТИ.....	30
2.2 Метод прогнозирования землетрясений по ОСТИ.....	34
2.3 Метод прогнозирования магнитуды землетрясений по ОСТИ	37
3. ФОРМИРОВАНИЕ АРХИВА СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ОБЛАЧНОСТИ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ И ПРОГНОЗ МАГНИТУДЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ОБЛАЧНЫМ ИНДИКАТОРАМ	38
3.1 Статистический анализ результатов	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	48
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	49

ВВЕДЕНИЕ

Согласно определению Всемирной метеорологической организации (ВМО), землетрясение – это естественное явление, вызванное внезапным разрывом и смещением литосферных плит в земной коре, зачастую в ее верхней мантии, сопровождающееся мощным выделением энергии в виде сейсмических волн, которое влечет за собой непоправимый ущерб инфраструктуре и угрозу жизни людей, провоцируя и другие, не менее разрушительные опасные и даже катастрофические явления, такие как оползни и цунами.

Однако в последние десятилетия научное сообщество обращает все большее внимание на разработку эффективных методов и подходов к прогнозированию и мониторингу землетрясений для минимизации их негативного воздействия. Одним из ведущих исследований в этой области является анализ облачных систем сейсмотектонических индикаторов (ОСТИ) как возможных предвестников землетрясений. Линейные облачные аномалии, а также изменения в их структуре или поведении, могут быть связаны с предшествующими землетрясениям процессами.

Исследования в данной области могут поспособствовать усовершенствованию уже существующих или разработке новых методов прогнозирования для снижения рисков и потерь при землетрясениях, а также найти прямое применение в системах мониторинга и управления чрезвычайными ситуациями.

Целью данной работы является изучение и подробный анализ облачных сейсмотектонических индикаторов для их дальнейшего использования в качестве инструмента для прогнозирования землетрясений.

В соответствии с поставленной целью, был сформирован следующий ряд задач:

1. Сформировать архив и систематизировать данные о наблюдениях сейсмической активности при помощи электронного ресурса WORLDVIEW EOSDIS;
2. Осуществить оценку метода анализа облачных данных с целью выявления взаимосвязи ОСТИ (облачными сеймотектоническими индикаторами) и грядущими землетрясениями;
3. Провести статистический анализ результатов и провести оценку эффективности метода прогнозирования землетрясений;
4. Сформулировать выводы о возможности использования ОСТИ (облачных сеймотектонических индикаторов) в качестве дополнительного инструмента для прогнозирования и мониторинга землетрясений.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ: ПРИРОДА И МЕХАНИЗМЫ

Землетрясения представляют собой одно из наиболее изученных явлений в области геологии и геофизики. Механизм формирования землетрясений основан на высвобождении огромного количества энергии в виде сейсмических волн, накопленной в земной коре, в результате тектонических процессов. Изучением землетрясений и сейсмических волн входит в сферу изучения науки, называемой сейсмологией (от греч. «seismos» – трясение, «logos» – учение).

Твердая оболочка Земли, или литосфера, представляет собой неоднородный слой земной коры и верхней части мантии, который состоит из относительно стабильных и подвижных областей (см. рис 1.1). [1]

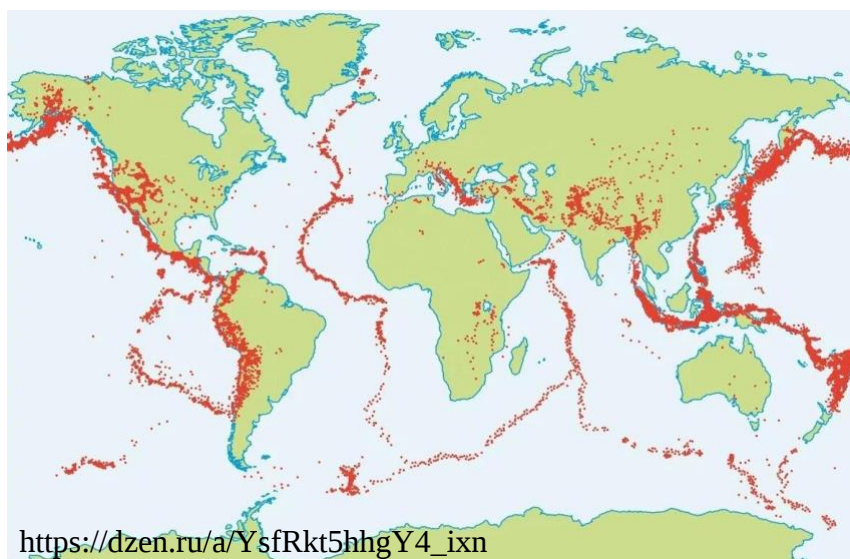


Рисунок 1.1 – Зоны современных землетрясений и активных вулканов

«Землетрясения могут происходить на разломах – плоскостях разделения литосферных плит, где блоки расходятся относительно друг друга. Место на земной поверхности, которое находится прямо над областью начала землетрясения под землей (гипоцентром), называется эпицентром землетрясения. А место с сильными толчками и наибольшими разрушениями – плейстосейсмовой зоной» (см. рис. 1.2).

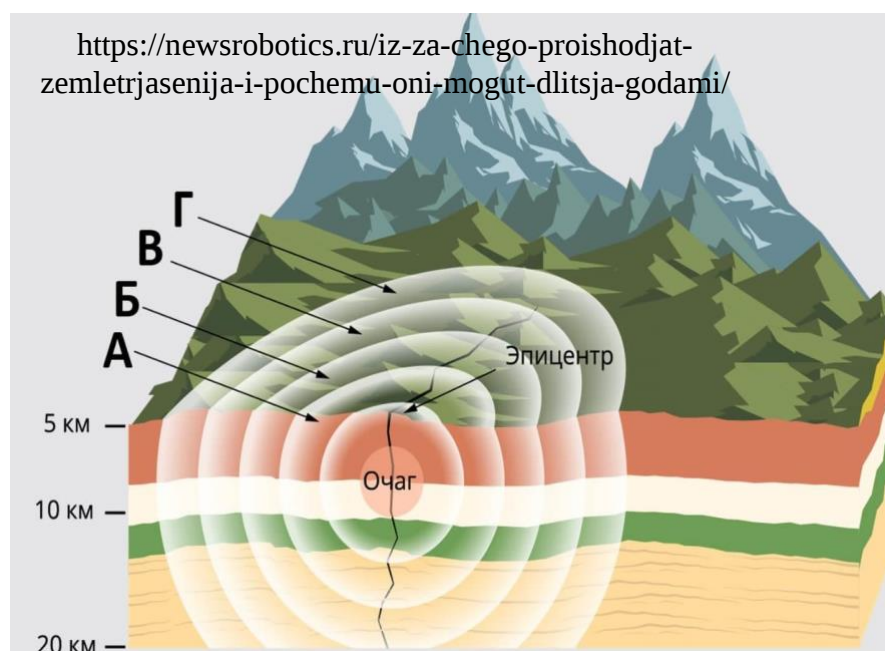


Рисунок 1.2 – Схема очага и эпицентра землетрясения

Толчки землетрясений делятся на три фазы: предшествующие, основные и последующие. Перед основным импульсом может происходить серия более мелких подземных, которые являются сигналом предупреждения о приближающемся сильном толчке. Основной толчок землетрясения обычно имеет наибольшую по силе магнитуду и является самым разрушительным из всей серии импульсов землетрясения. За основным толчком возникают последующие, продолжительность и сила которых напрямую зависит от основного толчка, таким образом последующие землетрясения могут фиксироваться в течение нескольких дней или даже недель или месяцев, а также вызывать дополнительные разрушения. [1]

Эти динамические процессы возникают за счет действия внутренних сил Земли, т.к. температура в ее недрах очень высокая, что приводит к частичному расплавлению твердых элементов, из которых состоит планета, формируя жидкую мантию. Сама мантия постоянно подвержена движению, которое вызывает дрейф литосферных блоков и участки с повышенной сейсмической активностью. Также на сейсмоактивность могут влиять и другие факторы, такие как тип климата

и даже количество осадков. Например, наиболее чувствительными к землетрясениям являются регионы с тропическим и морским типом климата, в то время как регионы с умеренным климатом. обычно находятся в более безопасной зоне. [1]

1.1 Компоненты литосферы

К относительно стабильным областям принадлежат литосферные плиты, которые медленно перемещаются в результате конвекционных потоков мантии на ее более вязком и пластичном слое – астеносфере. Всего на нашей планете насчитывается около 20 таких блоков, 6 из которых принято считать крупными: Американская, Тихоокеанская, Индо-Австралийская, Евразийская, Африканская и Антарктическая плиты. Считается, что толщина литосферных блоков может изменяться от 5 до 10 километров в океанах, а под горными системами и хребтами до 70 километров и более, тем самым определяя физическую структуру земной поверхности. Каждая из плит находится в постоянном движении со скоростью примерно 1 – 6 см в год, ввиду этого между границами плит происходят расхождения, сдвиги, трения и даже столкновения, образуя складчатые пояса (см. рис. 1.3). [2]



Рисунок 1.3 – Смещения земной коры

Складчатые или орогенные пояса относят к подвижной области твердой оболочки Земли. Они представляют собой совокупность геологических структур, в результате процесса коллизии – деформации в результате столкновения континентальных литосферных блоков или субдукции – возвышения континентальной плиты над океанической, вызывая процесс аккреции – приращения геологического материала океанической плиты на границе континентальной.

Для данных относительно стабильных и подвижных областей характерна интенсивная деформация литосферы, которую делят на три фазы:

1. Ранняя стадия определяется началом столкновения плит и искажения геологического материала;
2. Стадия кульминации происходит при максимальной деформации, что ведет к складкообразованию и поднятию, например, горных массивов;
3. Завершающая стадия наступает в результате замедления предыдущих процессов, происходит эрозия и выравнивание гор.

На нашей планете выделяют две обширные зоны с повышенной сейсмоактивностью – Тихоокеанский и Средиземноморско-Трансазиатский сейсмические пояса –, которая простирается на тысячу километров по территориям континентов и океанского дна (см. рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Сейсмоопасные районы мира

Тихоокеанский складчатый пояс располагается на дне самого большого на планете Тихого океана, прилежащие горные системы и территории, также принято считать, что эта зона сейсмоактивности наиболее опасна. Сам пояс делят на несколько орогенных областей: «Восточная часть считается наиболее обширной и включает в себя такие территории как Камчатка, Алеутские острова и прибрежную линию Северной и Южной Америки. Северная часть, хоть и имеет меньшую площадь, характеризуется повышенной сейсмической активностью, охватывая Калифорнию и территории Центральной и Южной Америки. Западная часть начинается в районе Камчатки, простираясь дальше на восток, включая в себя Японию и другие отдаленные регионы». Также необходимо учитывать и наличие второстепенных складчатых поясов, которые располагаются в восточной половине планеты примерно от Филиппин до Антарктиды. Опасность их расположения заключается в том, что в этих зонах, ввиду динамических процессов в литосфере возникают такие процессы, как землетрясения, цунами и наводнения на близлежащих территориях. [2][3]

«В 1950 году ученые обнаружили сейсмическую зону в Атлантическом океане. Этот регион начинается у берегов Гренландии, проходит недалеко от Средне-Атлантического хребта и заканчивается около архипелага Тристан- да-Кунья. Причиной сейсмической активности здесь являются молодые разломы Срединного хребта, так как движения литосферных плит продолжаются и по сей день».

