

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт природных ресурсов  
Специальность 130201 «Геофизические методы поисков и разведки месторождений  
полезных ископаемых»  
Кафедра геофизики

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

**ВЛИЯНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ И ОСОБЕННОСТЕЙ ВЕРХНЕЙ  
ЧАСТИ РАЗРЕЗА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАПИСЕЙ СТАНЦИЙ  
КАМЧАТСКОЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ**

550.834(571.66)

Студент

| Группа | ФИО                       | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------|---------|------|
| 2212   | Чубаров Даниил Леонидович |         |      |

Руководитель

| Должность | ФИО                          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|------------------------------|------------------------|---------|------|
| Профессор | Немирович-<br>Данченко М. М. | д. ф.-м.н.             |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Должность     | ФИО         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|-------------|------------------------|---------|------|
| Зав. кафедрой | Гусев Е. В. | канд. г.-м. н          |         |      |

Томск – 2016 г.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа \_\_\_\_\_ 49 \_\_\_\_\_ с., \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ рис., \_\_\_\_\_ 5 \_\_\_\_\_ табл., 25 источников литературы.

Ключевые слова: станционные поправки, приливные модуляции, верхняя часть разреза, Камчатская региональная сейсмологическая сеть

Объектом исследования является (ются) Камчатская региональная сеть сейсмологических станций

Цель работы – разработка калибровочных параметров для их последующего внедрения в работу сейсмологических станций

В процессе исследования проводились расчеты относительных спектральных поправок за верхнюю часть разреза и их анализ, а так же расчеты и анализ изменений ускорения силы тяжести за счет приливных модуляций

В результате исследования разработаны относительные спектральные поправки за верхнюю часть разреза для станций Петропавловского куста, а так же проведены расчеты изменения компонент ускорения силы тяжести, вызванные лунно-приливными модуляциями

Область применения: сейсмологический мониторинг

В будущем планируется внедрить полученные результаты в работу службы срочных донесений Камчатского филиала геофизической службы РАН

### Планируемые результаты обучения

| <i>Код результата</i>               | <i>Результат обучения<br/>(выпускник должен быть готов)</i>                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Универсальные компетенции</b>    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| P1                                  | Применять математические, естественнонаучные, социально-экономические и инженерные знания в профессиональной деятельности                                                                                                                                                                                                           |
| P2                                  | Анализировать основные тенденции правовых, социальных и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности, демонстрировать компетентность в вопросах здоровья и безопасности жизнедеятельности и понимание экологических последствий профессиональной деятельности                                                    |
| P3                                  | Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности                                                                                                                                                                                                                     |
| P4                                  | Идентифицировать, формулировать, решать и оформлять профессиональные инженерные задачи с использованием современных образовательных и информационных технологий                                                                                                                                                                     |
| <b>Профессиональные компетенции</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| P5                                  | Разрабатывать технологические процессы на всех стадиях геологической разведки и разработки месторождений полезных ископаемых, внедрять и эксплуатировать высокотехнологическое оборудование                                                                                                                                         |
| P6                                  | Ответственно использовать инновационные методы, средства, технологии в практической деятельности, следуя принципам эффективности и безопасности технологических процессов в глобальном, экономическом, экологическом и социальном контексте                                                                                         |
| P7                                  | Применять знания, современные методы и программные средства проектирования для составления проектной и рабочей документации на проведение геологической разведки и осуществления этих проектов                                                                                                                                      |
| P8                                  | Определять, систематизировать и получать необходимые данные с использованием современных методов, средств, технологий в инженерной практике                                                                                                                                                                                         |
| P9                                  | Планировать, проводить, анализировать, обрабатывать экспериментальные исследования с интерпретацией полученных результатов на основе современных методов моделирования и компьютерных технологий                                                                                                                                    |
| P10                                 | Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой для решения профессиональных инновационных задач в соответствии с требованиями корпоративной культуры предприятия и толерантности                                                                            |
| P11                                 | Проводить маркетинговые исследования и разрабатывать предложения по повышению эффективности использования производственных и природных ресурсов с учетом современных принципов производственного менеджмента, осуществлять контроль технологических процессов геологической разведки и разработки месторождений полезных ископаемых |

## Оглавление

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение .....                                                                              | 5  |
| Литературный обзор.....                                                                     | 7  |
| Часть 1. Оценка относительных спектральных поправок за верхнюю часть<br>разреза (ВЧР) ..... | 11 |
| 1.1. Подбор сейсмических записей из данных Камчатской региональной сети<br>данных .....     | 12 |
| 1.2. Подготовка отобранного материала. Выбор исследуемых станций .....                      | 14 |
| 1.2.1. Подборка станций для оценки спектральных поправок.....                               | 15 |
| 1.3. Определение спектральных поправок .....                                                | 17 |
| Часть 2. Расчет влияния приливных компонент на показания сейсмостанций..                    | 22 |
| 2.1. Общие сведения о приливных силах .....                                                 | 22 |
| 2.2. Исследование взаимосвязи приливных сил с сейсмологической<br>активностью Земли.....    | 33 |
| 2.2.1. Суточные вариации приливных сил .....                                                | 36 |
| 2.2.2. Интегральная характеристика приливных сил.....                                       | 37 |
| 2.2.3. Расчет модельной среды .....                                                         | 41 |
| Заключение.....                                                                             | 45 |
| Список литературы.....                                                                      | 47 |

## ВВЕДЕНИЕ

В работе представлено описание основных результатов производственной и преддипломной практик, пройденных соответственно в Камчатском филиале геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский и Институте вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск.

Данная работа направлена на изучение и посильное решение проблемы калибровки станций сейсмологического мониторинга на примере Камчатской сейсмологической сети и состоит из двух частей.

В первой части приводятся результаты исследований относительных спектральных поправок за поверхностный слой (поправки за ВЧР) – здесь за основу брались различия в записях землетрясений между базовой станцией РЕТ (Петропавловск), стоящей на скальной породе и станциями, расположенными на небольшом удалении.

Вторая часть работы посвящена исследованию влияния приливных сил на работу станций и их роли при подготовке землетрясений в целом. В данной части приведены расчеты, сделанные на основе приливной модели Дж. Дарвина.

Актуальность данной работы заключается в том, что вопросам сейсмологического мониторинга в последнее время уделяется все большее внимание в связи с направленностью общества на вопросы экологической безопасности. Подтверждением этого тезиса служит то, что 18 марта 2015 года в г. Сендай (Япония) была принята Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015-2030 гг при поддержке Бюро по сокращению риска бедствий ООН и по поручению генеральной ассамблеи ООН.

Так же нельзя оставлять без внимания тот факт, что на территории РФ одним из нефтедобывающих регионов является шельфовая зона о. Сахалин, который так же известен как зона повышенной сейсмологической активности и для уменьшения вероятности техногенной катастрофы, вызванной землетрясением

проблеме качества сейсмологического мониторинга нужно уделять определенное внимание.

**Целью работы** является разработка калибровочных параметров для их последующего внедрения в работу сейсмологических станций и подготовка расчетных пространственно-временных моделей.

## ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Вопросами калибровки станций сейсмологического наблюдения начали заниматься с момента появления цифровых сейсмологических станций. Так, в 1971 году была опубликована статья А. В. Невинного и др. «Коррекция сейсмических построений в условиях слоистых сред с криволинейными границами», где авторы рассматривают проблему изменения абсолютного значения скоростей распространения сейсмических волн, вызванную сложностью геологического разреза и предлагают методику учета этих геологических неоднородностей [22].

В статье И. Г. Бинкина и З. И. Газаряна «Алгоритм построения сейсмических разрезов-изображений среды по суммоламентам РНИ» рассмотрен способ преобразования временных разрезов в изображении среды посредством наложения суммоламент РНИ, получаемых для коротких перекрывающихся участков временного разреза [18].

Из современных исследователей, занимающихся спектральными поправками сейсмологических станций, стоит отметить статьи Лемзикова В. К., занимающегося оценкой станционных поправок сейсмических станций юга Камчатки и Авачинско-Каряжской группы вулканов [20].

Исследования связи приливных явлений с сейсмологической активностью берут свое начало в конце XIX века. Самые ранние статьи из тех, что удалось найти, были написаны Артуром Шустером (Arthur Shuster) [12] и Каргиллом Гильстоном Кноттом (Cargill Gilston Knott) в 1897 и 1896 годах соответственно.

В своей статье [6] К. Г. Кнотт рассматривает взаимосвязь землетрясений, произошедших на территории Японии с 1885 по 1892 гг. и оценивает связь частоты землетрясений с фазами Луны. В заключении автор говорит о наличии доказательств связи между частотой землетрясений в изученном регионе и периодичностью, связанной с лунными сутками.

В середине XX века локальные исследования, направленные на выявление зависимости между приливным потенциалом и землетрясениями проводил американский геофизик Леон Кнопофф (Leon Knopoff). В статье Earth

tides as a triggering mechanism for earthquakes [7], опубликованной в 1964 году, Л. Кнопофф представил результаты исследований связи приливного потенциала с землетрясениями, произошедшими в южной Калифорнии с 1934 по 1957 гг.

В 1975 году была опубликована статья Томаса Хитона (Thomas H. Heaton) Tidal triggering of earthquakes [5], в которой автор рассмотрел роль приливных сил в качестве «триггеров», т.е. отвел приливному напряжению роль «последней капли», переполняющей «чашу» накопленного тектонического напряжения. Анализируя свое исследование, Хитон заключил, что в качестве «триггера» приливные силы если и могут действовать, то только для неглубоких ( $< 30$  км) и слабых землетрясений.

Помимо вышеперечисленных исследователей в 60-е – 80-е года XX века исследованиями связи приливных процессов и сейсмологической активности занимались такие ученые, как А. Полумбо (A. Polumbo, 1986), исследовавший связь Лунных и солнечных приливных компонент с землетрясениями, произошедшими в Италии [9], П. Руделек (P. A. Rydelek), изучавший воздействие приливных сил на извержения вулканов на Гавайях [10], Дж. Ширли (J. H. Shirley), проводивший исследования влияния приливных сил Луны и Солнца на сильные землетрясения Южной Калифорнии и Аляско-Алеутского региона [11], Р. Дик (Dicke R. H., 1962) [3] и другие.

В 90-е годы XX и начале XXI века по данной тематике так же можно найти довольно много исследований.

Так, в 2003 году была опубликована статья Earthquake Clustering Relative to Lunar Phases in Taiwan, написанная группой китайских (тайваньских) ученых во главе с Ц. Х. Лин (C. H. Lin) [8], в которой рассмотрели влияние фаз Луны на землетрясения, произошедшие вблизи о. Тайвань в период с 1973 по 1991 годы.

По результатам исследований был сделан вывод о том, что корреляция между фазами Луны и землетрясениями является значительной для землетрясений с магнитудой  $M_L$  от 2,5 до 5.

В другой статье, выполненной группой британских исследователей во главе с Р. Крокетом (R. G. M. Crockett), проводилось исследование взаимосвязи приливных явлений с землетрясением 26 декабря 2004 года [2].

В заключении авторы утверждают, что корреляция между частотой землетрясений в данном регионе и фазами Луны (в период с 28 октября 2004) количественно оценена и довольно высока.