Орогенный второстепенный пояс в Индийском океане расположен на территории от Аравийского п-ова и до берегов Антарктиды. Он напрямую связан с Срединным Индийским хребтом, где происходят незначительные толчки и извержения подводных вулканов, ввиду нескольких тектонических разломов (см. рис. 1.5). [4]

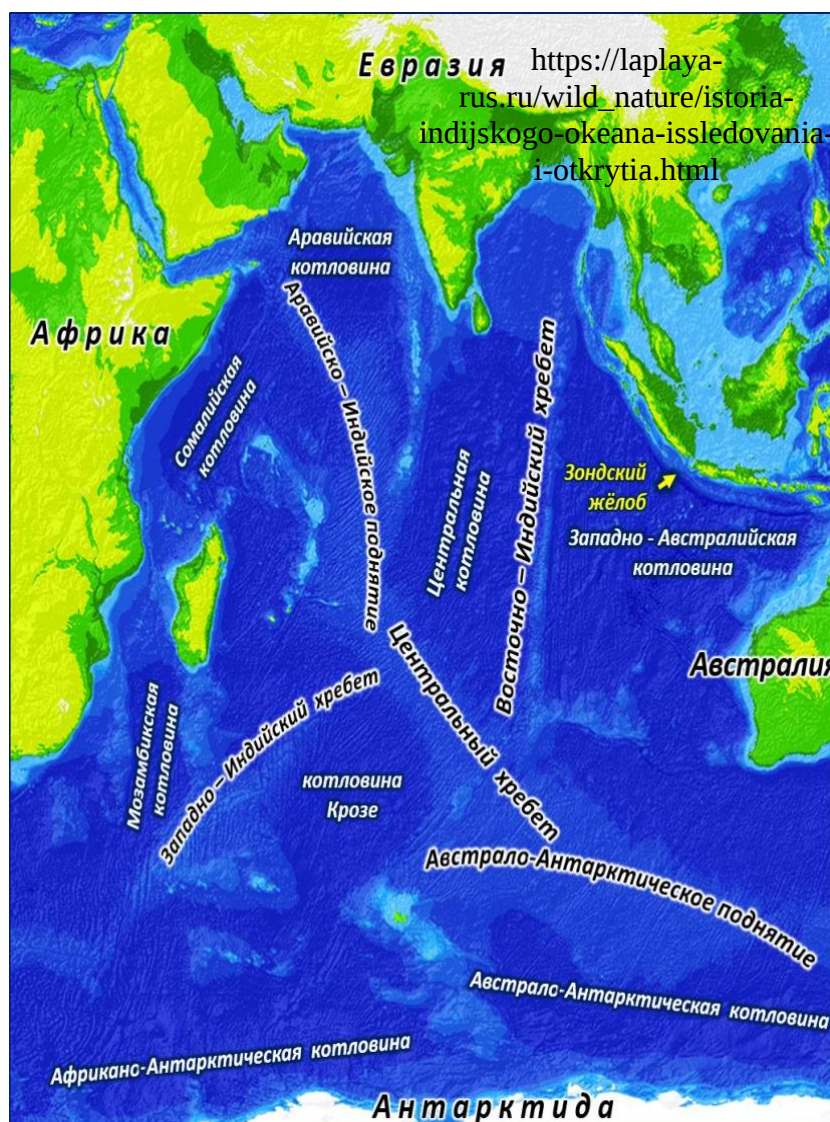


Рисунок 1.5 – Подводные хребты Индийского океана

Сейсмические пояса находятся в тесной взаимосвязи с подводным рельефом. Восточно-Африканский пояс простирается вдоль восточного побережья Африки, в то время как другой пояс простирается к Мозамбикскому проливу. Океанические котловины, в отличие, не обладают сейсмической активностью. В зоне Арктики наблюдается значительная сейсмическая активность, включая землетрясения, извержения грязевых вулканов и другие деструктивные процессы. Специалисты следят за основными очагами землетрясений в этом регионе. Некоторые люди могут ошибочно считать, что сейсмическая активность здесь невелика, но это не соответствует действительности. При планировании деятельности в этом регионе важно всегда оставаться бдительным и готовым к различным сейсмическим событиям. Сейсмическая активность в Арктическом бассейне обусловлена присутствием хребта Ломоносова, который является продолжением Срединно-Атлантического хребта. Кроме того, землетрясения также характерны для материкового склона Евразии и иногда встречаются на севере Северной Америки. В настоящее время заметно возникновение землетрясений в регионах, где они ранее не были характерны. Это происходит из-за того, что Земля вступает в новый цикл климатических катаклизмов к концу 2024 года. [4] [5]

1.2 Сейсмологические приборы

Сейсмограф – прибор, фиксирующий колебания в земной коре, вызванные сейсмическими волнами, которые движутся сквозь земную поверхность от их источника. Простая сейсмограмма – схема, полученная в результате близкого по отношению к местоположению и небольшого землетрясения, отображающая появление различных видов сейсмических волн: «Р-волн (продольных, вибрирующих в направлении распространения), S-волн (поперечных, колеблющихся под прямым углом

к направлению распространения) и поверхностных волн (волн, которые распространяются по поверхности)». В случае дальних или сильных землетрясений картина сейсмограммы более сложна из-за разнообразия сейсмических волн, которые могут отражаться или преломляться в земной коре перед достижением сейсмографа. Связь между временем прибытия различных волн и расстоянием до эпицентра землетрясения выражается на временно-постоянной кривой, где время прихода волн отображается по вертикальной оси, а расстояние до эпицентра - по горизонтальной. Путем сравнения времени прибытия волн с данными стандартных кривых времени-расстояния на сейсмограмме, можно определить расстояние от эпицентра до станции сейсмографа. (см. рис. 1.6). [6]

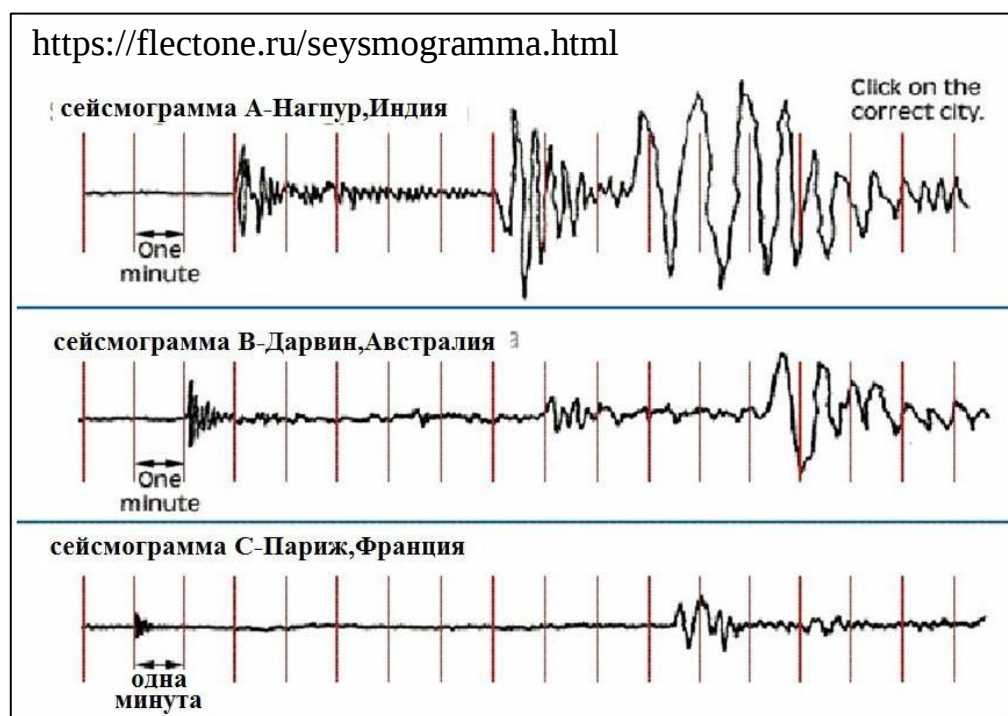


Рисунок 1.6 – Пример сейсмограмм

1.3 Классификация землетрясений

Существует несколько видов землетрясений, включая вулканические процессы, которые являются одной из их разновидностей. Они возникают из-за напряжения в недрах земли, где магма и вулканические газы, стремясь выбраться наружу, давят на поверхность. Эти сейсмические события могут быть слабыми, но продолжительными и

могут служить предвестниками начала извержения вулкана, но обычно не представляют опасности для населения. Техногенные землетрясения связаны с человеческой деятельностью и могут возникать в результате строительства водохранилищ, добычи нефти и газа или строительства городов.

Техногенные землетрясения связаны с человеческой деятельностью и могут возникать в результате строительства водохранилищ, добычи нефти и газа или строительства городов.

Землетрясения также могут быть вызваны обвалами или оползнями, которые происходят при перемещении земной поверхности под воздействием гравитационной силы, обычно они не обладают большой мощностью. Деятельность подземных вод иногда может привести к формированию пустот, что может вызвать проседание земной поверхности и сотрясение горных пород. (см. рис. 1.7). [7]

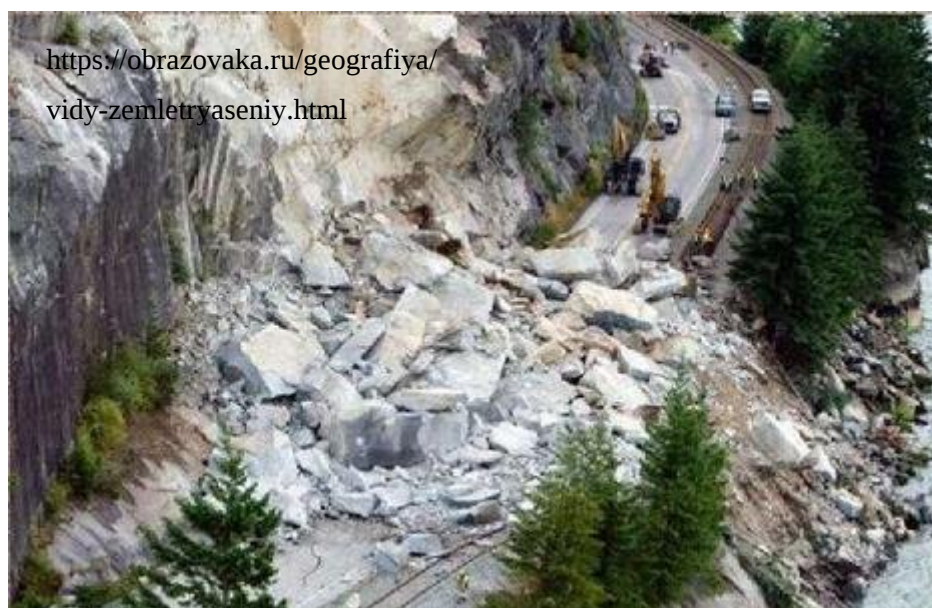


Рисунок 1.7 – Пример обвала

Искусственные землетрясения могут быть вызваны подземными взрывами, такими как испытания ядерного оружия, которые могут иметь огромную мощность. [7]

1.3.1 Тектонические землетрясения

«В местах тектонических разломов, где силы сжатия или растяжения оказываются на границы плит, накапливается напряжение в горных породах. Это продолжается до тех пор, пока силы не превысят прочность горных пород, что приводит к их разрушению и резкому смещению относительно друг друга. Такие смещения и называются тектоническими подвижками, а места их возникновения – очагами землетрясений».

Например, после Кумдагского землетрясения 1983 года в Западном Туркменистане протяженность системы разломов достигала 27 километров. Тектонические подвижки могут иметь различную пространственную ориентацию, приводя к резкому опусканию, поднятию или смещению относительно друг друга огромных массивов горных пород. В результате таких подвижек на поверхности могут образовываться протяженные тектонические трещины, вдоль которых происходит смещение участков земной поверхности, находящихся на разных сторонах трещин, включая здания и инженерные сооружения. Эти процессы не ограничиваются только видимыми разломами на границах литосферных плит, но также могут происходить в их центральных областях, под горами и складками. «Формы этих подвижек могут быть разнообразными: некоторые вызывают протяженные разломы на поверхности, другие сопровождаются обвалами и оползнями, а третьи остаются невидимыми и могут быть обнаружены только с помощью специальных приборов. Некоторые землетрясения, такие как те, что происходят в Армении, Апеннинах в северной Италии, в Алжире, Калифорнии (США), Туркменистане и других регионах, связаны с невидимыми разломами под землей, которые не проявляются на поверхности. В терминологии американских сейсмологов Р. Стейна и Р. Йетса они получили название скрытых тектонических землетрясений». [8]

Вблизи Вентуры в Калифорнии находится одна из наиболее динамичных геологических областей с высоким уровнем сейсмической активности. В этом районе были зафиксированы землетрясения в 1983 и 1985 годах в Коалинге и Кетлемен-Хилзе соответственно, с магнитудами 6,5 и 6,1 по шкале Рихтера. Эти события привели к разрушению 75% непригодных к землетрясениям зданий в Коалинге. Еще одно землетрясение в 1987 году с магнитудой 6 в Уиттиер-Нерроуз ударило по плотно заселенным пригородам Лос-Анджелеса, причинив ущерб на сумму 350 миллионов долларов США и унесло восемь человеческих жизней. Аналогичные геологические условия в предгорьях Копетдага были причиной Ашхабадского катастрофического землетрясения 1948 года, в результате которого погибли около 40 000 человек. В 1980 году в Эль-Аснаме (Алжир) землетрясение с магнитудой 7,3 забрало жизни трех с половиной тысяч человек. Существование потенциально опасных зон, подверженных скрытым землетрясениям, представляет угрозу для развития территорий, которые обычно считаются безопасными, и на которых располагают могильники и захоронения токсичных отходов, например, в окрестностях Коалинга в США. Недооценка сейсмической угрозы в таких районах может привести к разрушению хранилищ и вызвать экологическую катастрофу. Часть тектонических землетрясений происходит как под водой, так и на суше, и некоторые из них сопровождаются разрушительными цунами. Сейсмические волны от таких землетрясений, с эпицентрами в морях и океанах, могут также вызывать разрушения на суше, как это было в Мехико в 1985 году, а также часто происходит в Японском архипелаге, Сахалине и островах Курильской гряды. [8]

1.3.2 Вулканические землетрясения

Тектонические и вулканические землетрясения проявляются похожим образом, однако имеют различные масштабы и область их

распространения. Так, например, землетрясения слабой и сильной интенсивности могут быть вызваны не только активностью литосферных плит, а также вулканической деятельностью. Подземные толчки такого типа землетрясений обусловлены давлением раскаленных газов на верхние слои Земли. Эти импульсы зачастую предшествуют самому извержению вулкана, образуя серию из нескольких небольших толчков, которое называют «вулканическим дрожанием». Такой процесс может осуществляться в течение длительного времени достигая временной протяженности в целое столетие. Перемещение раскаленной магмы в недрах вулкана создает ряд различных явлений, таких трещины в горных породах, а также взрывы пара и газа, которые, в свою очередь вызывают сейсмические и акустические колебания (см. рис. 1.8). [9]

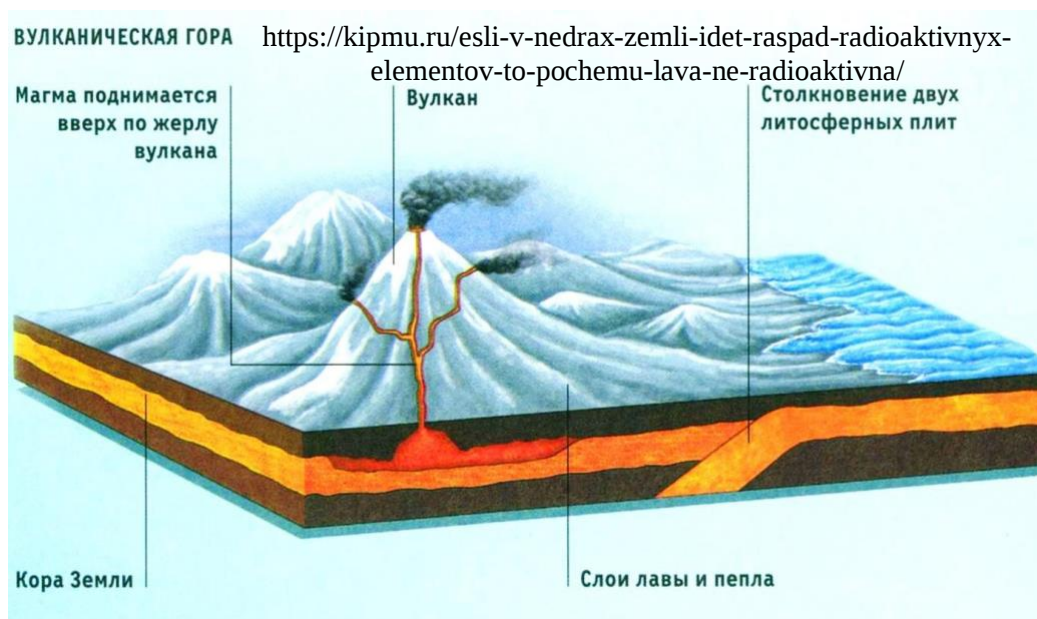


Рисунок 1.8 – Схема вулканического землетрясения

Ученые в области сейсмологии пришли к выводу, что магнитуда вулканических землетрясений значительно меньше тектонических, но даже при таком условии они способны нанести непоправимый ущерб. Также был разработан метод прогнозирования извержений вулкана, основанный на изучении и регистрации изменений в местности ввиду землетрясений при помощи спутниковых наблюдений.

Вулканические землетрясения регистрируются, например, на территории Камчатки, обусловленные активностью таких вулканов, как Ключевская сопка, Шивелуч и др. Они также фиксируются и на территории Европы – извержение вулкана Этна на Сицилии, которые многократно просыпался и извергался, что сопровождалось микроземлетрясениями на прилежащих территориях.

В районах с активными и потенциально активными вулканами необходимо постоянно наблюдать их состояние и сейсмическую активность для предотвращения чрезвычайных ситуаций. [9]

1.3.3 Моретрясения

Одним из распространенных видов землетрясений являются сильные волновые колебания поверхности морей, океанов и других водных объектов, более известные как моретрясения. Природа моретрясений схожа с тектоническими и вулканическими землетрясениями. Интересный факт – волны при моретрясениях по своим характеристикам могут напоминать ветровые, однако их происхождение связано с сейсмической активностью. А иногда при особенно мощных тектонических сдвигах могут образовываться волны катастрофического масштаба – цунами.

Из-за особенностей воды, которая неспособна быстро сжиматься при землетрясении или взрыве, происходит необычное явление. Столб воды, подвергнутый воздействию своей собственной тяжести, смещается, не успевая разойтись. Это создает на поверхности воды либо возвышение, либо понижение, вызывая колебательные движения соседних водных масс - гравитационные волны цунами. Характеристики и разрушительная сила цунами существенно отличаются от обычных волн. Скорость их распространения может достигать от 50 до 800 км/ч и уменьшается по мере приближения к берегу. Расстояние между гребнями цунами может варьироваться от 5 до 1000 км, что делает невозможным визуально

обнаружить несколько цунами одновременно. Приближение цунами обычно сопровождается внезапным отливом, резким понижением уровня воды и мощной воздушной волной, двигающейся впереди цунами. Появление этих признаков означает, что время находится врасплох, и необходимо немедленно покинуть берег. [10]

Обнаружить цунами вдали от берега не так просто, поскольку высота волны достигает катастрофических масштабов только при приближении к нему, вырастая до 10-15 метров высотой. Например, в узких бухтах и гаванях ее высота может быть около 40-50 метров, нанося ужасающий ущерб всему, что лежит на ее пути (см. рис 1.9).

https://studopedia.net/20_48889_ekologicheskaya-otsenka-zemletryaseniy.html

Магнитуда и высота головной волны цунами (по Болту Б. А. и др., 1978)		
Магнитуда землетрясения	Магнитуда цунами	Максимальная высота головной волны цунами, м
6.0	Незначительная	—
6.5	– 1	0.5—0.75
7.0	0	1.0—1.5
7.5	1	2.0—3.0
8.0	2	4.0—6.0
8.5	3	8.0—12.0

Рисунок 1.9 – Магнитуда цунами

Чем глубже эпицентр землетрясения, тем ниже сила цунами. При этом можно рассчитать предельную магнитуду первоисточника Цунами по формуле:

$$M = 7,7 + 0,008 h, \quad (1)$$

где: М – магнитуда, h – глубина очага землетрясения в километрах.

[10]

1.3.4 Обвальнo-провальнoе землетрясение

В районах, где преобладают известняковые породы, таких как, например, юго-запад Германии, а также в других местах, периодически фиксируются слабые землетрясения. Эти явления связаны с наличием

карстовых образований - подземных полостей, образованных подземными водами, которые вымывают известняковые породы. Под воздействием давления верхних слоев земли, эти полости могут обрушиться, что вызывает землетрясения. Иногда за первоначальным толчком могут последовать дополнительные удары через несколько часов или дней (см. рис. 1.10). [11]

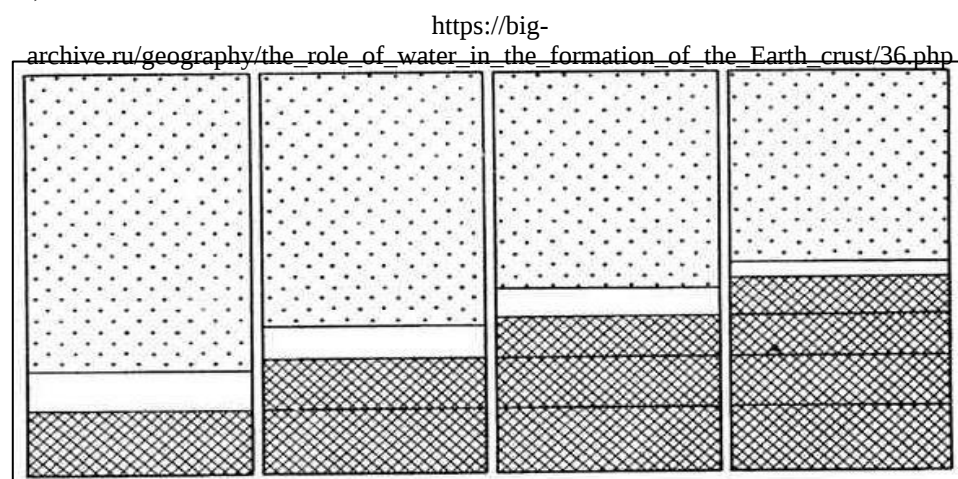


Рисунок 1.10 – Схема многотолковых землетрясений обвального типа

Обусловлено это тем, что первичное сотрясение провоцирует обвал пород в других источниках, где наблюдается ее ослабление. Эти явления известны как обвальные или карстовые землетрясения (см. рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Пример последствий обвального землетрясения

«Обвальные землетрясения могут быть вызваны обрушением горных пород, провалами и просадками грунта. Чем больше масса обвалившейся породы и высота обвала, тем сильнее удар и, следовательно, магнитуда землетрясения. Такие обвалы могут происходить как в результате естественных, так и техногенных факторов». Например, недостаточный сток воды может привести к размыванию оснований сооружений, а вибрации и взрывные работы при земляных работах могут привести к образованию пустот. При добыче калийных солей подземным способом на рудниках также могут формироваться карстовые образования. Обрушение свода этих полостей может привести к образованию воронок на поверхности, сопровождаемых землетрясениями. С момента начала промышленной добычи калийных солей были зарегистрированы сотни аварий на месторождениях в различных странах, включая США, Канаду, Францию, Германию и Россию. [11]

1.3.5 Антропогенные землетрясения

«Антропогенные землетрясения происходят вследствие воздействия человека, например, при добыче полезных ископаемых, строительстве водохранилищ, инъекции флюидов и прочих деятельности. В этих случаях геологические нарушения происходят из-за вмешательства человека в естественные процессы, происходящие на планете» (см. рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Пример последствий антропогенного землетрясения

Одним из наиболее активных районов, где происходят антропогенные землетрясения в России, являются территории Западной Сибири и Предуралья, где осуществляется добыча значительных запасов полезных ископаемых. При разработке этих ресурсов формируются глубокие карьеры, шахты, терриконы и другие изменения, способные вызвать землетрясения. Однако такие события могут происходить не только в указанных районах, но и в равнинных местностях, а также в зонах пересечения разломов.

Наиболее подверженные землетрясениям являются участки В Тихоокеанском поясе, тянущемся вдоль берегов Тихого океана, и в Альпийском поясе, простирающемся от Индонезии до Средиземного моря. По статистике, около 90% всех землетрясений на планете происходят именно в Тихоокеанском поясе.

Для предотвращения антропогенных землетрясений необходимо тщательное планирование и выполнение строительных работ. Например, при создании крупных водохранилищ необходимо учитывать потенциальные риски землетрясений и принимать соответствующие меры безопасности для защиты населения. [12]

Помимо причин возникновения, землетрясения можно разделить на три группы в зависимости от глубины очага (см. рис. 1.13).

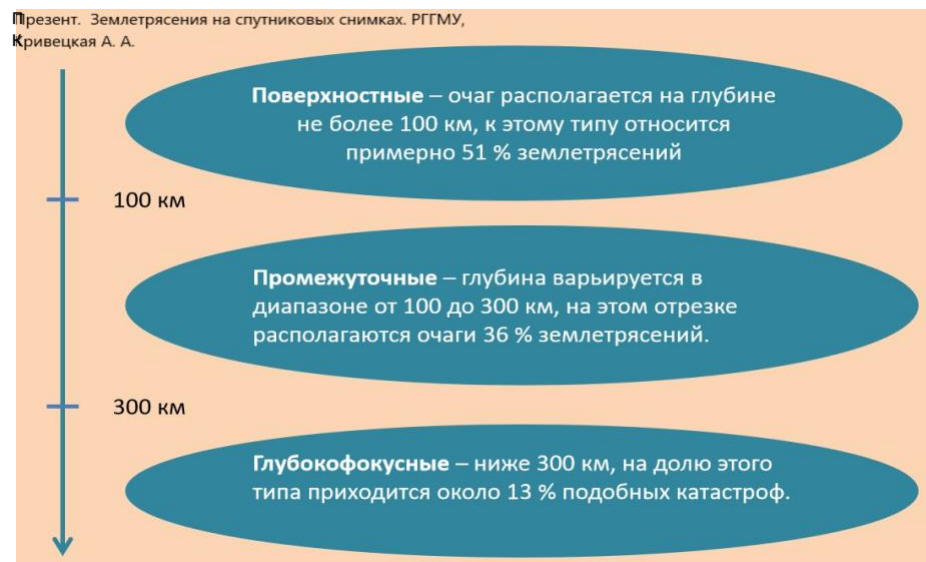


Рисунок 1.13 – Классификация землетрясений по глубине их очага

1.4 Интенсивность и магнитуда

Каждый год на Земле фиксируется несколько сотен тысяч землетрясений, и их последствия могут варьироваться от неощутимых до крайне разрушительных. Интенсивность землетрясений оценивается двумя способами:

- 1) по визуальному воздействию;
- 2) по измерению физических параметров, таких как магнитуда.

Визуальная оценка интенсивности землетрясения основывается на его влиянии на землю, включая разрушения зданий, изменения в ландшафте и восприятие людьми во время землетрясения. Эта интенсивность выражается в баллах. «Существует несколько шкал для измерения силы землетрясений. Первую шкалу предложили М. Росси и Ф. Форель в 1883-1884 годах, оценивая интенсивность от 1 до 10 баллов. В 1902 году в США была разработана более детализированная 12-балльная шкала, известная как шкала Меркалли, названная в честь итальянского вулканолога. Сегодня эта шкала, с некоторыми изменениями, используется сейсмологами в США и других странах. В России и некоторых европейских странах применяется международная 12-балльная шкала MSK-

64, названная по первым буквам фамилий её создателей (Медведев, Шпонхойер, Карник) (см. рис. 1.14). [13]

Интенсивность по (MSK-64) https://popovgeo.sfedu.ru/lecture_17	
баллы	Степень воздействия
1 – 3	Слабые, ощущаются только приборами
4 – 5	Ощутимые
6 – 7	Сильные (разрушаются ветхие постройки)
8	Разрушительные (частично разрушаются прочные здания)
9	Опустошительные (разрушается большинство зданий)
10	Уничтожающие (разрушаются почти все здания, возникают оползни и обвалы)
11	Катастрофические (разрушаются все постройки, происходит изменение ландшафта)
12	Губительные (полное разрушение, изменение рельефа местности на обширной площади)

Рисунок 1.14 – Шкала MSK-64 (с упрощениями)

Согласно этой шкале, землетрясения классифицируются как слабые, если они оцениваются от 1 до 4 баллов, как сильные - от 5 до 7 баллов и как сильнейшие - более 8 баллов».