Спектр исследований, проводимых зарубежными учеными в рамках данной тематики за последние 15–20 лет, ничуть не уменьшился. По-прежнему можно встретить статьи, посвященные взаимосвязи приливных процессов с самыми различными сейсмологическими явлениями – вулканизмом [4], микроземлетрясениями [14] и др.

Наряду со своими зарубежными коллегами, советские и российские ученые так же занимались исследованиями в данной области.

Одним из пионеров в данной области был Гурген Павлович Тамрозян. В статье Tide-forming forces and earthquakes [13] Гурген Павлович, проанализировав кавказские землетрясения с 1917 по 1950 гг., приходит к выводу, что имеется довольно отчетливая связь между частотой землетрясений и изменениями приливообразующих факторов.

Кроме Г.П. Тамрозяна весомый вклад в развитие представления о приливообразующих силах внес еще один советский (российский) ученый – Юрий Николаевич Авсюк. Его перу принадлежит целый ряд статей [16, 17], а так же монография [15], посвященная данной тематике.

Также стоит отметить группу камчатских ученых, ведущих исследования в области высокочастотных сейсмических шумов и их взаимосвязь с приливными явлениями. Довольно большое число публикаций по этой тематике принадлежит Салтыкову В. А. [22, 24]

Помимо изучения прямой связи сейсмологических процессов с приливными явлениями некоторыми авторами изучается воздействие приливных сил на другие процессы, которые в свою очередь можно использовать для изучения сейсмологических явлений.

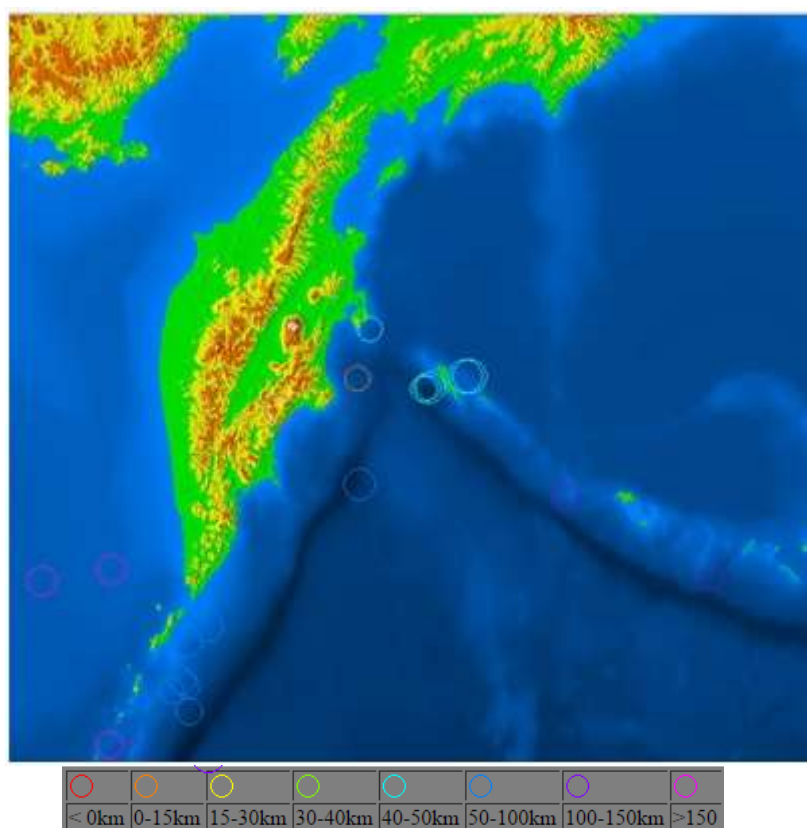
Так в диссертационной работе М. В. Степанова «Изучение краткосрочных предвестников землетрясений методом электромагнитной эмиссии» в одной из глав рассматривается связь приливных вариаций и электромагнитного излучения, аномалии которого, согласно автору, можно рассматривать как предвестники землетрясений [25].

## **ЧАСТЬ 1. ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПОПРАВОК ЗА ВЕРХНЮЮ ЧАСТЬ РАЗРЕЗА (ВЧР)**

Спектральные характеристики используются для таких целей, как определение амплитудных поправок, сейсмическое микрорайонирование и др. Станционные поправки необходимы для правильного определения значения энергетического класса землетрясений. В условиях Камчатки станционные поправки могут характеризовать особенности распространения и затухания сейсмических волн в вулканических средах активных вулканов [20]. В оперативной работе сейсмической подсистемы Службы предупреждения о цунами СП СПЦ спектральные поправки будут использоваться, прежде всего, при оценке макросейсмических сотрясений, которая определяется на основе амплитудных характеристик записи. Поскольку предполагается, что информация об инструментальной балльности в некоем пункте может быть использована для выпуска тревоги цунами, то требования к состоятельности ее оценок должны быть достаточно высокими. Защищенность от случайных выбросов достигается за счет резервирования пунктов наблюдений. При этом важно, чтобы оценки в разных пунктах можно было сравнивать корректно. Влияние грунтовых условий станций может менять амплитуды более чем в два и более раза вверх и вниз, а макросейсмическую интенсивность до  $\pm 1.5$  балла. Поэтому для получения усредненной оценки макросейсмической интенсивности по кусту станций и необходимо рассчитать станционные поправки.

## 1.1. ПОДБОР СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ ИЗ ДАННЫХ КАМЧАТСКОЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ ДАННЫХ

С 1.01.2014 по 08.08.2014 СП СПЦ было зафиксировано 661 землетрясение. Для данного этапа было решено отобрать 20 землетрясений с наибольшей энергетикой и наименьшей удаленностью, так как сильные и не удаленные землетрясения наилучшим образом позволят выделить станционные поправки. Данные об отобранных землетрясениях занесены в таблицу 1. Эпицентры землетрясений показаны на рисунке 1.



*Рис. 1. Эпицентры исследуемых землетрясений, выбранных для первой части работы*

Таблица 1.1.

*Характеристика землетрясений, выбранных для оценки станционных поправок*

| № п/п | Дата       | $\Delta$ РЕТ, <sup>о</sup> | Время прихода Р-волны | Время прихода S-волны | Энергетические характеристики                    |
|-------|------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|
| 1     | 10.01.2014 | 5.4                        | 18:04:20.2            | 18:05:22.2            | K <sub>s</sub> =12.6, MPSP=5.8, MS=4.2, MS20=3.8 |
| 2     | 12.03.14   | 4.6                        | 18:19:48              | 18:20:41.5            | K <sub>s</sub> = 12.1, MPSP = 5.8                |
| 3     | 04.07.14   | 3.1                        | 9:35:36               | 9:36:12               | K <sub>s</sub> = 13.1, MSPS = 5.8, MS = 3.8      |
| 4     | 17.04.14   | 6.9                        | 23:01:30              | 23:02:49              | MS = 4.4, MPSP = 5.5                             |
| 5     | 18.04.14   | 4.5                        | 20:59:39              | 21:00:31              | K <sub>s</sub> =11.5, MPSP=5.5, MS=4.3           |
| 6     | 20.04.14   | 2.6                        | 13:51:23              | 13:51:53              | K <sub>s</sub> = 13.2, MPLP = 6.5, MSLP=6.3,     |
| 7     | 26.04.14   | 5.4                        | 13:57:17              | 13:58:18              | K <sub>s</sub> =12.0, MPSP=5.2, MS=3.8, MS20=3.9 |
| 8     | 08.05.14   | 3.8                        | 15:53:44              | 15:54:28              | K <sub>s</sub> = 11.9, MPSP = 5.3, MS = 3.9,     |
| 9     | 29.05.14   | 3.7                        | 05:14:35              | 05:15:17              | K <sub>s</sub> =11.5, MPSP=5.2, MS=3.5, MS20=3.5 |
| 10    | 31.05.14   | 4.3                        | 06:18:03              | 06:18:53              | K <sub>s</sub> =13.1, MPSP=6.1,MS=5.0            |
| 11    | 31.05.14   | 4.3                        | 09.36.22              | 09.37.11.7            | K <sub>s</sub> =11.6, MPSP=5.3, MS=3.7           |
| 12    | 07.06.14   | 2.6                        | 13:12:16              | 13:12:47              | K <sub>s</sub> =13.0, MS=4.4, MS20=4.1           |
| 13    | 22.06.14   | 5.9                        | 09:49:12              | 09:50:20              | K <sub>s</sub> =11.4, MPSP = 5.0                 |
| 14    | 23.06.14   | 12.3                       | 20:56:01              | 20:58:16              | MPSP=7.7, MS=6.9, MS20=6.9                       |
| 15    | 23.06.14   | 11.3                       | 21:33:35              | 21:35:45              | K <sub>s</sub> =13.4, MPSP=6.2,MS20=5.5          |
| 16    | 24.06.14   | 10.7                       | 03:18:14              | 03:20:13              | MPSP=6.1, MS=6.3, MPLP=6.5,                      |
| 17    | 03.07.14   | 5.1                        | 12:06:41              | 12:07:40              | K <sub>s</sub> =13.3, MPSP=6.2, MS=5.5, MS20=5.5 |
| 18    | 09.07.14   | 4.1                        | 13:36:21              | 13:37:09              | K <sub>s</sub> =12.4, MPSP=5.2, MS=3.7, MS20=4.0 |
| 19    | 15.07.14   | 3.8                        | 12:56:06              | 12:56:51              | K <sub>s</sub> =11.6, MPSP=5.6, MS=3.8           |
| 20    | 19.07.14   | 5.3                        | 09:29:03.5            | 09:30:04              | K <sub>s</sub> =12.1, MS=3.8, MS20=4.2           |

## **1.2. ПОДГОТОВКА ОТОБРАННОГО МАТЕРИАЛА. ВЫБОР ИССЛЕДУЕМЫХ СТАНЦИЙ**

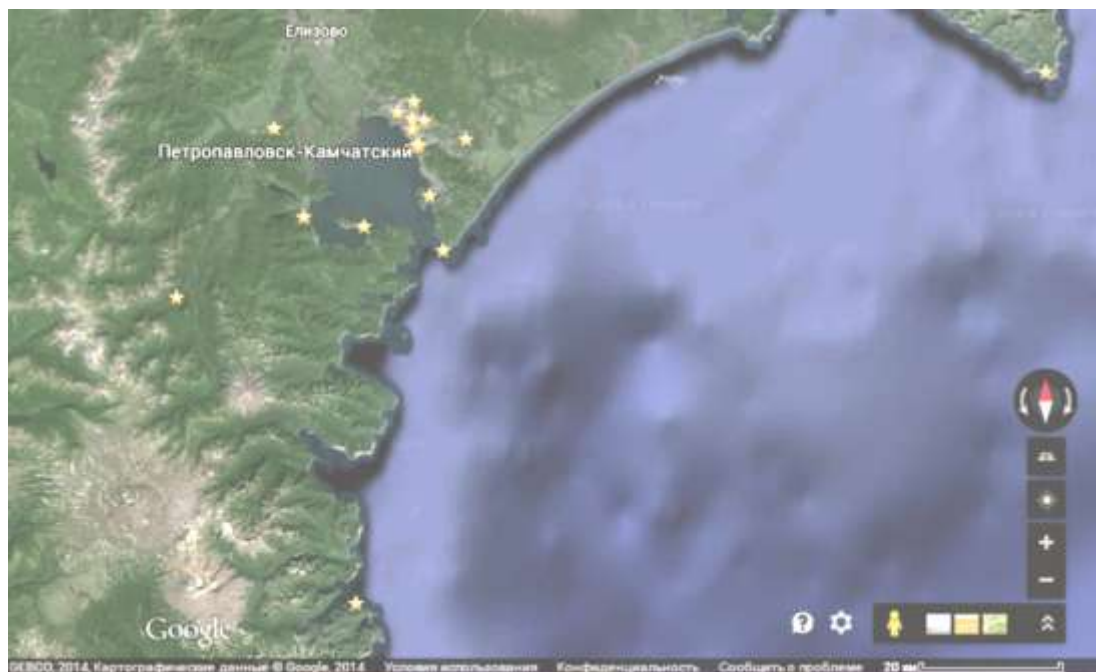
Для определения спектральных поправок недостаточно простой записи землетрясения. Для получения качественного результата необходимо выбрать из отобранных записей интервалы шума и интервалы поперечной волны, причем время записи шума должно значительно превосходить время записи S-волны.