Хотя оценка интенсивности землетрясений, опирающаяся на качественное воздействие землетрясения на поверхность, не позволяет проводить точное математическое определение параметров землетрясения, в 1935 году американским сейсмологом Ч. Рихтером была предложена более объективная шкала, основанная на измерении магнитуды (эта шкала позже стала широко известна как шкала Рихтера) (см. рис. 1.15). [13]

https://www.ridero.ru/books/vse_nauki_4_2022/freText/

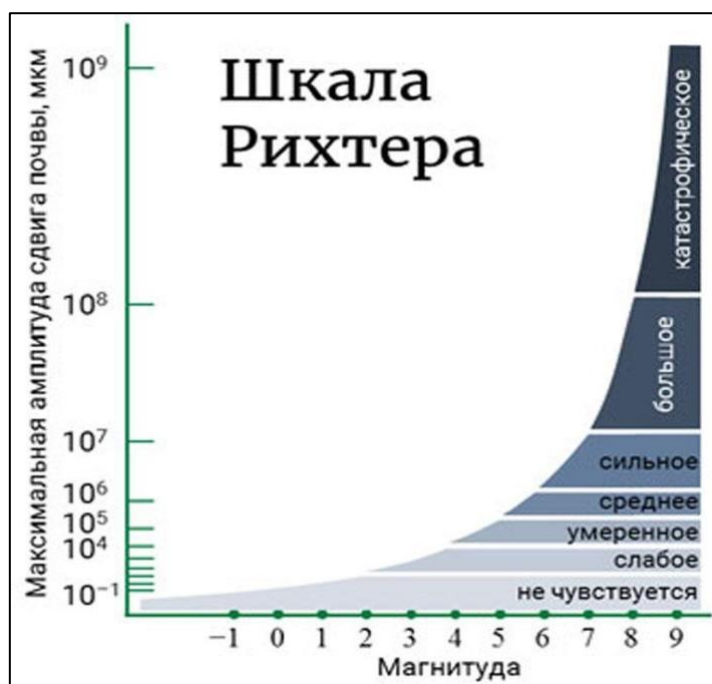


Рисунок 1.15 – Шкала Рихтера

«Магнитуда, согласно определению Ч. Рихтера и Б. Гуттенберга, представляет собой десятичный логарифм максимальной амплитуды сейсмической волны (в тысячных долях миллиметра), записанной стандартным сейсмографом на расстоянии 100 км от эпицентра землетрясения». [13]

1.5 Сейсмические волны

Волна, которая является звуковой энергией, движущейся сквозь земную поверхность, называется сейсмической. Природа ее возникновения связана с различными воздействиями на земную кору – извержениями вулканов, землетрясениями, оползнями и др. Скорость распространения таких волн зависит от свойств горной породы, сквозь которую они проходят.

Существует несколько типов сейсмических волн, которые возникают в результате землетрясений и вызывают деформацию твердой породы путем ее сжатия или растяжения (см. рис. 1.16). [14]

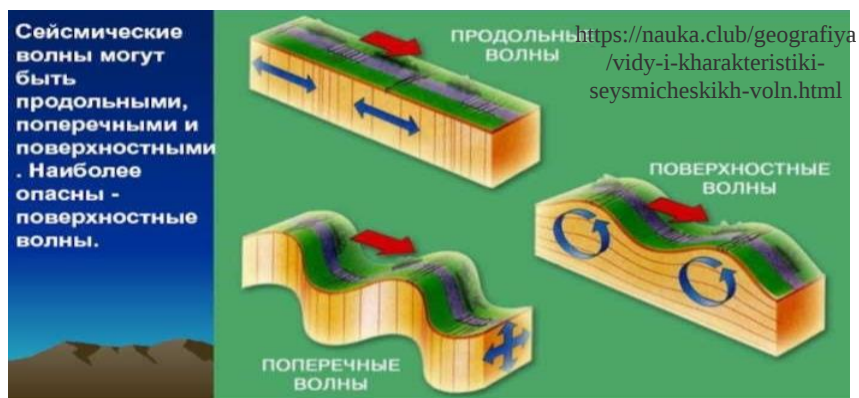


Рисунок 1.16 – Основные виды сейсмических волн

«Один из таких типов – продольные волны, обозначаемые буквой Р. Они также известны как первичные волны, так как они первыми регистрируются сейсмическими станциями во время землетрясений. Продольные волны характеризуются высокой скоростью и обычно увеличиваются по мере углубления к центру планеты. Например, на поверхности Земли их скорость составляет примерно 4-5 км/ч, а в центральной части - 11 км/ч. Их движение схоже с звуковыми волнами и они легко проходят через твердые породы и жидкости. Продольные волны обычно не обладают большой разрушительной силой, но могут вызвать лопание стекол и слышный грохот».

В момент деформации и сдвига твердого тела, возникают поперечные волны (S), скорость которых меньше в 1,7 раз, чем у продольных. Также они не могут распространяться сквозь жидкости, такие как магма и вода в океанах, но даже при этом они способны вызывать значительные повреждения и разрушения. [14]

Кроме продольных и поперечных волн, существуют также поверхностные сейсмические волны, распространяющиеся вдоль поверхности Земли и обычно не проникающие на глубину более 160 км. Они известны как L-волны или длинные волны. Эти волны могут оказывать более значительное воздействие на структуры, чем объемные волны, и их сила снижается с увеличением расстояния от эпицентра землетрясения. Скорость распространения L-волн составляет от 3,2 до 4,4 км/с, и они приходят позже объемных волн. Существуют два основных

типа L-волн: волны Рэлея, вызывающие горизонтальные разрушения, и волны Лява, движущиеся по эллиптической траектории (см. рис. 1.17).

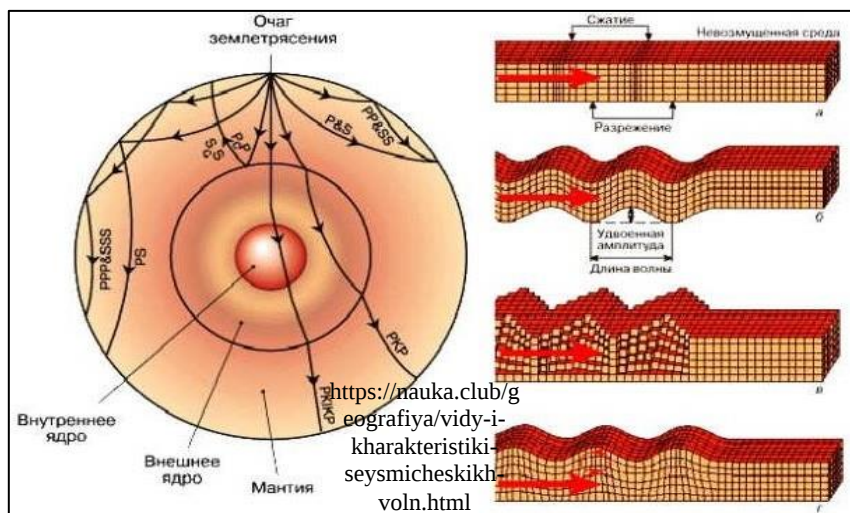


Рисунок 1.17 – Сейсмические волны Рэлея и Лява

P и S волны могут подвергаться отражению и преломлению. Это происходит из-за различий в составе и твердости слоев Земли. Если волны сталкиваются с изменениями в упругости и плотности на своем пути, они могут отразиться обратно к поверхности. Постепенные изменения в этих характеристиках приводят к преломлению волны, а резкие - к отражению, подобно тому, как луч света может ломиться в воде или отражаться от зеркала. [14]

2. ОБЛАЧНЫЕ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ

Атмосферные облака, формирующиеся в результате метеорологических процессов, часто не имеют чётких границ. Однако наличие аномалий привлекло внимание ученых к линейным облачным структурам, обнаруженным на 20 спутниковых снимках, сделанных в первой половине двадцатого века. Проведя анализ этих изображений вместе с картами разломов земной коры, стало ясно, что такие облачные аномалии связаны с геологическим строением, особенно с зонами разломов. Например, над разломом земной коры под Охотским морем была зафиксирована длинная линия перистых облаков, находившихся в верхних слоях атмосферы на высоте 12-14 км. В течение следующих суток на

Курильских островах произошла серия мощных землетрясений, а спустя две недели на острове Матуа началось извержение вулкана (см. рис. 2.18).

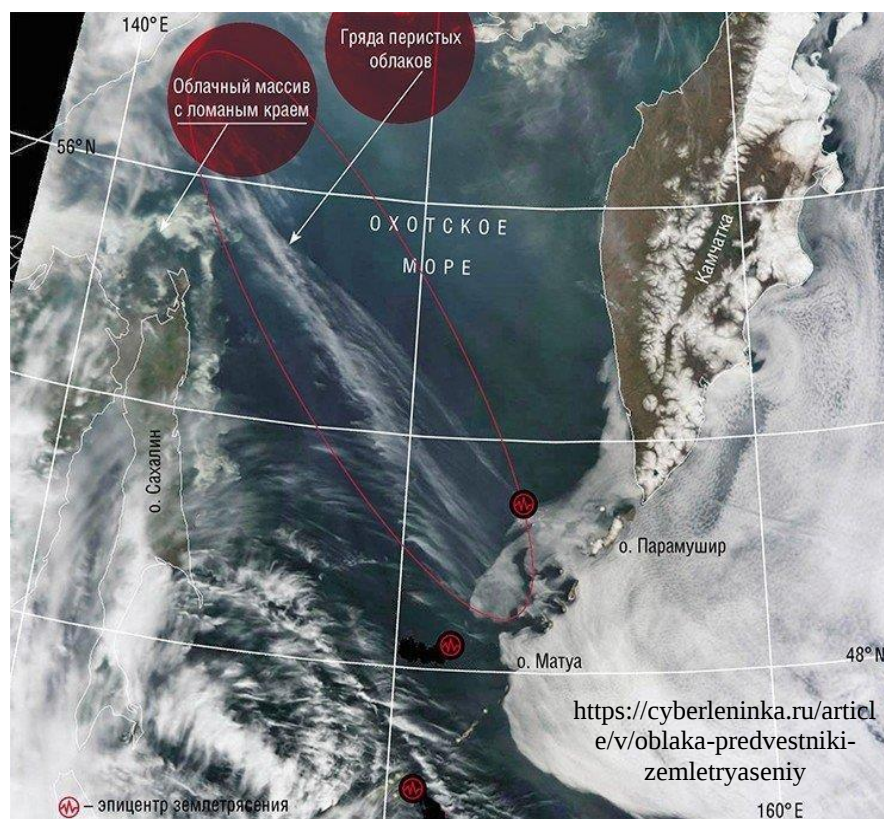


Рисунок 2.18 – Гряда перистых облаков верхнего яруса атмосферы

Согласно спутниковым данным, линейные облачные структуры имеют протяженность в сотни и даже тысячи километров. Далее была зафиксирована еще одна аномалия – размывание облачности над разломом. Такое явление может происходить посредством двух способов:

- образованием узкого просвета, называемого каньоном, в плотном облачном покрове;
- формированием резкой отдельной линейной границы облачного массива, движущегося над разломом.

Было принято объединить все эти облачные структуры под одним общим названием – линейные облачные аномалии (ЛОА).

«Данные явления не могут быть объяснены исключительно атмосферными процессами, поскольку линейные облачные аномалии (ЛОА) коррелируют с геологическими особенностями местности, повторяя

форму разломов земной коры. Однако, несмотря на наличие множества разломов, облачные аномалии проявляются лишь над некоторыми из них. Эти облака появляются и исчезают периодически, оставаясь на небе в течение нескольких минут, часов или даже суток. Это может быть связано с тем, что разломы воздействуют на атмосферу только в периоды тектонической или энергетической активности. Таким образом, линейные облачные аномалии связаны с литосферными процессами, и их появление свидетельствует о начале активности геодинамических процессов». Эти процессы часто предшествуют землетрясениям, что делает наблюдение за линейными облачными аномалиями полезным инструментом для предварительного предупреждения о возможных катастрофах.

Иногда на одном и том же изображении можно увидеть как гряды, так и каньоны, расположенные над разными разломами или участками одного разлома. Это свидетельствует о том, что геодинамическая активность может как способствовать, так и подавлять образование облаков, в зависимости от состояния атмосферы.

Примером таких изменений могут служить снимки циклона, который двигался с суши в зону землетрясения у побережья Японии в марте 2011 года, демонстрирующие изменения в облачности под воздействием излучения от разлома (см. рис. 2.19). [15, 16]

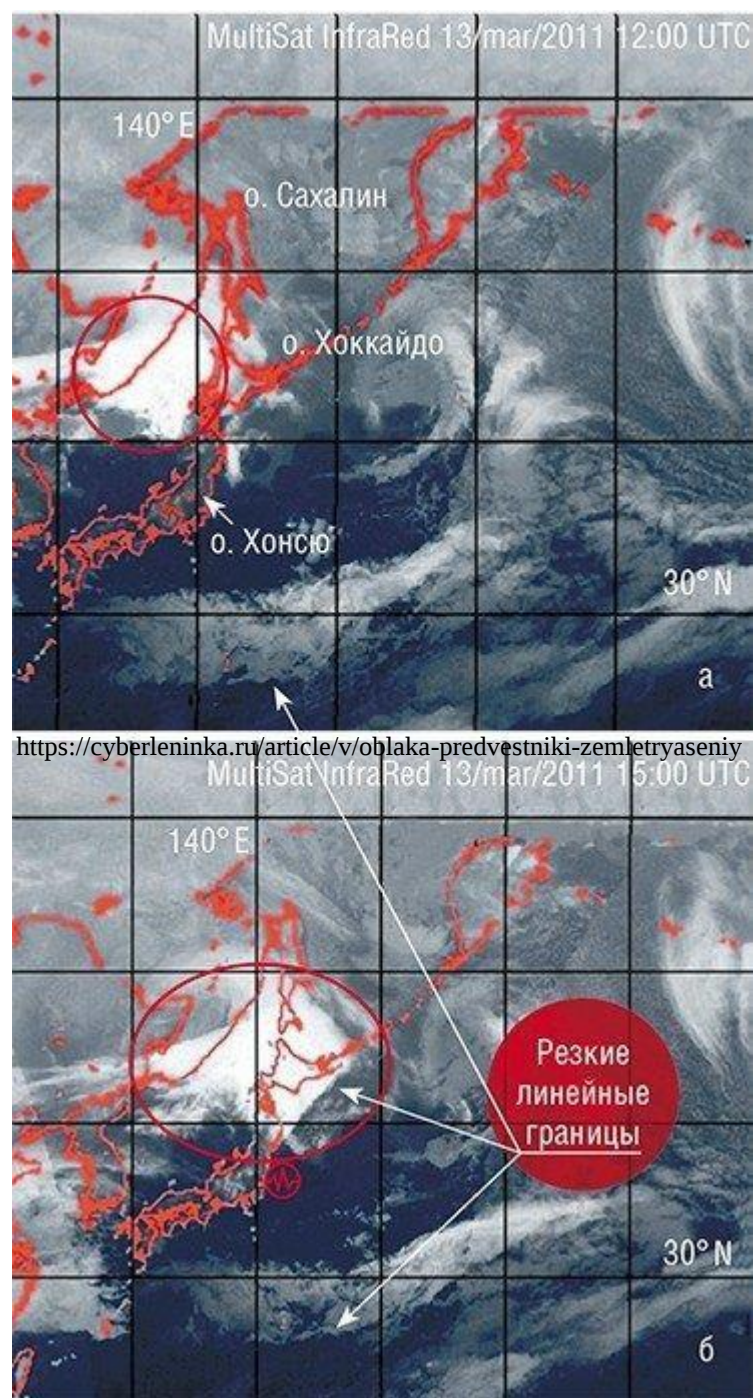


Рисунок 2.19 – Изменение облачности в циклоне при достижении разлома

Когда циклон находился за пределами этой зоны, его облачная структура имела округлую форму с нечеткими краями. По мере приближения к зоне сейсмической активности, под воздействием излучения от линейного разлома земной коры, над самим разломом в облаках циклона появилась вертикальная стена. Это проявилось на снимках как четкая линейная граница облаков. Помимо облачных аномалий, вызванных атмосферными процессами и воздействием

разломов, существуют также облачные образования не атмосферного происхождения, которые предшествуют землетрясениям. Такие облака, вероятно, образуются из-за выбросов флюидов из недр земли, появляясь перед первыми толчками и оставаясь на месте от нескольких часов до нескольких недель, в зависимости от магнитуды землетрясения и продолжительности сейсмической активности. Например, перед катастрофическим землетрясением в Китае 12 мая 2008 года, за сутки до первых толчков над активным разломом вблизи эпицентра была замечена короткая гряда подобных облаков. Эта аномалия оставалась видимой более месяца, что указывало на продолжающуюся сейсмическую активность.

«Линейные облачные аномалии могут возникать и в результате искусственно вызванных землетрясений. Например, после подземного ядерного взрыва в районе полигона наблюдались ЛОА, которые появлялись и исчезали в течение двух недель. Во время испытаний ядерного оружия в Северной Корее такие аномалии чаще всего фиксировались над морскими разломами в зоне воздействия взрывов. Интересно, что запуск баллистических ракет также оказывает влияние на земную кору, сравнимое с воздействием небольшого ядерного взрыва. Таким образом, спутниковый мониторинг линейных облачных аномалий позволяет осуществлять глобальный контроль за проведением испытаний мощного энергетического оружия, даже при неблагоприятных погодных условиях на полигоне». [15, 17, 19, 20, 21]

2.1 Классификация ОСТИ

При помощи спутниковых снимков облачных сеймотектонических индикаторов (ОСТИ) можно определить шесть основных видов по типу их структуры:

1. Линейные

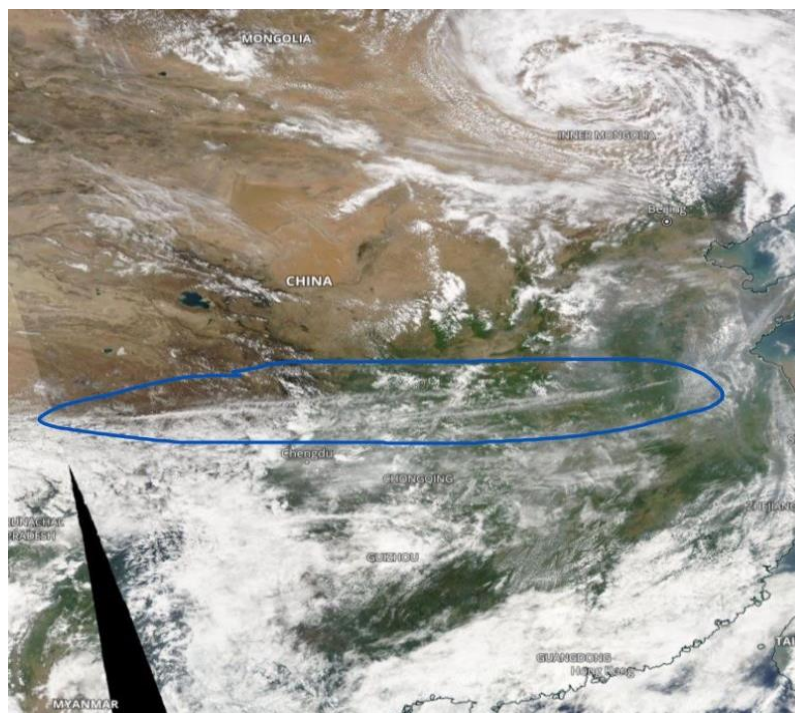


Рисунок 2.20 – Землетрясение Сычуань (Китай) 12 мая 2008

Эпицентр был расположен в округе Вэнчуань, Тибетской Нгаве и Цян, в 90км к северо-западу от Чэнду, при этом основные толчки произошли в 14:28:04.1 CST (06:28:04.1 UTC) в понедельник, 12 мая 2008 года.

2. Провалы

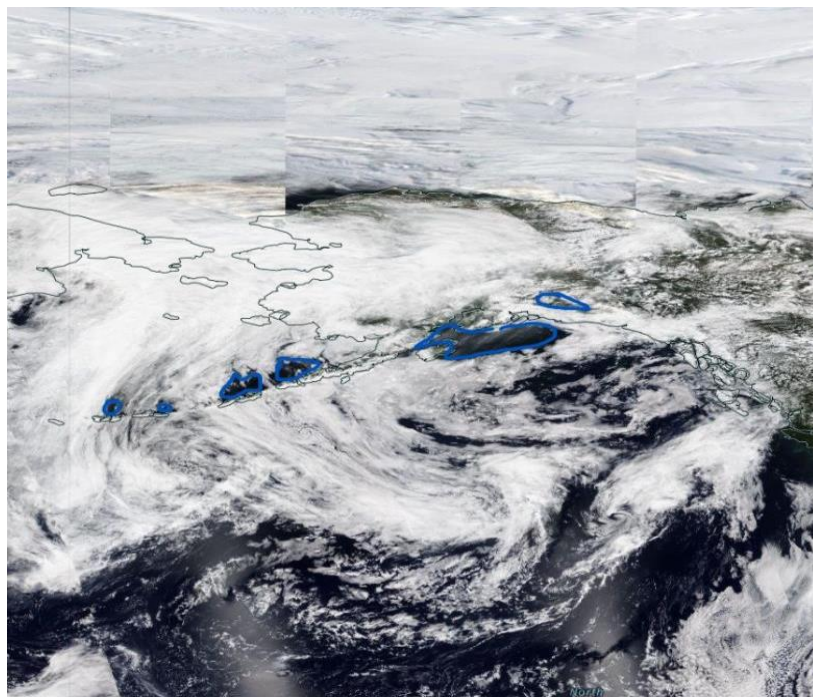


Рисунок 2.21 – Аляска 29 июля 2021 года в рамках Тихоокеанского огненного кольца

3. Ассиметричные

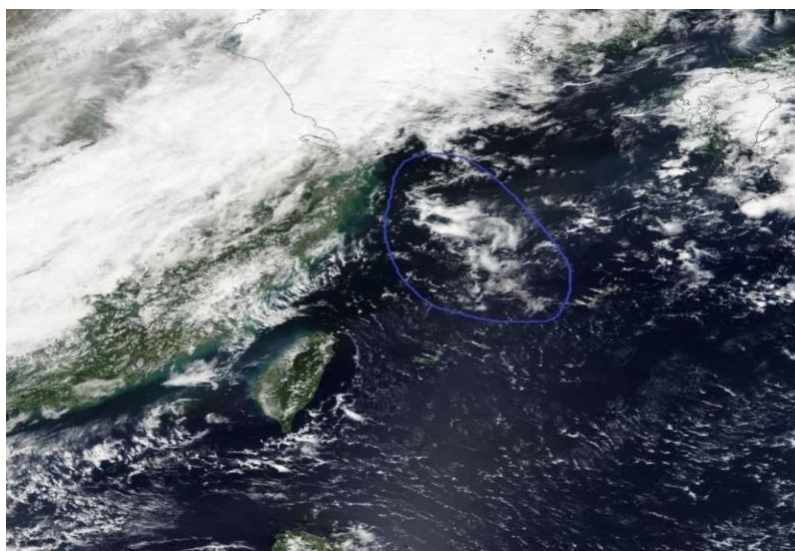


Рисунок 2.21 – ЛОА над Окинавской микроплитой к югу от острова Кюсю

4. Квадратообразные (резкие края облачности)

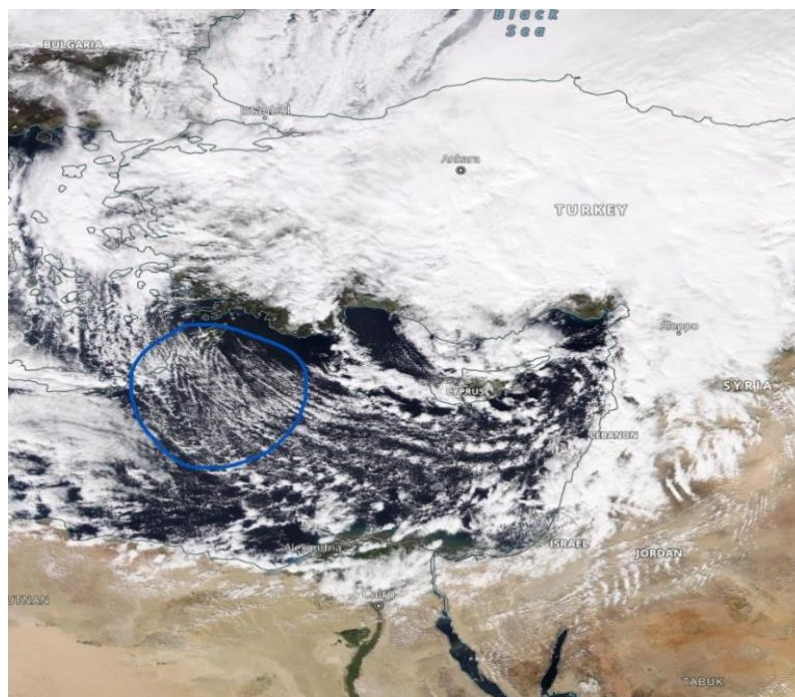


Рисунок 2.24 – Территория Турции и Сирии 6 февраля 2023 года

Спутниковое наблюдение за линейными облачными аномалиями (ЛОА) на сегодняшний день является передовым способом в области мониторинга.