Время вступления S-волны определялось из окончательного каталога СПЦ. Временной интервал записи S-волны составлял 30 секунд, интервал записи шума – 300 секунд.

В идеальном случае спектральные характеристики станций следовало бы определять относительно мантии (абсолютные). Однако на практике приходится пользоваться относительными спектральными характеристиками, когда за базу используется спектр, записанный на определенной опорной станции. В качестве таких станций обычно привлекаются долговременные стационарные пункты регистрации, например опорные станции сейсмической сети ГС РАН. К тому же, желательно, чтобы комплект оборудования был установлен в хороших условиях. В случае группы приборов, расположенных в окрестностях Петропавловска-Камчатского за опорный пункт, следует принять станцию «Петропавловск» (РЕТ).

### 1.2.1. Подборка станций для оценки спектральных поправок

Основным критерием для выбора станций являлось их удаление от базовой станции. Все станции были выбраны из Петропавловского куста (рис. 2). Основные характеристики станций приведены в таблице 2.



*Рис. 2. Станции, выбранные для исследования*

Таблица 2

## Исследуемые станции Камчатской региональной сейсмической сети

|    | Название станции                        | Код         | Тип прибора            | Координаты<br>φ, N, λ, E | Грунты<br>(А.Петухин,<br>отчет 1999<br>Шевченко, отчет<br>2007) |
|----|-----------------------------------------|-------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1  | Администрация                           | <b>ADM</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 53.023<br>158.650        | мягкий,<br>насыпная<br>галечная супесь                          |
| 2  | Дальний                                 | <b>DAL</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 53.031<br>158.753        | уплотнённый<br>(щебень, скала)                                  |
| 3  | Улица Дачная                            | <b>DCH</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 53.057<br>158.639        | уплотнённый<br>(щебень, скала)                                  |
| 4  | Институт<br>вулканологии<br>сейсмологии | <b>IVS</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 53.066<br>158.608        | консолидированный (глыбы,<br>щебень, глина)                     |
| 5  | Карымшино                               | <b>KRM</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 52.828<br>158.131        | консолидированный, (глыбы,<br>щебень, глина)                    |
| 6  | Маяк<br>Петропавловск                   | <b>MPPA</b> | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 52.887<br>158.704        | скальный                                                        |
| 7  | Мишенская<br>сопка                      | <b>MSN</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 53.044<br>158.639        | скальный                                                        |
| 8  | Николаевка                              | <b>NIC</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 53.045<br>158.341        | неконсолидированный, (гравий,<br>глина)                         |
| 9  | НИИГТЦ                                  | <b>NIH</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 53.080<br>158.641        | консолидированный, (глыбы,<br>щебень, глина)                    |
| 10 | с/ст.<br>Петропавловск                  | <b>PET</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 53.024<br>158.653        | габбро-диабазы                                                  |
| 11 | с/ст.<br>Петропавловск                  | <b>PKC</b>  | Цифровая GSR-24+131 A  | 53.024<br>158.653        | габбро-диабазы                                                  |
| 12 | Рыбачий                                 | <b>RIB</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 52.917<br>158.533        | консолидированный (глыбы,<br>щебень, глина)                     |
| 13 | Русский                                 | <b>RUS</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 52.432<br>158.513        |                                                                 |
| 14 | Школа                                   | <b>SCH</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 52.958<br>158.674        | консолидированный, (глыбы,<br>щебень, глина)                    |
| 15 | Мыс<br>Шипунский                        | <b>SPN</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 53.106<br>160.011        | скальный                                                        |
| 16 | Спортивный<br>лагерь<br>«Звездный»      | <b>SPZ</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 53.056<br>158.666        |                                                                 |
| 17 | Вилючинск                               | <b>VIL</b>  | Цифровая GSR-24+CMG-5T | 52.931<br>158.404        | Консолидированный (глыбы,<br>щебень, глина)                     |

### 1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПОПРАВOK

Определение спектральных поправок станций Камчатской региональной сейсмической сети производилось в программном пакете MATLAB. Процесс получения итогового результата состоял из 4-х этапов.

На первом этапе производилось считывание записей из файлов программы DIMAS – основной рабочей программы СПЦ. Отдельно считывались файлы записи шума и файлы записи S-волны.

На втором этапе проводилась математическая обработка информации, которая представляла собой выделение сглаженного по 5 точкам амплитудного спектра Фурье считанных записей.

После этого спектры шума и S-волны накладывались друг на друга и из них выделялись «эффективные» области, т.е. те, где значение спектра S-волны в 5-10 раз превышает значения спектра записи шума.

Собственно спектральные поправки находились как отношение «эффективных» областей исследуемой станции к станции РЕТ. Графические иллюстрации каждого из этапов приведены на рисунках 3 – 6.

Ниже приведен фрагмент кода, по которому велись вычисления

```
S= track_S; %считываем записи S-волны

Noize= track_Noize; %считываем записи шума

% определяем число каналов и длину записи
[len wid]=size(S);
[len2 wid2]= size (Noize);

% выбираем наименьшую по времени из двух записей
if len ~= len2
    len1 = min(len, len2);
end;
FS=zeros(len1,wid);
FN=zeros(len1, wid2);
S2=zeros(len1,wid);
N2=zeros(len1,wid2);
SCS=zeros(len1-5,wid);
SCN=zeros(len1-5,wid2);

% Вычисляем модуль Фурье-спектра
for j=1:wid
    S1=S(1:len1,1:j);
```

```

FS(:,j) = fft(S1(:,j));
S2(:,j) = real(FS(:,j)).^2 + imag(FS(:,j)).^2;
end
for t = 1:wid2
Noize1=Noize(1:len1,1:j);
FN(:,t) = fft(Noize1(:,t));
N2(:,t)=real(FN(:,t)).^2 + imag(FN(:,t)).^2;
end

%сглаживаем полученный частотный спектр
for j= 1:wid
for i = 3 : len1-2
SCS(i-2,j)=sum(S2(i-2:i+2,j))/5);
end;
end;

for t=1:wid2
for k = 3 : len1-2;
SCN(k-2,t) = sum(N2(k-2:k+2,t))/5;    %mean(A2(i-2:i+2));
end;
end

```

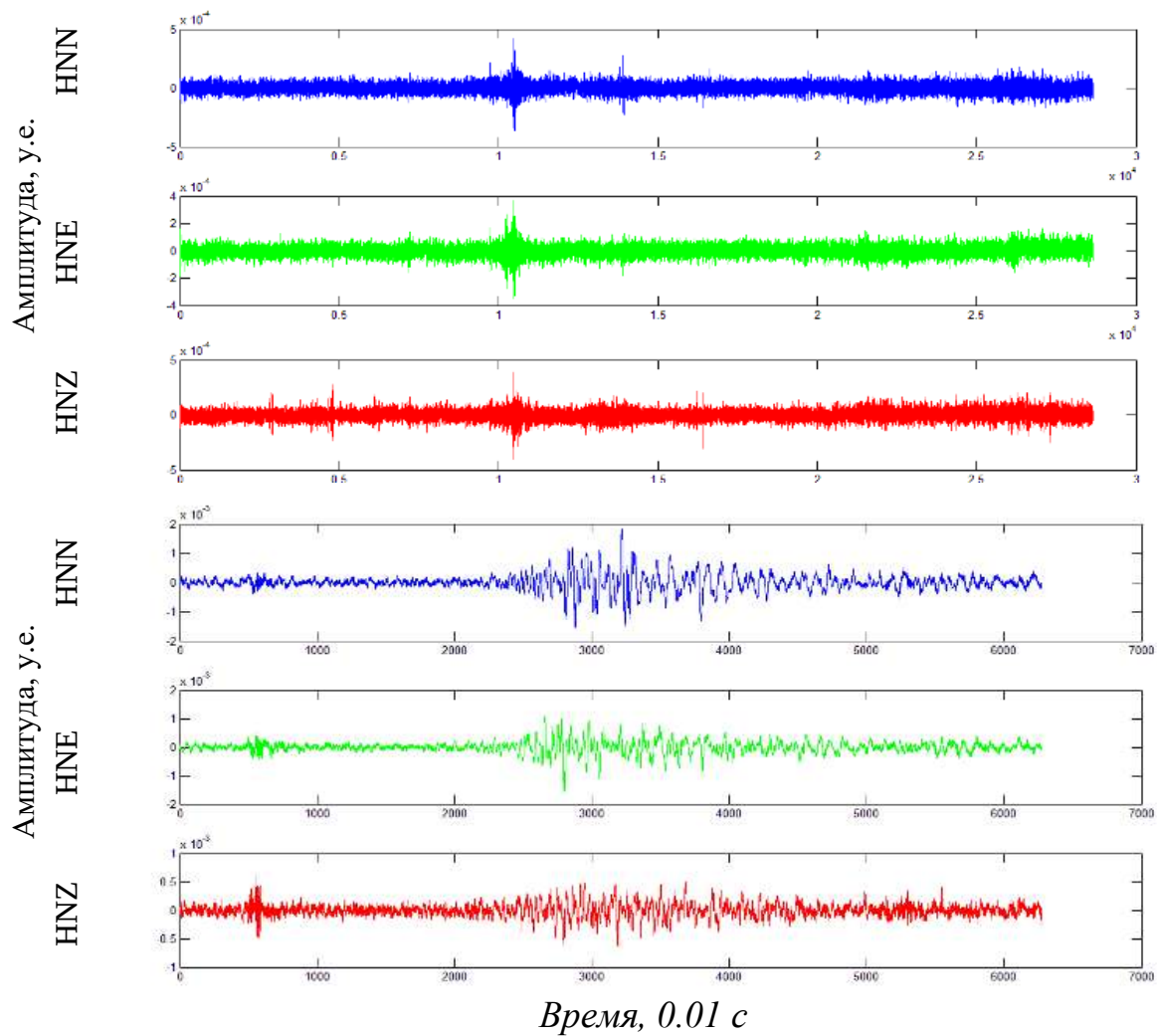


Рис. 3. Запись  $S$ -волны (снизу) и шума (сверху) для станции DCH (землетрясение 07.03.2014)