2.2 Метод прогнозирования землетрясений по ОСТИ

В процессе оценки потенциальных землетрясений космические снимки выбранного региона играют ключевую роль, особенно при определении зоны глобальной сейсмической опасности для более точного прогноза. Этот шаг имеет критическое значение, так как отсутствие снимка в базе данных или отсутствие на нём облачных сеймотектонических индикаторов (ОСТИ) может привести к прекращению прогнозирования из-за невозможности локализации опасных зон. Анализ космических снимков проводится в интерактивном режиме, начиная с изучения динамики облачных структур и заканчивая сопоставлением найденных ОСТИ с границами тектонических плит или разломов для выявления совпадений их форм. Например, на рисунке 2.25 а-д представлен анализ для района в

Юго-Восточной Азии. На четырёх снимках MTSAT-1R от 2 октября 2010 года, сделанных с интервалом в 2 часа по токийскому времени, наблюдалось формирование асимметричной ОСТИ. [21]

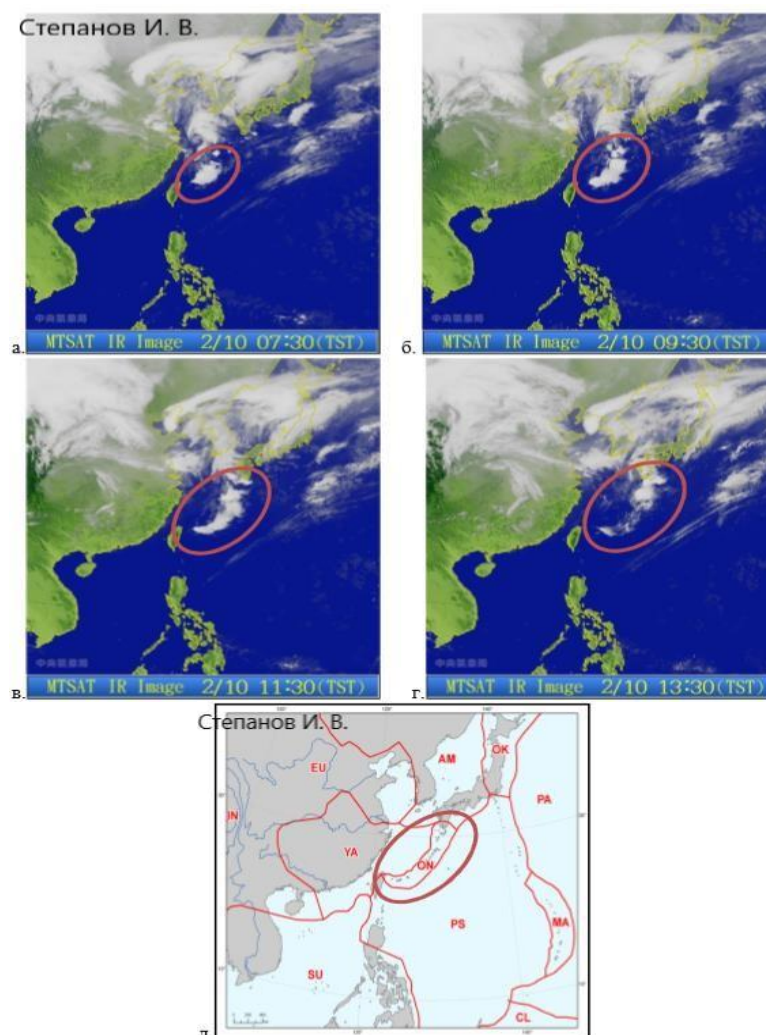
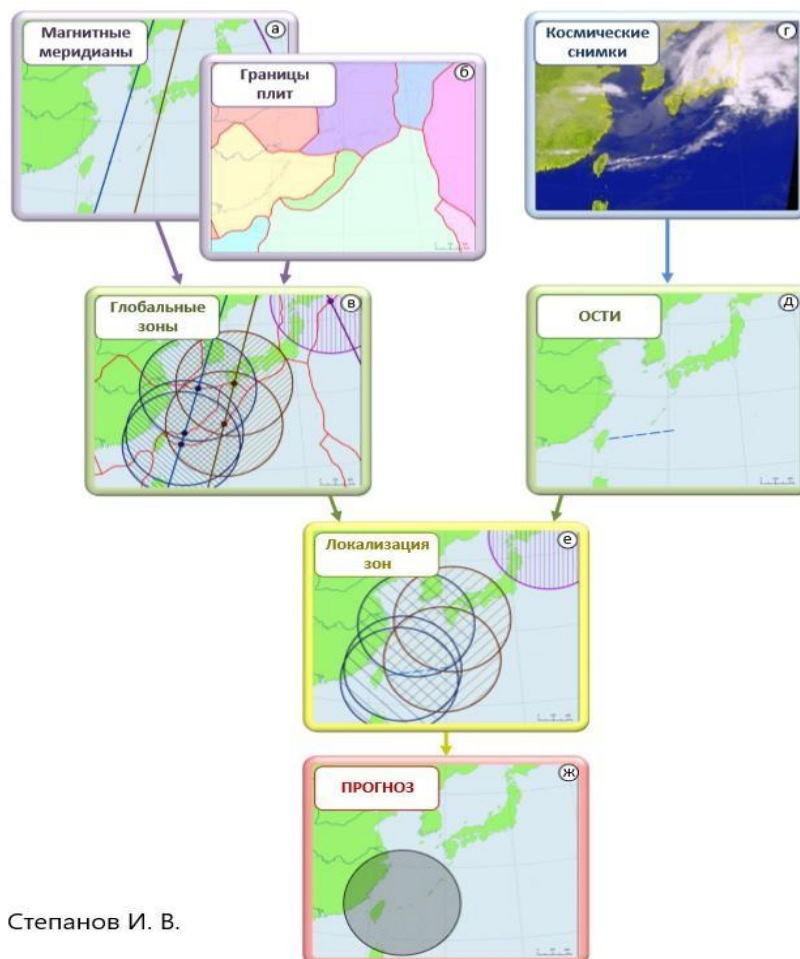


Рисунок 2.25 – Анализ динамики ОСТИ

Из снимков видно, что воздушные массы двигались в направлении восток-северо-восток, а параллельно в юго- западной части Окинавской микроплиты формировалась облачная структура. В течение нескольких часов эта структура приобретала чёткие контуры, совпадающие с границами Окинавской микроплиты (рис.2.25). Продолжительность жизни асимметричной ОСТИ составила около 7 часов. Таким образом, анализ серии снимков позволил выделить среди других облачных форм ОСТИ, контуры которых совпадали с контурами Окинавской микроплиты.

Используя эти данные, можно локализовать данную область и определить её как потенциально опасную с точки зрения будущих землетрясений.

На рисунке 2.26 показана полная структура процесса анализа. Сначала выявляются аномальные зоны, которые могут указывать на приближение землетрясения. [21]



Степанов И. В.

Рисунок 2.26 – Процесс выполнения оценки вероятного землетрясения

Затем осуществляется основной этап, включающий запрос данных о расположении сейсмамагнитных меридианов на исследуемой территории. Эти меридианы представляют проекции силовых линий геомагнитного поля на поверхность Земли и отображаются как линейные объекты с дополнительной информацией, такой как долгота и дата наибольшей активности (цвет каждой линии на рисунке 2.26а указывает на конкретную дату).

Далее определяется зона глобальной сейсмической опасности. Точки пересечения сейсмомангнитных меридианов и границ тектонических плит являются местами наибольших тектонических возмущений. Радиус этих зон составляет 800 км от точек пересечения, что было установлено на основе исследования расстояний от точек пересечения до мест землетрясений, которые не превышали 800 км. Границы плит были получены из карты-модели плит, разработанной Бердом (Bird, 2002).

Результатом основного этапа является выделение зон возможных землетрясений с предполагаемыми датами событий. Иногда, из-за большого количества таких зон и возможных очагов землетрясений, требуется дополнительная локализация зон глобальной сейсмической опасности. Дальнейшие этапы анализа включают в себя уточнение этих зон для более точного прогнозирования. [21]

2.3 Метод прогнозирования магнитуды землетрясений по ОСТИ

Расчет магнитуды предполагаемого землетрясения в зависимости от длины ЛОА осуществляется по следующей формуле:

$$M = \ln D, \quad (2)$$

где: Магнитуда прогнозируемого землетрясения (M) рассчитывается с учетом максимальной протяженности облачного сейсмотектонического индикатора (D) в километрах. По данной формуле была проведена оценка магнитуды землетрясения в качестве примера. [15]

3. ФОРМИРОВАНИЕ АРХИВА СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ОБЛАЧНОСТИ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ И ПРОГНОЗ МАГНИТУДЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ОБЛАЧНЫМ ИНДИКАТОРАМ

1) Курильские острова 2009 год 31 мая.

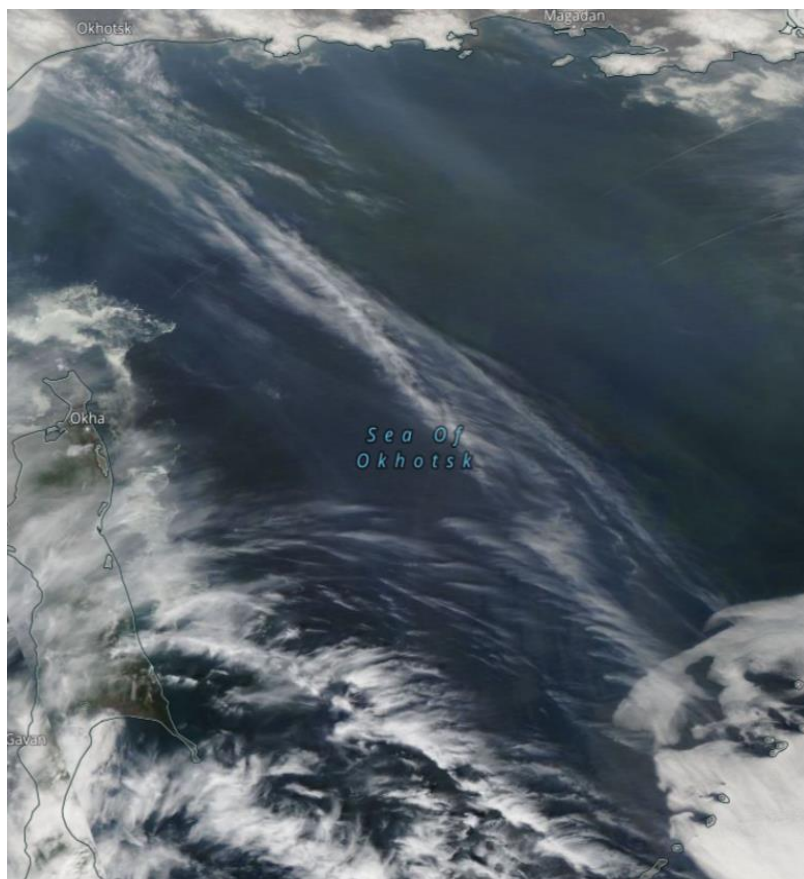


Рисунок 3.27 – Снимок со спутника MODIS «Terra».

Протяженная гряда перистых облаков верхнего яруса атмосферы (на высоте примерно 12-14 км) появилась над разломом земной коры под Охотским морем. На следующие сутки на Курильских островах прошла серия сильных подземных сейсмических ударов, а через 2 недели – извержение вулкана на острове Матуа.

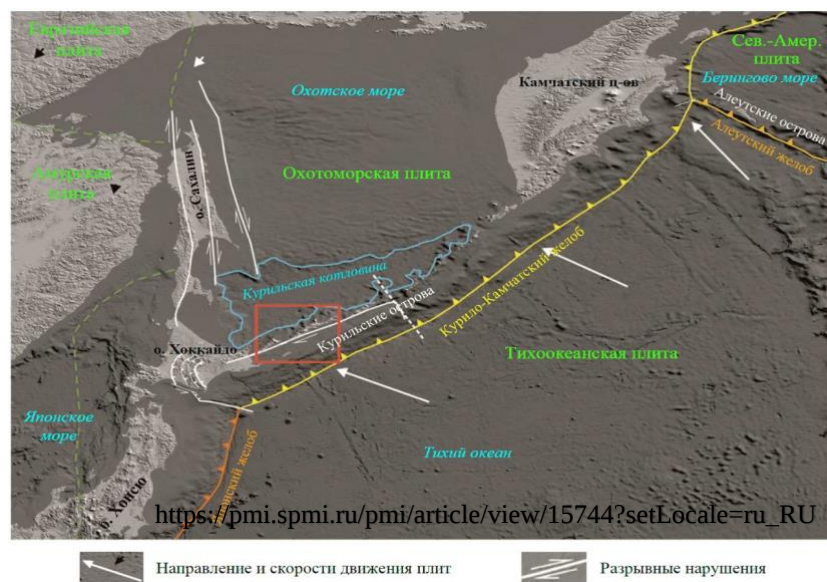


Рисунок 3.28 – Тектонический разлом

Ломанный край облачного массива севернее острова Сахалин отражает геодинамическое взаимодействие группы коротких разломов.

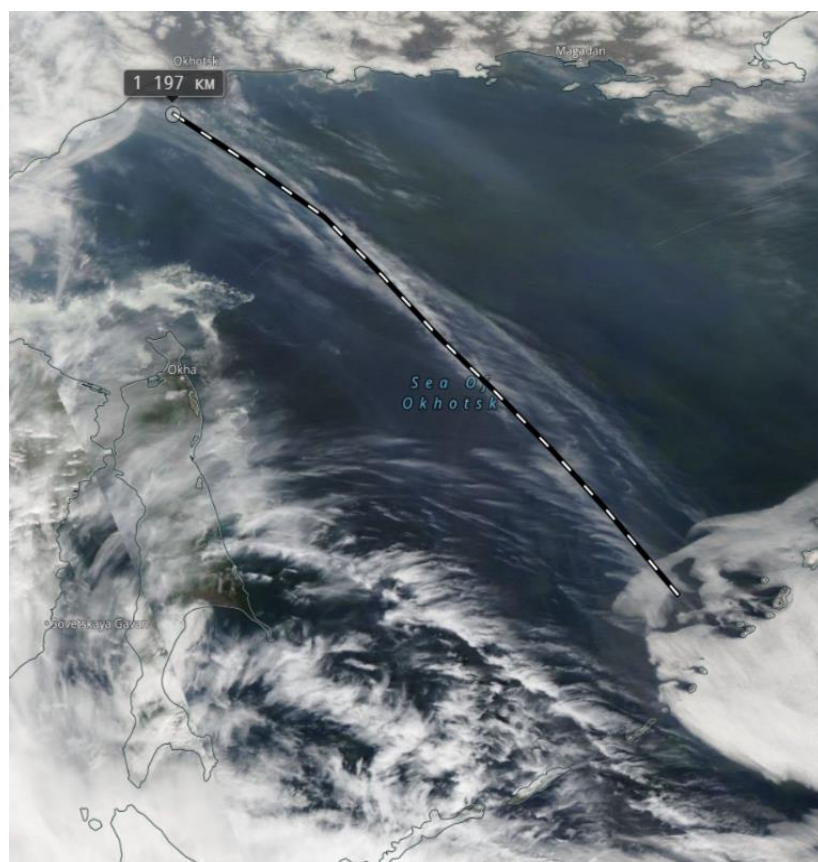


Рисунок 3.29 – Протяженность ОСТИ

Магнитуда реальная = 5,5

Магнитуда рассчитанная=7

2) Япония 2024 год 1 января.

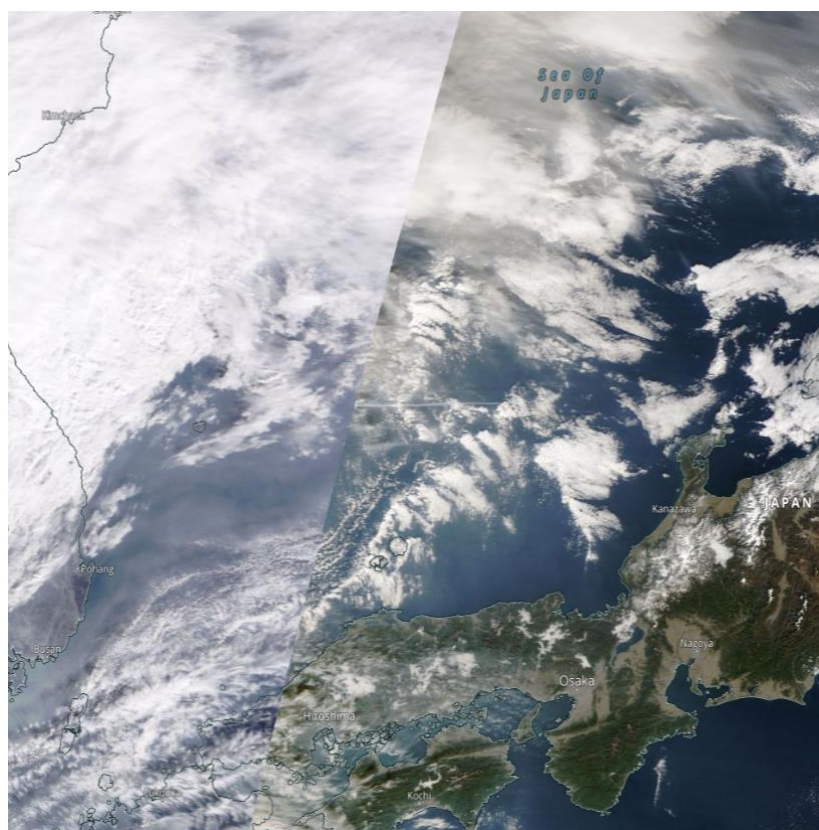


Рисунок 3.30 – Снимок со спутника MODIS «Terra».

Япония расположена на конвергентной границе между Тихим океаном, Филиппинским морем, Охоткой и Амурской плитами. Вдоль восточного и юго-восточного побережья островной дуги субдукция Тихоокеанской и Филиппинской морских плит происходит соответственно в Японском и Нанкайском желобах.

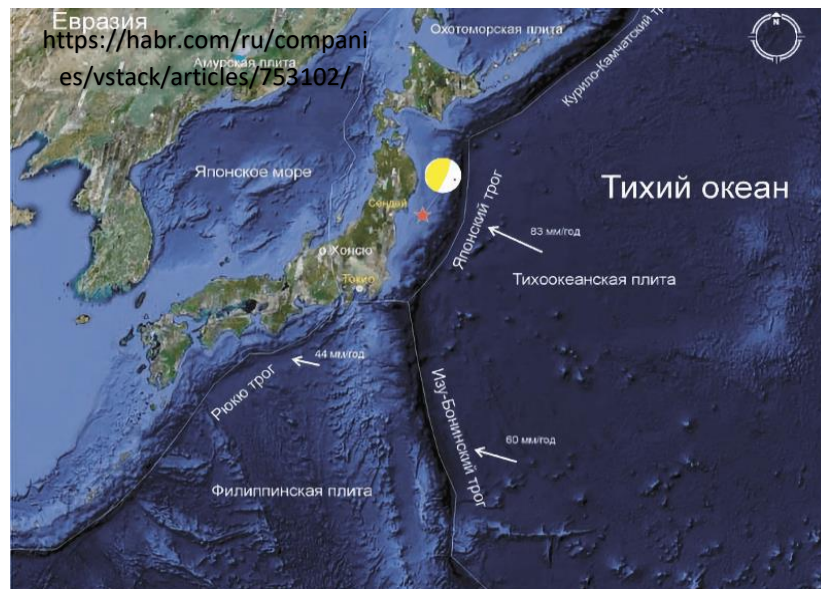


Рисунок 3.31 – Тектонический разлом

Восточное побережье Хонсю, граничащее с Японским морем, является конвергентной границей, которая тянется с севера на юг. Считается, что эта граница между Амурской и Охотской плитами является начальной зоной субдукции, состоящей из надвигов, опускающихся на востоке.

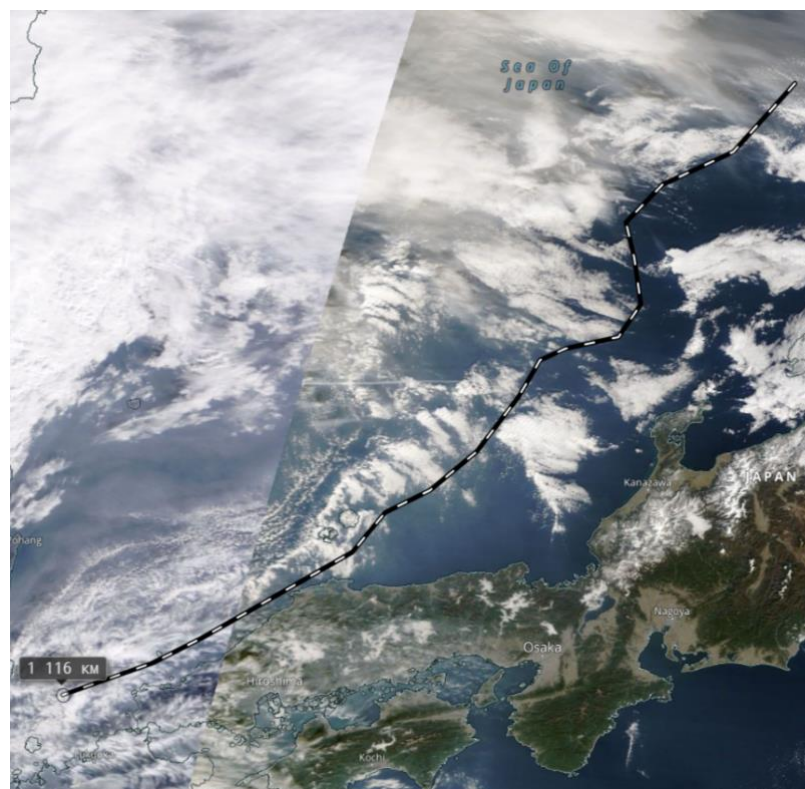


Рисунок 3.32 – Протяженность ОСТИ

Облака имели границу, за два дня до землетрясения у территории, отмеченный линией.

Магнитуда реальная = 7.6

Магнитуда рассчитанная=7.1

3) Перу 2007 год 15 августа.

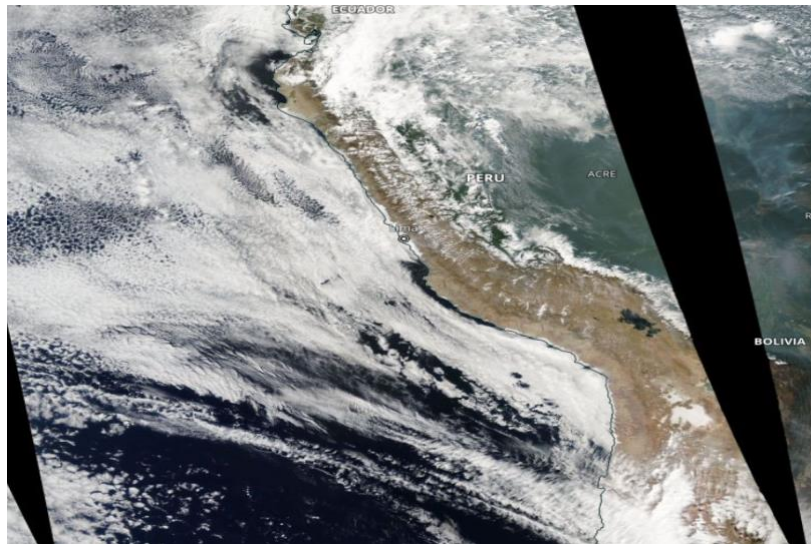


Рисунок 3.33 – Снимок со спутника MODIS «Terra».

На океанском побережье Перу зона субдукции, которая появилась из-за наплыва Южно-Американской плиты на плиту Наска.



Рисунок 3.34 – Тектонический разлом

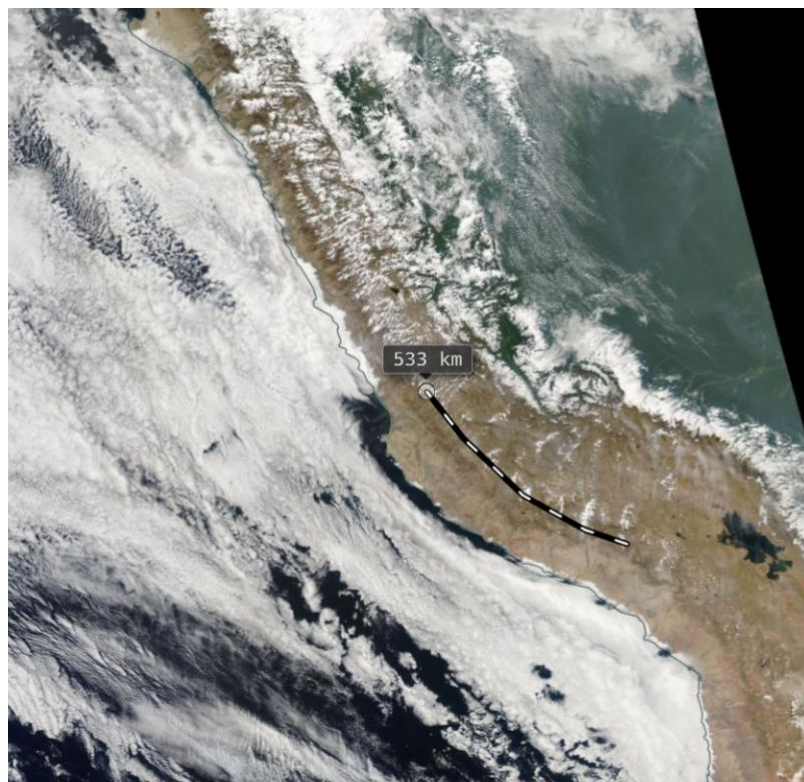


Рисунок 3.35 – Протяженность ОСТИ

Магнитуда реальная = 5.4

Магнитуда рассчитанная=6.1

4) Юго-восток Афганистана 2022 год 22 июня.