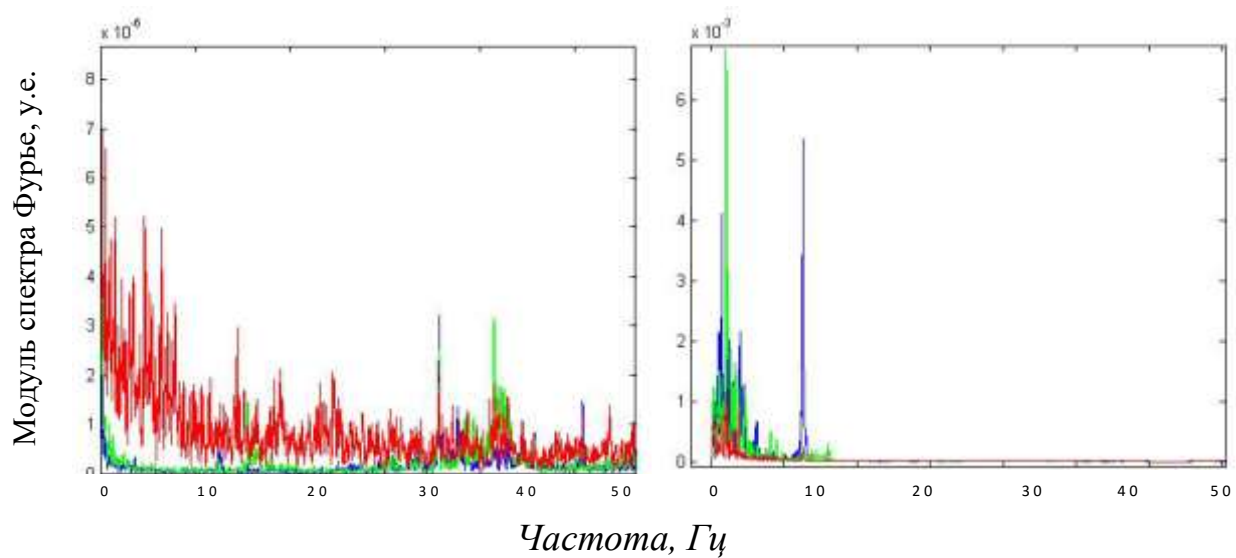


Рис. 4. Сглаженные спектры Фурье  $S$ -волны (справа) и шума (слева)

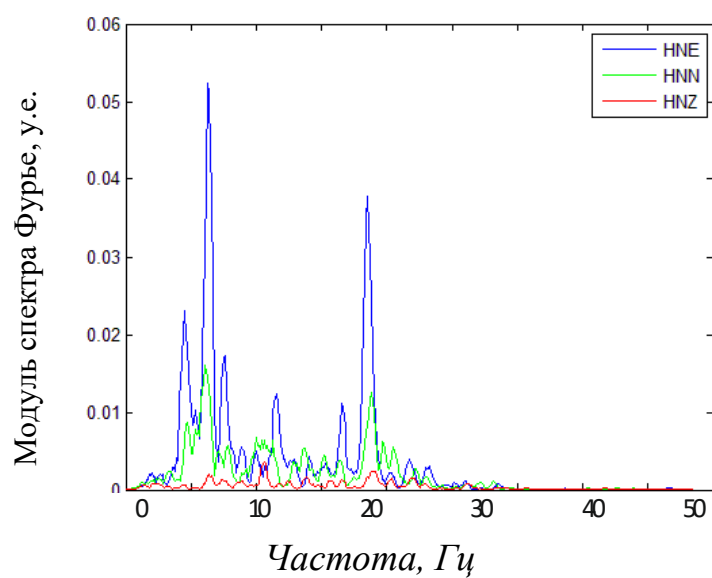


Рис. 5. «Эффективные» участки записи для станции DCH (землетрясение 07.03.2014)

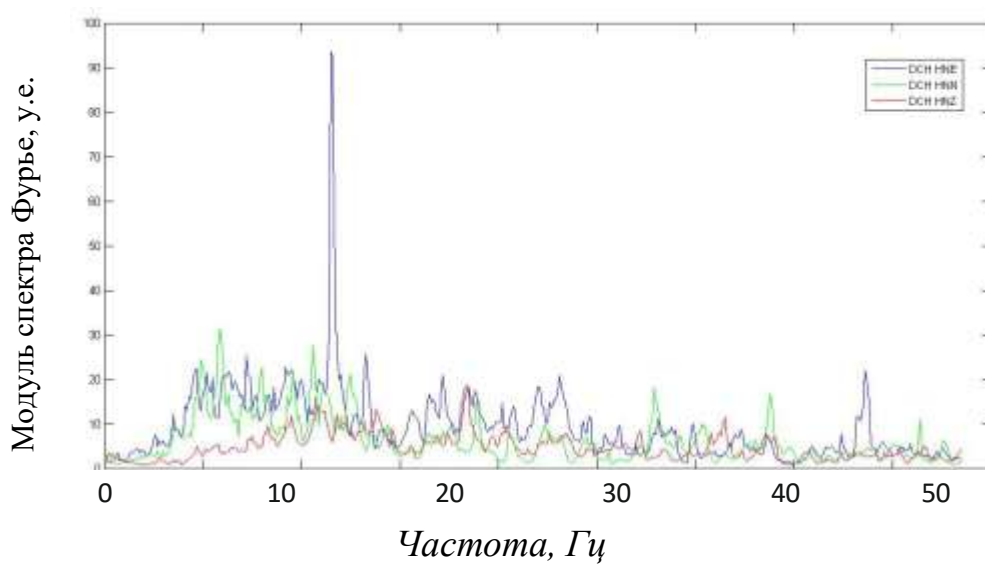


Рис. 6. Относительные спектральные поправки для HNE, HNN и HNZ каналов станции DCH

## ВЫВОДЫ К ЧАСТИ 1

В первой части работы была рассмотрена проблема влияния поверхностной части разреза на показания сейсмостанций и, как следствие, искажения сигнала из очага землетрясения. Для учета этой помехи предлагалось сравнить записи, полученные на базовой станции, стоящей на скальных породах с записями станций, стоящих на грунтах различного типа, проанализировать частотные спектры этих записей и выделить те частоты, которые «глушатся» верхней частью разреза или наоборот, порождаются в ней.

Однако стоит отметить, что верхняя часть разреза – далеко не единственный источник помех, оказывающих влияние на показания сейсмостанций.

Одним из таких факторов являются приливные модуляции, действующие со стороны Солнца и Луны.

## ЧАСТЬ 2. РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРИЛИВНЫХ КОМПОНЕНТ НА ПОКАЗАНИЯ СЕЙСМОСТАНЦИЙ

### 2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИЛИВНЫХ СИЛАХ

В данном исследовании рассматривается вопрос о том, насколько велико влияние данных сил на литосферу, и как следствие, на сейсмологическую активность нашей планеты.

Данную задачу определенно стоит решать поэтапно, ибо она предполагает учет многих факторов и неоднородностей (в частности, плотностной и рельефной).

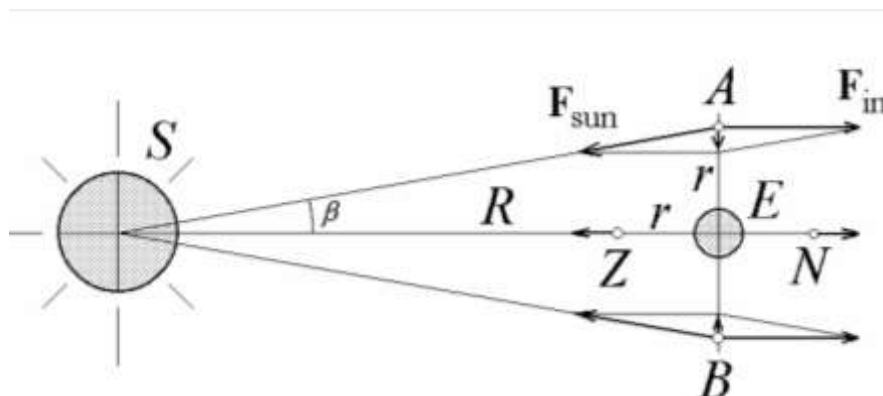


Рис. 7. Происхождение приливных сил вблизи Земли в неоднородном поле солнечного (лунного) тяготения [1]

Рисунок 7 схематически иллюстрирует происхождение и свойства приливообразующих сил, вызванных Солнцем.

Сила тяжести в каждой точке земной поверхности претерпевает с течением времени незначительные изменения в результате притяжения Луны и Солнца, изменения скорости и наклона оси вращения Земли, перемещения воздушных масс, изменения уровня океана и др. Из этих факторов, определяющих нестационарные аномалии силы тяжести, главными являются лунно-солнечные возмущения.

Необходимо принимать во внимание, что взаимное положение Луны и Солнца – величина переменная, поэтому для разных положений на одну и ту же точку будет оказываться разное суммарное воздействие. Суммарная величина

горизонтальной компоненты приливной силы находится сложением аналогичных компонент для Солнца и Луны при соответствующих их положениях.

Для примера рассмотрим случай, приведенный на рисунке 8.

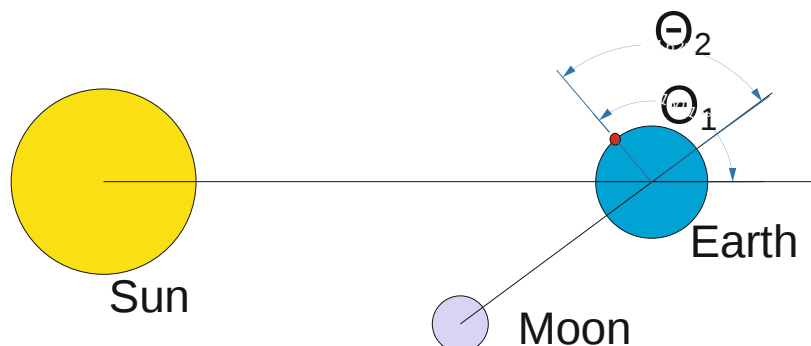


Рис. 8. Пример взаимного расположения Солнца и Луны

Для экваториальной широты величина горизонтальной составляющей приливной силы, действующей со стороны Солнца и Луны на точку, будет находиться по формуле (2). В первом случае будет задействован угол  $\theta_1$ , во втором –  $\theta_2$ . Общее значение горизонтальной компоненты будет находиться путем сложения этих двух величин.

Действие притяжения Луны и Солнца проявляется в деформации поверхности, определяющей фигуру Земли. Величина и направление деформации в конкретной точке физической поверхности определяется взаимным положением Земли, Луны и Солнца. Максимальная амплитуда колебаний земной поверхности из-за влияния Луны и Солнца составляет 51 см в области экватора и уменьшается до 40 см в поясе широт 50-60°. В океанах лунно-солнечные возмущения вызывают океанские приливы, высота которых в некоторых областях Земли достигает нескольких метров: 13,6 м – в заливе Фанди (Канада), 12,6 м – в бухте Сен-Мишель (Франция) и др.

Явление океанских приливов очень сложно. Величина приливов зависит от протяженности свободной поверхности воды, от местоположения точки, где рассматривается прилив, от характера берегов, от течений, направления и

скорости ветра и др. Но основной причиной, порождающей их, являются лунно-солнечные возмущения.

В статической теории приливов для приливообразующего (приливного) потенциала Луны и Солнца выводится формула [21]

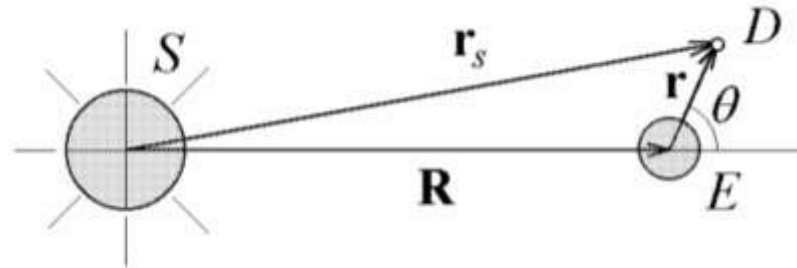
$$T_{\Pi} = -\frac{fm}{2} \frac{a^2}{r^3} (3 \cos^2 \theta - 1) \quad (1)$$

где  $m$  - масса возмущающего тела (Луны или Солнца);

$a$  - средний радиус Земли;

$r$  - геоцентрическое расстояние до центра возмущающего тела;

$\theta$  - геоцентрическое зенитное расстояние.



*Рис. 9. Переменные  $r$  и  $\theta$ , используемые для указания положения произвольной точки вблизи Земли [1].*

Представление зенитного расстояния в виде

$$\cos \theta = \sin \varphi \sin \delta - \cos \varphi \cos t \quad (2)$$

где  $t$  - часовой угол;

$\delta$  - склонение Луны (Солнца);

$\varphi$  - широта точки земной поверхности

При выводе формулы (1) были учтены только малые величины первого порядка. В настоящее время при учете влияния Луны принято рассматривать и малые величины второго порядка. Кроме этого вводится поправка на смещение уровенной поверхности (поправка Гонкасало), которая учитывает изменение силы тяжести, возникающее в результате действия зональных приливных волн.

В окончательном виде полная поправка к силе тяжести, вводимая в настоящее время на приливный эффект, определяется выражениями:

для вертикальной компоненты

$$\begin{aligned} \delta g_{II}^N = & 1,2 f m_{\text{л}} \frac{a}{r_{\text{л}}^3} (\cos^2 z_{\text{л}} - 1) + 1,8 f m_{\text{л}} \frac{a^2}{r_{\text{л}}^4} (5 \cos^3 z_{\text{л}} - 3 \cos z_{\text{л}}) + \\ & + 1,2 f m_{\text{с}} \frac{a}{r_{\text{с}}^3} (\cos^2 z_{\text{с}} - 1) + 0,457 f a \left( \frac{m_{\text{л}}}{r_{\text{л}}^3} + \frac{m_{\text{с}}}{r_{\text{с}}^3} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

Для горизонтальной компоненты

$$\delta g_{II}^{\Gamma} = 1,8 f a \left( \frac{m_{\text{л}}}{r_{\text{л}}^3} \sin 2z_{\text{л}} + \frac{m_{\text{с}}}{r_{\text{с}}^3} \sin 2z_{\text{с}} \right) \quad (4)$$

Отметим, что в приведенных выражениях по сравнению с формулой (1) присутствует коэффициент 1,2. Этим коэффициентом учитывается отличие упругой (реальной) Земли от твердой.

Далее необходимо принимать во внимание, что взаимное положение Луны и Солнца – величина переменная, поэтому для разных положений на одну и ту же точку будет оказываться разное суммарное воздействие. Для того, чтобы решить этот вопрос необходимо учесть изменение расстояния от точки на поверхности Земли до Луны и Солнца, а так же изменения угла наклона двух данных тел.

Учитывая выше представленные условия, была написана программа, рассчитывающая значения изменения вертикальной и горизонтальной компонент силы тяжести, вызванные лунно-солнечными приливными силами на заданной области координат, за заданный промежуток времени, значения которых представлены на рисунках 10 и 11. Так же ниже представлена часть кода этой программы в среде МАТЛАБ

```

% Задаем значения периода времени, за который будет рассчитываться
значения
% приливных модуляций

year_from = input('input start year ');
month_from = input('input start month ');
day_from = input('input start day ');
hour_from = input('input start hour ');
min_from = input('input start minute ');
sec_from = input('input start second ');

year_to = input('input end year ');
month_to = input('input end month ');
day_to = input('input end day ');
hour_to = input('input end hour ');
min_to = input('input end minute ');
sec_to = input('input end second ');

step_hours = input('input step in hours ');

differ = datenum(year_to,month_to, day_to, hour_to, min_to,
sec_to) - datenum(year_from, month_from, day_from, hour_from,
min_from, sec_from);

% Задаем координаты площади, для которой будут проводиться
расчеты
long_min = input ('input minimum longitude ');
long_max = input('input maximum longitude ');
lat_min = input ('input minimum latitude ');
lat_max = input('input maximum latitude ');
step_grid = input('input step of the grid ');

num_time = differ*24/step_hours+1;
num_long=(long_max-long_min)/step_grid;
num_lat=(lat_max-lat_min)/step_grid;

%считываем значения расстояния до Солнца и Луны
moon_file = dlmread('model_-10_10_moon.txt');
sun_file = dlmread('model_-10_10_sun.txt');

%разбиваем файл на массивы со значениями расстояний для каждого
момента
%времени
for k=2:num_time
    q(k)=(k-1)*(num_lat+3)+3;

moon_new(:,:,1)=moon_file(3:(num_lat+3),2:(num_long+2));

moon_new(:,:,k)=moon_file(q(k):q(k)+num_lat,2:(num_long+2));
    sun_new(:,:,1)=sun_file(3:(num_lat+3),2:(num_long+2));

sun_new(:,:,k)=sun_file(q(k):q(k)+num_lat,2:(num_long+2));
end;

```

```

%% Для Солнца
% Определяем начало солнечного года по минимальному расстоянию до
Солнца
for wo=2:num_time-1
    if min(min(sun_new(:, :, wo-1))) > min(min(sun_new(:, :, wo))) &
min(min(sun_new(:, :, wo))) < min(min(sun_new(:, :, wo+1)))
        minim_sun(wo)=min(min(sun_new(:, :, wo)));
        [is, js]=find(minim_sun~=0);
        [is1, min_point_sun]=find(minim_sun==min(minim_sun(js)));
    end;
end;

t_s=step_hours*num_time; %вермя Солнечного года в часах
time_grad_sun = t_s/360; % время, за которое Луна поворачивается
на 1 градус
grad_time_sun = 1/time_grad_sun; % кол-во градусов за 1 час

w=(360*3600/86164.090530833); %угловая скорость вращения Земли
k_s=w/grad_time_sun; %коэффициент для расчета фи
alpha_sun=0:step_hours*w:w*num_time*step_hours;%1 год
longitude=long_min:step_grid:long_max;

% Рассчитываем угол поворота точки относительно Солнца
for lat_s=1:num_lat+1
for long_s=1:num_long+1
    for time_s=1:num_time

        fi_s(lat_s,long_s,time_s) = alpha_sun(time_s)-
longitude(long_s);
    end;
end;
end;

%% Для Луны
%находим величину минимального расстояния для определения точки
отсчета (начало "Лунного года")
for n=1:num_time

[i(:,n), j(:,n)]=find(moon_new(:, :, n)==min(min(moon_new(:, :, n))));
    moon_min(n)=moon_new(i(1,n), j(1,n), n);
    [i1, j1]=find(moon_min==min(moon_min));

end;
for z = 2:num_time-1
if moon_min(z)<moon_min(z-1) & moon_min(z)<moon_min(z+1)
    min_point(z)=moon_min(z);
else min_point(z)=0;
end;
end;
[i_min, j_min]=find(min_point~=0);