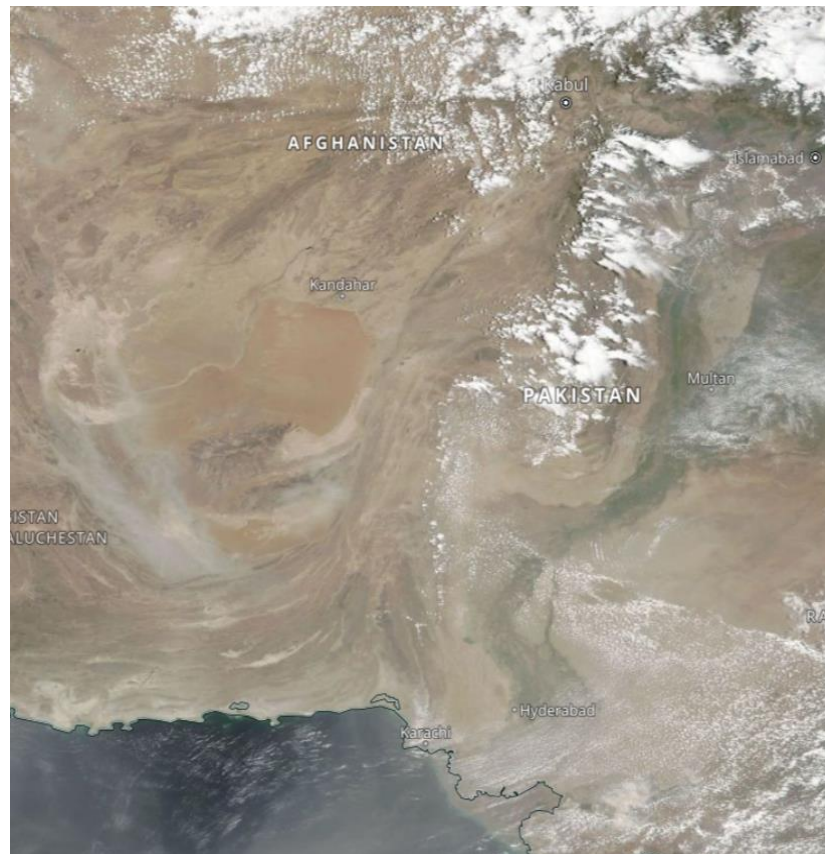


Рисунок 3.36 – Снимок со спутника «Suomi NPP».

Землетрясение стало следствием провалов поверхностного скольжения.



Рисунок 3.37 – Тектонический разлом



Рисунок 3.38 – Протяженность ОСТИ

Магнитуда реальная = 6.1

Магнитуда рассчитанная=6.2

5) Остров Тайвань.

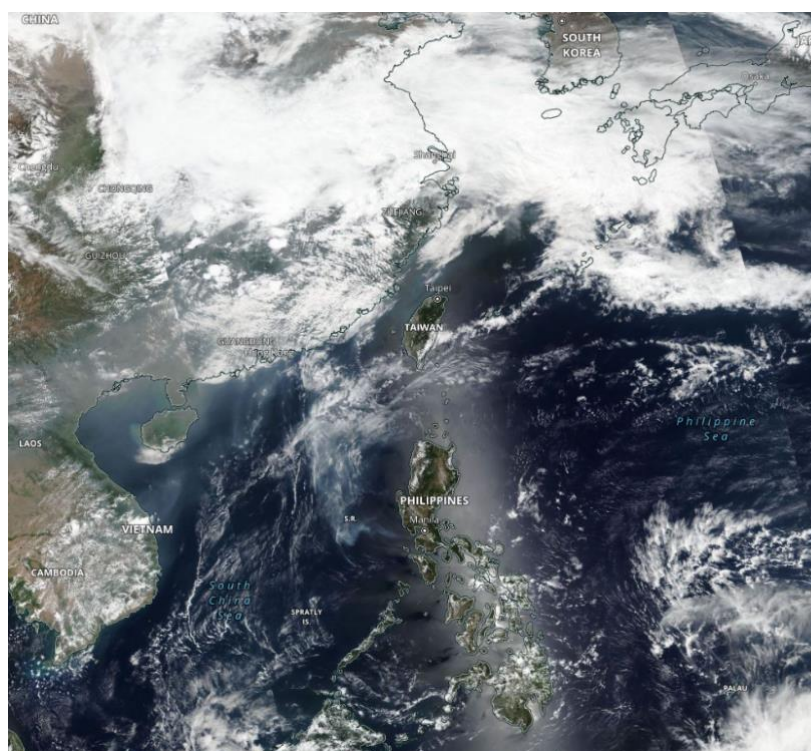


Рисунок 3.39 – Снимок со спутника «Suomi NPP».

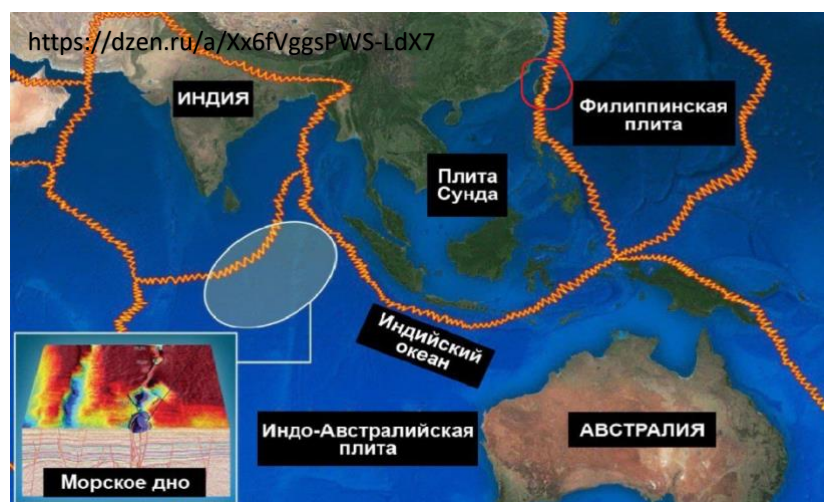


Рисунок 3.40 – Тектонический разлом

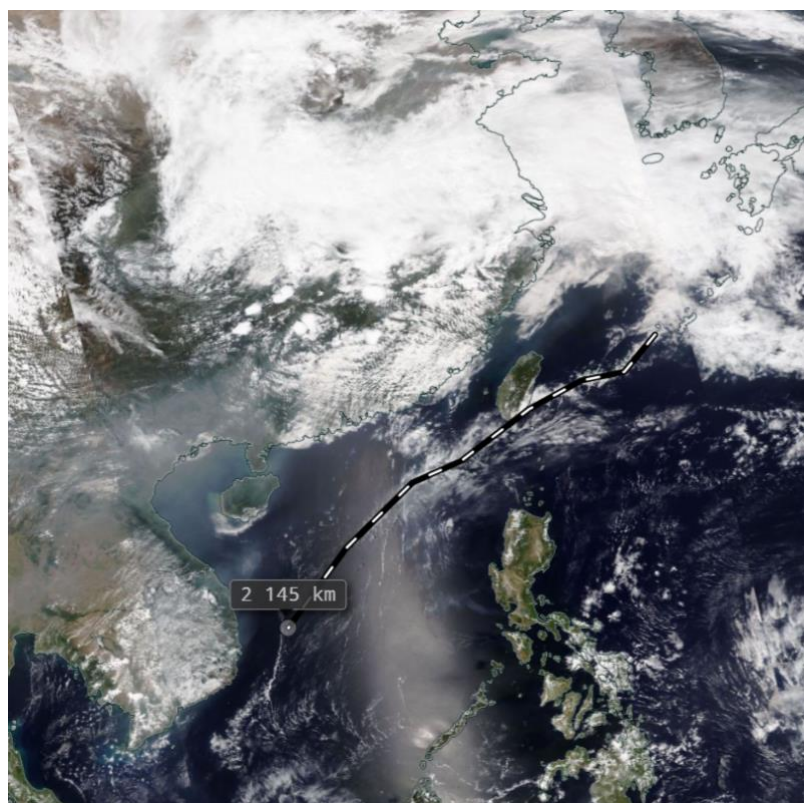


Рисунок 3.41 – Протяженность ОСТИ

Магнитуда реальная = 7.2

Магнитуда рассчитанная=7.6

3.1 Статистический анализ результатов

Таблица 3.1 – архив данных с 2003 по 2024 год.

Дата и место	Реальная магнитуда	Рассчитанная магнитуда	Длина ОСТИ (км)	Погрешность
Аляска 27 июня 2021	8.2	7.9	2598	0.3
Турция и Сирия 6 февраля 2023	7.5	6.9	1043	0.6
Китай 10 мая 2008	7.9	7.7	2318	0.2
Байкал 8 июня 2022	5.3	5.5	243	0.2
Италия 14 мая 2012	6	5.9	402	0.1
Курильские острова 31 мая 2009	5.5	7	1197	1.5
Япония 30 декабря 2024	7.6	7.6	1116	0
Перу 12 августа 2007	5.4	6.2	533	1.2
Афганистан 19 июня 2022	6	6.2	531	0.2
Мексика 19 сентября 2022	7.7	7.8	2492	0.1
Марокко 7 сентября 2023	6.8	6.9	989	0.1
Иран 24 января 2023	5.6	6.3	854	0.7
Иран 25 декабря 2003	6.6	6.6	800	0
Индонезия 27 сентября 2018	6.1	7.3	1522	1.2
Гаити 14 августа 2021	7.2	6.9	1055	0.3
Япония 13 февраля 2021	6.5	7	1059	0.5
Сахалинск 5 июня 2024	5.9	6.1	486	0.2
Соломоновы острова 29 марта 2007	8.1	8	2989	0.1
Америка Штат Вирджиния 22 августа 2011	5.8	6	405	0.2
Индонезия 30 мая 2024	6	6.8	953	0.8
Индонезия 23 апреля 2024	6.2	7.1	1333	0.9
Атлантика 2 июня 2024	6	7.1	1248	1.1
Тайвань 16 мая 2024	5.1	7.2	1473	2.1
Япония 14 июня 2024	5.1	6.7	814	1.6
Средняя арифметическая погрешность				0,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание архива данных из 24 случаев землетрясений, для каждого случая была рассчитана магнитуда. Составлен статистический анализ данных в таблице для выявления корреляции между прогнозированной магнитудой и фактической, рассчитана средняя арифметическая погрешность.

В первой главе были изучены землетрясения их классификация, приборы для выявления сейсмической активности, интенсивность, магнитуда, также сейсмические волны и их виды.

Во 2 главе были изучены разновидности облачных сейсмотектонических индикаторов для распознавания землетрясений по облачности. Прогнозирование землетрясения по ОСТИ и выбран метод расчёта магнитуды по протяженности гряды.

В третьей главе были подробно проанализированы 5 показательных снимков с разных точек мира с тектоническими разломами и расчетом прогнозированной магнитуды землетрясений по методу, который мы выбрали.

Таким образом, статистический анализ по собранному архиву данных дал понять, что облачные сейсмотектонические индикаторы напрямую коррелируют с землетрясениями. Рассчитанная средняя погрешность между прогнозированной магнитудой и фактической оказалась 0.5 балла, а это значит, что данный метод прогнозирования является точным и достоверным, поэтому его можно применять для прогноза сейсмической активности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://newsrobotics.ru/iz-za-chego-proishodjat-zemletrjasenija-i-pochemu-oni-mogut-dlitsja-godami/>
2. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://multiurok.ru/blog/seismicheskie-poiasa-zemli.html>
3. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://ecoportal.info/sejsmicheskie-poyasa/>
4. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://ecoportal.info/sejsmicheskie-poyasa/>
5. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://dzen.ru/a/ZfftdX063eXS08o>
6. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.britannica.com/science/seismograph/Applications-of-the-seismograph>
7. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://obrazovaka.ru/geografiya/vidy-zemletryasenyi.html>
8. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.livelib.ru/book/156138/readpart-katastrofy-vprirode-zemletryaseniya-batyr-seidovich-karryev/~11>
9. [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://spravochnick.ru/geografiya/seysmologiya/vidy_zemletryasenyi/#vulkanicheskie-zemletryaseniya
10. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://studfile.net/preview/2168314/page:5/>
11. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.livelib.ru/book/156138/readpart-katastrofy-vprirode-zemletryaseniya-batyr-seidovich-karryev/~13>

12. [Электронный ресурс] / Режим доступа:
<http://lemur59.ru/node/817>
13. [Электронный ресурс] / Режим доступа:
https://popovgeo.sfedu.ru/lecture_17
14. [Электронный ресурс] / Режим доступа:
<https://nauka.club/geografiya/vidy-i-kharakteristiki-seysmicheskikh-voln.html>
15. Морозова Л. И. Облака предвестники землетрясений [Электронный ресурс] / Режим доступа:
<https://cyberleninka.ru/article/v/oblaka-predvestniki-zemletryaseniya>
16. Дода Л.Н., Новикова Н.Н., Пахомов Л.А., Степанов И.В. Космический мониторинг предвестников землетрясений // Наука в России. 2009. № 6. С. 37–43.
17. Морозова Л.И. Оценка геодинамической активности территории по облачным аномалиям на спутниковых снимках / региональные проблемы, 2010, Том 13, №1, С. 37-41
18. Дода Л.Н., Новикова Н.Н., Пахомов Л.А. и др. Прогнозирование и космический мониторинг предвестников землетрясений: проблемы, надежды, реалии // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: Тез. докл. V науч.-практ. конф. М.: МТП-инвест, 2006. С. 114–120.
19. Морозова Л. И. Проявление Главного Уральского разлома в поле облачности на космических снимках // Исследование Земли из космоса, 1980. № 3. С. 101—103.
20. Морозова Л. И. Спутниковый мониторинг: отображение и выявление геоэкологических аномалий и катастроф в Дальневосточном регионе России // Инженерная экология, 2008. № 4. С. 24—28.
21. Morozova L. I. Satellite Meteorological Images as Carriers of Information on Seismic Processes // Geol. of Pac. Ocean. 2000. Vol. 15. P. 439—446

22. Степанов И.В. Геоинформационное обеспечение мониторинга землетрясений с использованием материалов дистанционного исследования Земли: Автореферат диссертации. — Москва, 2011.

Приложение А.