```

```

for d=2 : length(j_min)-1
    if moon_min(j_min(d))<moon_min(j_min(d-1)) &
moon_min(j_min(d))<moon_min(j_min(d+1))
        min_min_point(d)=moon_min(j_min(d));
    else min_min_point(d)=0;
    end;
end;

[i_min_min, j_min_min]=find(min_min_point~=0);
for k=2:length(j_min_min)
    minim(1)=j_min(j_min_min(1));
    minim(k)= j_min(j_min_min(k))- j_min(j_min_min(k-1));
    minim(length(j_min_min)+1)= num_time-
j_min(j_min_min(length(j_min_min)));
end;

%% Производим расчеты изменения для горизонтальной и вертикальной
компонент ускорения силы тяжести под воздействием приливных сил
G = 6.673*10^-11;

m=10^12;
M=1.9891*10^30;
Ml=7.3477*10^22;
Rz = 6371*10^3;

for lat=1:num_lat+1
    for long=1:num_long+1
        for v=1:num_time;
hor_sun(lat,long,v)=-
3*G*(m*M*Rz/((sun_new(lat,long,v))*10^3)^3)*(sin(fi_s(lat,long,v)*
pi/180)*(-cos(fi_s(lat,long,v)*pi/180)));

ver_sun(lat,long,v)=G*(m*M*Rz/((sun_new(lat,long,v))*10^3)^3)*(-
cos(fi_s(lat,long,v)*pi/180));
        hor_moon(lat,long,v)=-
3*G*(m*Ml*Rz/((moon_new(lat,long,v))*10^3)^3)*(sinfi(lat,long,v))*
(-cosfi(lat,long,v));

ver_moon(lat,long,v)=G*(m*Ml*Rz/((moon_new(lat,long,v))*10^3)^3)*(-
cosfi(lat,long,v));

        ver(lat,long,v)=ver_sun(lat,long,v)+ver_moon(lat,long,v);
        hor(lat,long,v)=hor_sun(lat,long,v)+hor_moon(lat,long,v);
g_hor_sun(lat,long,v)=1.2*G*M*Rz*(3*(cos(fi_s(lat,long,v)*pi/180))
^2-
1)/(((sun_new(lat,long,v))*10^3)^3)+0.457*G*Rz*(Ml/((moon_new(lat,
long,v))*10^3)^3+M/((sun_new(lat,long,v))*10^3)^3);

g_hor_moon(lat,long,v)=1.2*G*Ml*Rz*(3*(cosfi(lat,long,v))^2-
1)/(((moon_new(lat,long,v))*10^3)^3)+1.8*G*Ml*Rz^2*(5*cosfi(lat,lo
ng,v)^3-3*cosfi(lat,long,v))/(moon_new(lat,long,v)*10^3)^4;
        g_hor(lat,long,v)=
g_hor_sun(lat,long,v)+g_hor_moon(lat,long,v);

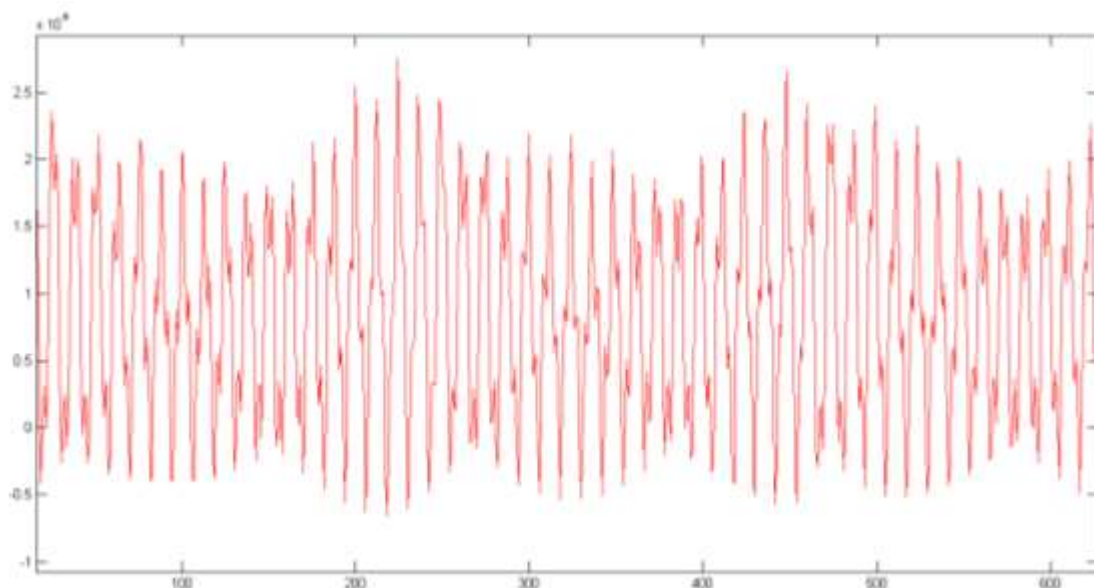
```

```

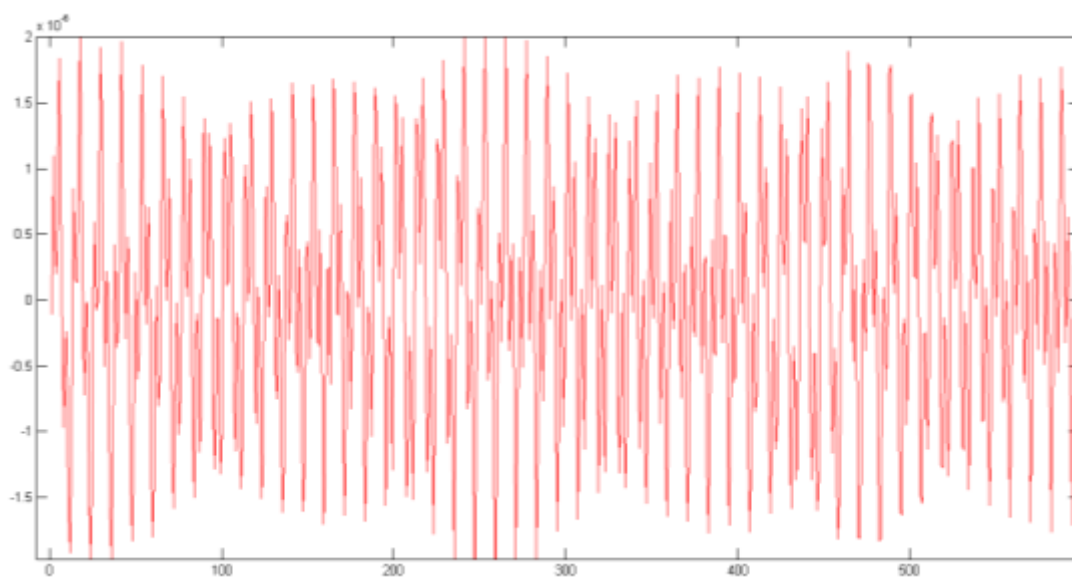
g_ver(lat,long,v)=1.8*G*Rz*((Ml*2*sinfi(lat,long,v)*cosfi(lat,long
,v))/(moon_new(lat,long,v)*10^3)^3+M*2*sin(2*fi_s(lat,long,v)*pi/1
80)/(sun_new(lat,long,v)*10^3)^3);

    ver(lat,long,v)=ver_sun(lat,long,v)+ver_moon(lat,long,v);
    hor(lat,long,v)=hor_sun(lat,long,v)+hor_moon(lat,long,v);
end;
end;
end;

```



*Рис. 10. Значения горизонтальной компоненты изменений силы тяжести в течение 600 часов*

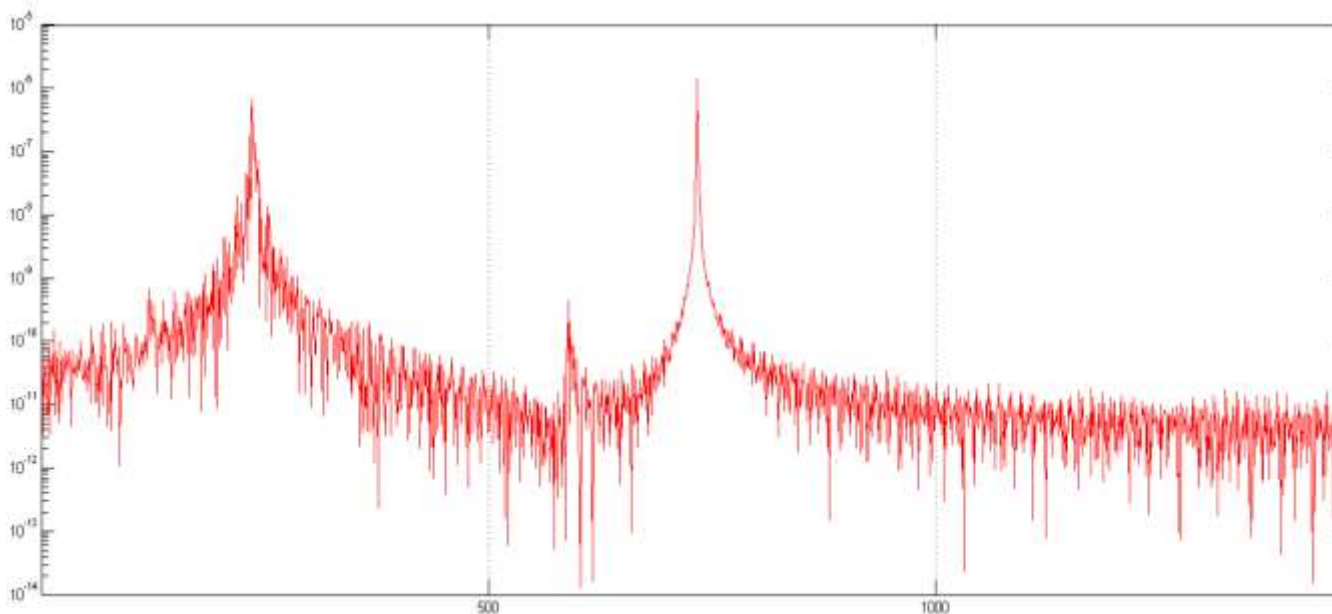


*Рис. 11. Значения вертикальной компоненты изменений силы тяжести в течение 600 часов*

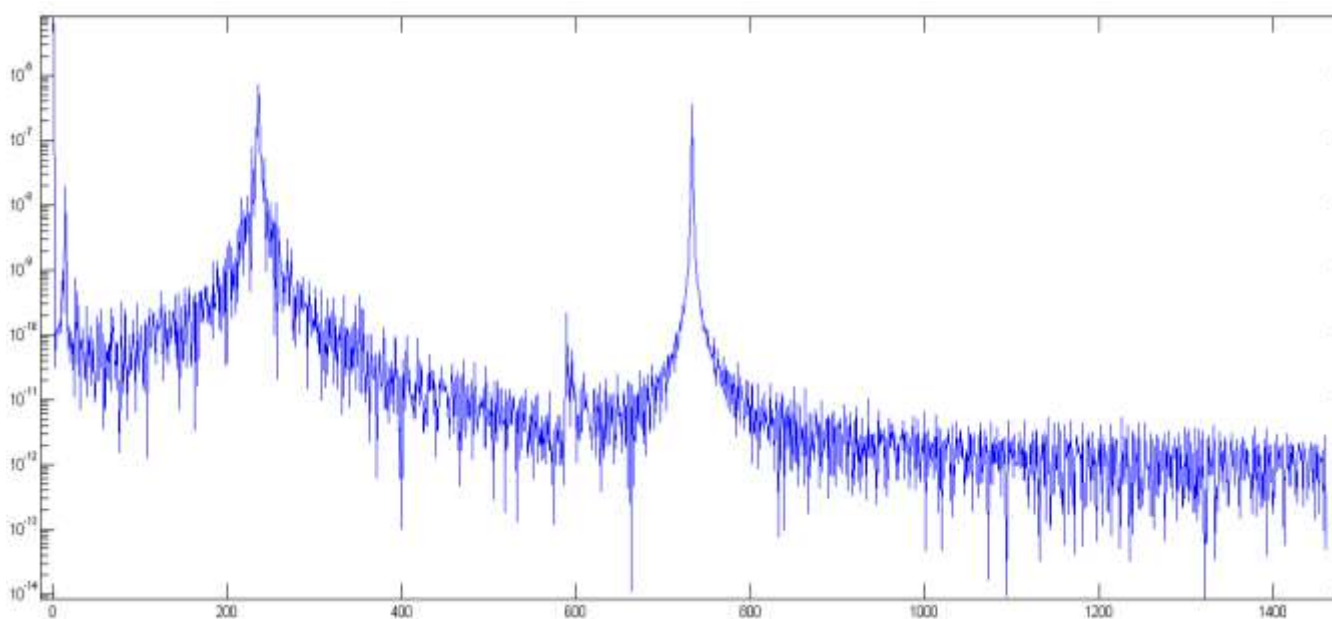
Как видно из рисунка, изменения имеют циклический характер. Принцип калибровки сигнала станций за приливные явления будет состоять в том, что бы улавливать эти циклические изменения в записях станций и отфильтровывать их с целью получения наиболее точного сигнала из очага землетрясения.

Что бы наиболее четко представлять себе, с какой периодичностью происходят колебания ускорения свободного падения, вызываемые лунно-

солнечными приливами, необходимо исследовать Фурье-спектр записи (рис. 12, 13).



*Рис. 12. Фурье-спектр горизонтальной компоненты*



*Рис. 13. Фурье спектр вертикальной компоненты*

Анализируя данные спектры можно выделить два основных частотных пика на обоих графиках – это колебания с полупериодами 29 и 38 суток. Так же на обоих графиках выделяется еще один, с меньшей амплитудой, пик – на отметке 36 суток. Дополнительно, на графике вертикальной компоненты можно наблюдать наиболее высокочастотные колебания – с периодом в 3,5 и 0,25 суток.

Однако, было бы неправильным просто отфильтровывать приливную компоненту, не рассмотрев возможность ее участия в процессе подготовки землетрясения.

Данное предположение не является голословным, так как вопросом о связи приливных сил и землетрясений занимаются уже довольно долго.

Исследования связи приливных явлений с сейсмологической активностью берут свое начало в конце XIX века. Самые ранние статьи из тех, что удалось найти, были написаны Артуром Шустером (Arthur Shuster) [12] и Каргиллом Гильстоном Кноттом (Cargill Gilston Knott) в 1897 и 1896 годах соответственно.

В середине XX века локальные исследования, направленные на выявление зависимости между приливным потенциалом и землетрясениями проводил американский геофизик Леон Кнопофф (Leon Knopoff). В статье *Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes* [7], опубликованной в 1964 году, Кнопофф представил результаты исследований связи приливного потенциала с землетрясениями, произошедшими в южной Калифорнии с 1934 по 1957 гг.

В 90-е годы XX и начале XXI века по данной тематике так же можно найти довольно много исследований.

Так, в 2003 году была опубликована статья *Earthquake Clustering Relative to Lunar Phases in Taiwan*, написанная группой китайских (тайваньских) ученых во главе с Ц. Х. Лин (C. H. Lin) [8], в которой рассмотрели влияние фаз Луны на землетрясения, произошедшие вблизи о. Тайвань в период с 1973 по 1991 годы.

Спектр исследований, проводимых зарубежными учеными в рамках данной тематики за последние 15–20 лет, ни чуть не уменьшился. По-прежнему можно встретить статьи, посвященные взаимосвязи приливных процессов с самыми различными сейсмологическими явлениями — вулканизмом [4], микроземлетрясениями [14] и др.

## 2.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПРИЛИВНЫХ СИЛ С СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

Для изучения влияния приливных сил на сейсмологическую активность были выбраны сильнейшие землетрясения последних лет, произошедшие вблизи экваториальной широты. Данный выбор обусловлен тем, что, во-первых, на экваторе наблюдается наиболее сильное воздействие приливных сил на Земную кору, а во-вторых, количество крупных землетрясений значительно ниже, чем мелких и средних, поэтому удобнее начать именно с них.

Данные о выбранных на первом этапе землетрясениях приведены в таблице 3.

Таблица 3

*Землетрясения, выбранные для первого этапа работы*

| N | Место            | Ms  | Дата       | Время (UTC) |    |    | Широта | Долгота |
|---|------------------|-----|------------|-------------|----|----|--------|---------|
|   |                  |     |            | ч           | м  | с  |        |         |
| 1 | Indonesia        | 8,8 | 26.12.2004 | 0           | 58 | 48 | 3,39   | 95,84   |
|   |                  | 7,3 | 26.12.2004 | 4           | 21 | 26 | 6,8    | 92,86   |
|   |                  | 6,1 | 26.12.2004 | 19          | 19 | 55 | 3,08   | 93,49   |
| 2 | Sumatra          | 8,5 | 11.04.2012 | 8           | 38 | 34 | 2,35   | 92,92   |
|   |                  | 8,2 | 12.04.2012 | 10          | 43 | 7  | 0,85   | 92,5    |
| 3 | Sumatra          | 8,5 | 28.03.2005 | 16          | 9  | 34 | 2,03   | 97,01   |
|   |                  | 5,5 | 28.03.2005 | 23          | 12 | 58 | 2,92   | 96,47   |
| 4 | Sumatra          | 8,3 | 12.09.2007 | 11          | 10 | 23 | -4,4   | 101,48  |
|   |                  | 8,1 | 12.09.2007 | 23          | 49 | 1  | -2,54  | 100,85  |
|   |                  | 7,3 | 13.09.2007 | 3           | 35 | 28 | -2,08  | 99,67   |
| 5 | Papua-New Guinea | 7,7 | 16.11.2000 | 7           | 42 | 14 | -5,54  | 153,42  |
|   |                  | 7,5 | 16.11.2000 | 4           | 54 | 56 | -4,41  | 152,05  |
|   |                  | 6   | 16.11.2000 | 11          | 5  | 39 | -5,33  | 153,09  |
| 6 | Peru             | 7,9 | 15.08.2007 | 23          | 40 | 56 | -13,31 | 283,4   |
|   |                  | 5,6 | 16.08.2007 | 11          | 35 | 30 | -14,34 | 283,06  |

Методика определения влияния приливных сил на эпицентр землетрясения состояла в следующем:

В статической теории приливов для приливообразующего (приливногo) потенциала Луны и Солнца выводится формула

$$F_{\Pi} = -\frac{fMm}{2} \frac{a^2}{r^3} (3\cos^2 \theta - 1)$$

где  $M$  - масса возмущающего тела (Луны или Солнца);

$m$  – масса объекта на поверхности Земли, для которого рассчитывается приливное действие

$a$  - средний радиус Земли;

$r$  - геоцентрическое расстояние до центра возмущающего тела;

$\theta$  - геоцентрическое зенитное расстояние.

Представление зенитного расстояния в виде

$$\cos \theta = \sin \varphi \sin \delta - \cos \varphi \cos t$$

где  $t$  - часовой угол;

$\delta$  - склонение Луны (Солнца);

$\varphi$  - широта точки земной поверхности

Для наглядного представления поместим получившиеся значения углов  $\theta_1$  (для Солнца) и  $\theta_2$  (для Луны) для каждого из землетрясений на график значений модуля суммарного вектора (рис. 14).

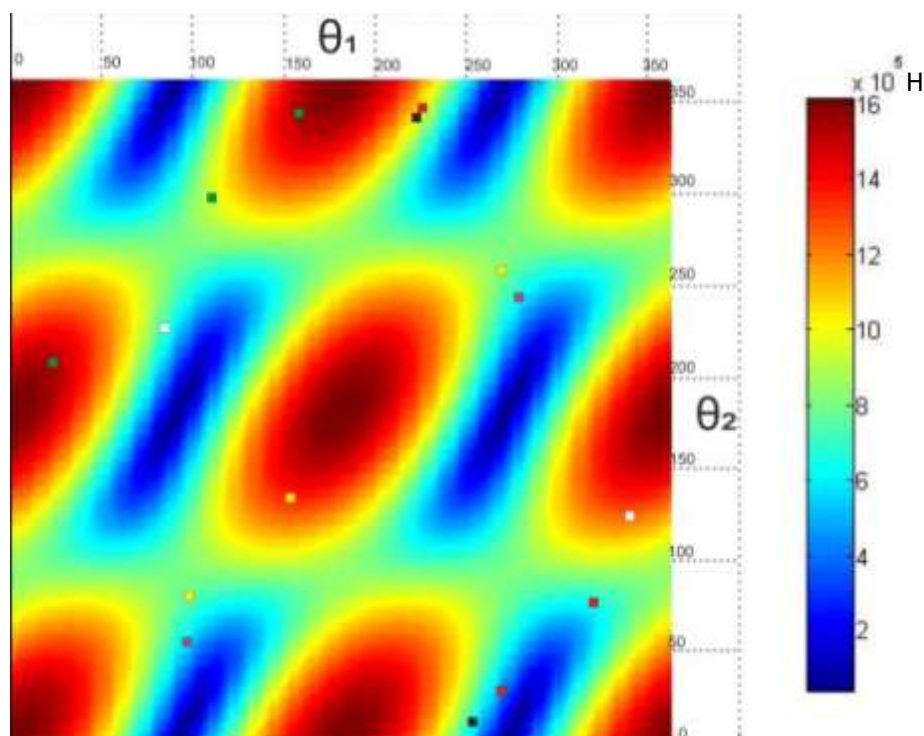


Рис. 14. Землетрясения на графике суммарной величины приливных сил

### Условные обозначения

|                                                                                   |                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|  | Толчки землетрясения в Папуа-Новой Гвинее, 16.11.2000 |
|  | Толчки землетрясения на Суматре 26.12.2004            |
|  | Толчки землетрясения на Суматре 28.03.2005            |
|  | Толчки землетрясения в Перу 15.08.2007                |
|  | Толчки землетрясения на Суматре 12.09.2007            |
|  | Толчки землетрясения на Суматре 11.04.2012            |

Далее, была предпринята попытка установить соответствие между магнитудой землетрясения и значением разных составляющих приливных сил. Результаты этого анализа приведены в таблице 4.

*Таблица 4*

*Результаты сравнительного анализа магнитуд землетрясений и значениями приливных сил*

| М                       | Горизонтальная компонента | Вертикальная компонента | Модуль суммарного вектора |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 8,8                     | 9,55E+05                  | 3,19E+05                | 1006689                   |
| 7,3                     | 6,74E+05                  | 1,38E+06                | 1538128                   |
| 6,1                     | 9,74E+05                  | 1,10E+06                | 1472893                   |
| 8,5                     | 7,87E+04                  | 1,11E+06                | 1114683                   |
| 8,2                     | 5,50E+05                  | 8,38E+05                | 1002616                   |
| 8,5                     | 1,03E+06                  | 4,05E+05                | 1107922                   |
| 5,5                     | 8,86E+05                  | 8,86E+05                | 1252682                   |
| 8,3                     | 3,22E+05                  | 7,43E+05                | 810062,9                  |
| 8,1                     | 1,49E+05                  | 7,49E+05                | 764014                    |
| 7,3                     | 1,13E+06                  | 6,38E+05                | 1294777                   |
| 7,7                     | 7,09E+05                  | 4,54E+05                | 842070                    |
| 7,5                     | 4,76E+04                  | 1,14E+06                | 1141192                   |
| 6                       | 1,59E+04                  | 2,71E+05                | 271488,6                  |
| 7,9                     | 5,18E+05                  | 4,58E+05                | 691215,3                  |
| 5,6                     | 6,52E+05                  | 2,70E+05                | 705825,6                  |
| Коэффициенты корреляции |                           |                         |                           |
|                         | -0,10687                  | 0,010277                | 0,020131                  |

Как видно из таблицы, магнитуда землетрясения никак не связана со значением приливных сил в точке эпицентра в момент толчка. Это говорит о том, что влияние приливных сил нужно рассматривать как накопительный процесс, который в результате может привести к землетрясению. Непосредственно магнитуда землетрясения, по всей видимости, зависит от

совокупности нескольких факторов, и изучение этой зависимости требует большей детальности.

### 2.2.1. Суточные вариации приливных сил

Поскольку было определено, что воздействие приливных сил – величина накопительная, была предпринята попытка изучить, как изменялось действие приливных сил на точку эпицентра землетрясения в течение некоторого времени до самого события. Расчеты производились по следующему алгоритму:

Посредством упомянутой выше программы рассчитывались изменение расстояния между точкой эпицентра землетрясения, Солнцем и Луной, далее рассчитывались углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  для Солнца и Луны соответственно, затем по вышепредставленным формулам производился расчет вертикальной, горизонтальной и суммарной компонент приливных сил.

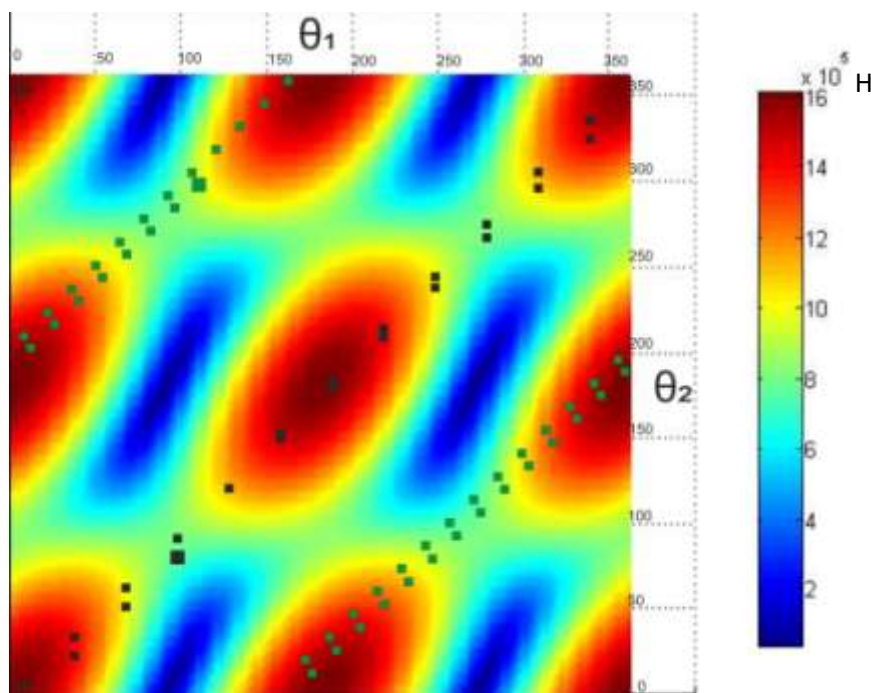


Рис. 15. Изменение действия приливных сил на точки эпицентров землетрясений в течение суток до толчка.

- Воздействие приливных сил на эпицентр землетрясения на Суматре 24.12.2004 в течение суток до момента толчка (сам толчок отмечен увеличенным квадратом), шаг – 1 час
- Воздействие приливных сил на эпицентр землетрясения на Суматре 11.04.2012 в течение суток до момента толчка (сам толчок отмечен увеличенным квадратом), шаг – 2 часа

Как видно из рисунка, как минимум, в течение суток, а на самом деле еще больше, до момента толчка точка эпицентра проходила через максимальные значения действия приливной силы. Из этого можно сделать предположение о том, что землетрясение является результатом повышенного напряжения в земной коре, вызванного прохождением точки эпицентра через повышенные значения действия приливных сил. Однако стоит так же отметить, что таких периодов будет достаточно много (порядка трех в месяц) и сказать в какой именно из них произойдет землетрясение крайне проблематично.

Тем не менее, при дальнейшем исследовании данной проблемы можно найти и другие зависимости, которые смогут дать более представительные данные и позволят наиболее точно понять связь землетрясений с приливными силами.

### 2.2.2. Интегральная характеристика приливных сил

Далее перейдем к рассмотрению интегрального влияния приливных сил на точку в течение определенного времени. Таким образом, мы фактически перейдем к напряженности, создаваемой приливными силами за заданный период времени.

Данная интегральная характеристика рассчитывается по формуле

$$I_{hor} = \cos\beta \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} F_{hor} d\theta \quad (5)$$

$$I_{vert} = \cos\beta \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} F_{vert} d\theta \quad (6)$$

$\beta$  – широтный угол.  $F_{hor}$  и  $F_{vert}$  вычисляются по формулам 3 и 4 соответственно.

Как видно из формул, пределы интегрирования равны от 0 до  $\frac{\pi}{2}$ , то есть четверть периода. Для того, что бы рассмотреть интегральное влияние приливных сил в течение суток, достаточно данную величину умножить на 4. Таким образом, мы получим абсолютную величину напряженности, создаваемой приливными силами в течение суток.

На данном этапе так же является необходимым учесть и другие факторы, такие как высотная и плотностная неоднородности.

*Высотные неоднородности*, по сути, представляют собой учет рельефа местности с той лишь поправкой, что за нулевую линию принимается определенная глубина (порядка 15 км).

*Плотностные неоднородности*. Их учет заключается в том, что бы ввести разность между континентальными и океаническими плитами, плотности которых различны и равны соответственно 2,6 и 3,3 г/см<sup>3</sup>. В идеале, следовало бы учитывать региональные плотностные неоднородности, однако исследований на эту тему очень мало и их учет может производиться разве что для отдельно взятых регионов, где такие исследование проведены.

Общая формула для расчета интегральной характеристики действия приливных сил в определенной точке Земли выглядит следующим образом:

$$E_{hor(i)} = \left(-3G \frac{M}{R^3}\right) \cdot \rho_i l^2 h_i \cdot r \cdot \cos\beta \cdot 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (7)$$

$$E_{vert(i)} = G \frac{M}{R^3} r \rho_i l^2 h_i \cdot r \cdot \cos\beta \cdot 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} (3\cos^2\theta - 1) d\theta \quad (8)$$

$$E_{o(i)} = \sqrt{E_{hor(i)}^2 + E_{vert(i)}^2} \quad (9)$$

$h_i$  – абсолютная высота точки  $i$  над условной нулевой линией,  $l$  – шаг сетки рельефа,  $\rho_i$  – плотность в данной точке.

Данная величина показывает, какая сила накопилась под воздействием Луны и Солнца на определенной территории в течение суток.

Для уточнения нулевой линии были опробованы несколько вариантов: глубина 10 км относительно уровня моря, 15 км, 20 км и 35 км. Наиболее представительной оказалась глубина 15 км. Результаты визуализации представленных выше формул приведены на рисунке 16.

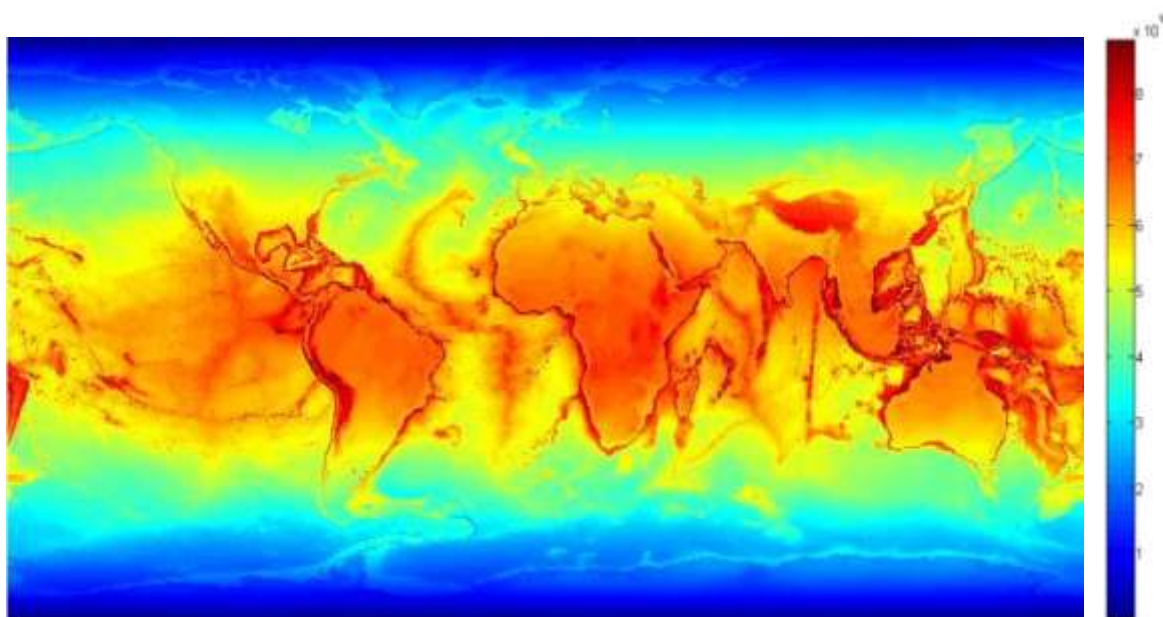


Рис. 16. Интегральное действие приливных сил на поверхность Земли за одни сутки

На данном рисунке хорошо выделяются несколько зон с высокой сейсмологической активностью – Срединно-Океанический хребет, Гималаи, Анды, а так же Индонезийский архипелаг, Океания и др. Так же, относительно своих широт выделяется Алеутская гряда и южное побережье Аляски, где сейсмологическая активность так же высока.

Для наглядного пояснения поместим на рисунок землетрясения магнитудой  $> 4$  баллов, произошедшие в период с 1990 по 2015 год (использовались данные с сайта Геофизической службы США, рисунок 17).

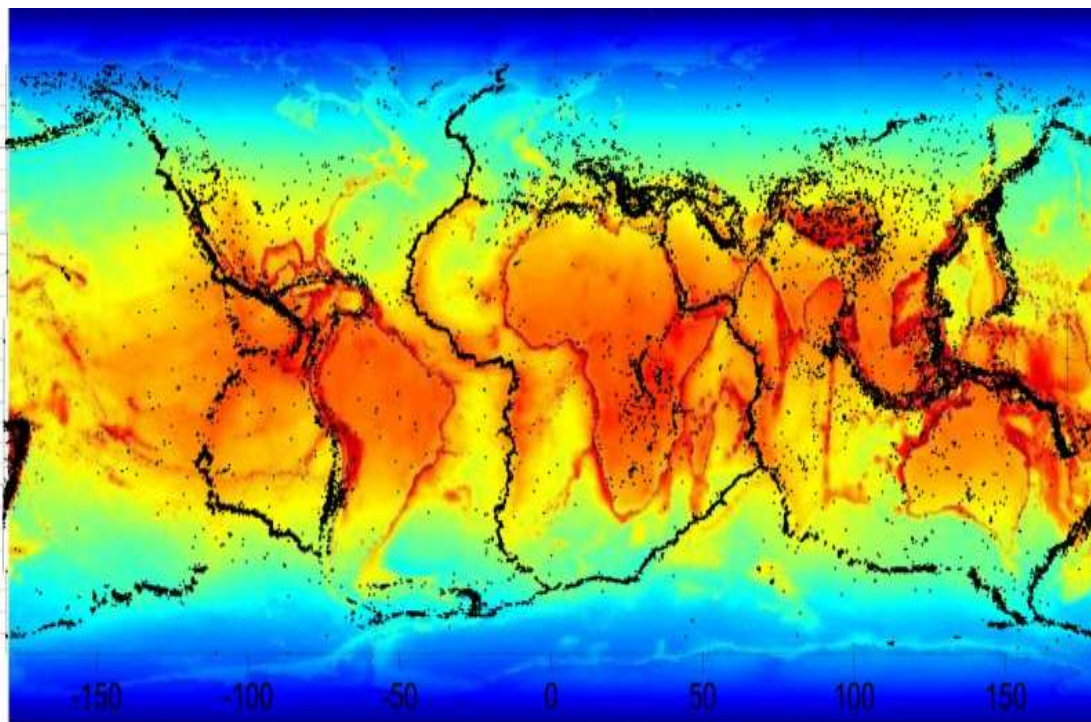


Рис. 17. Землетрясения, наложенные на карту интегрального воздействия приливных сил

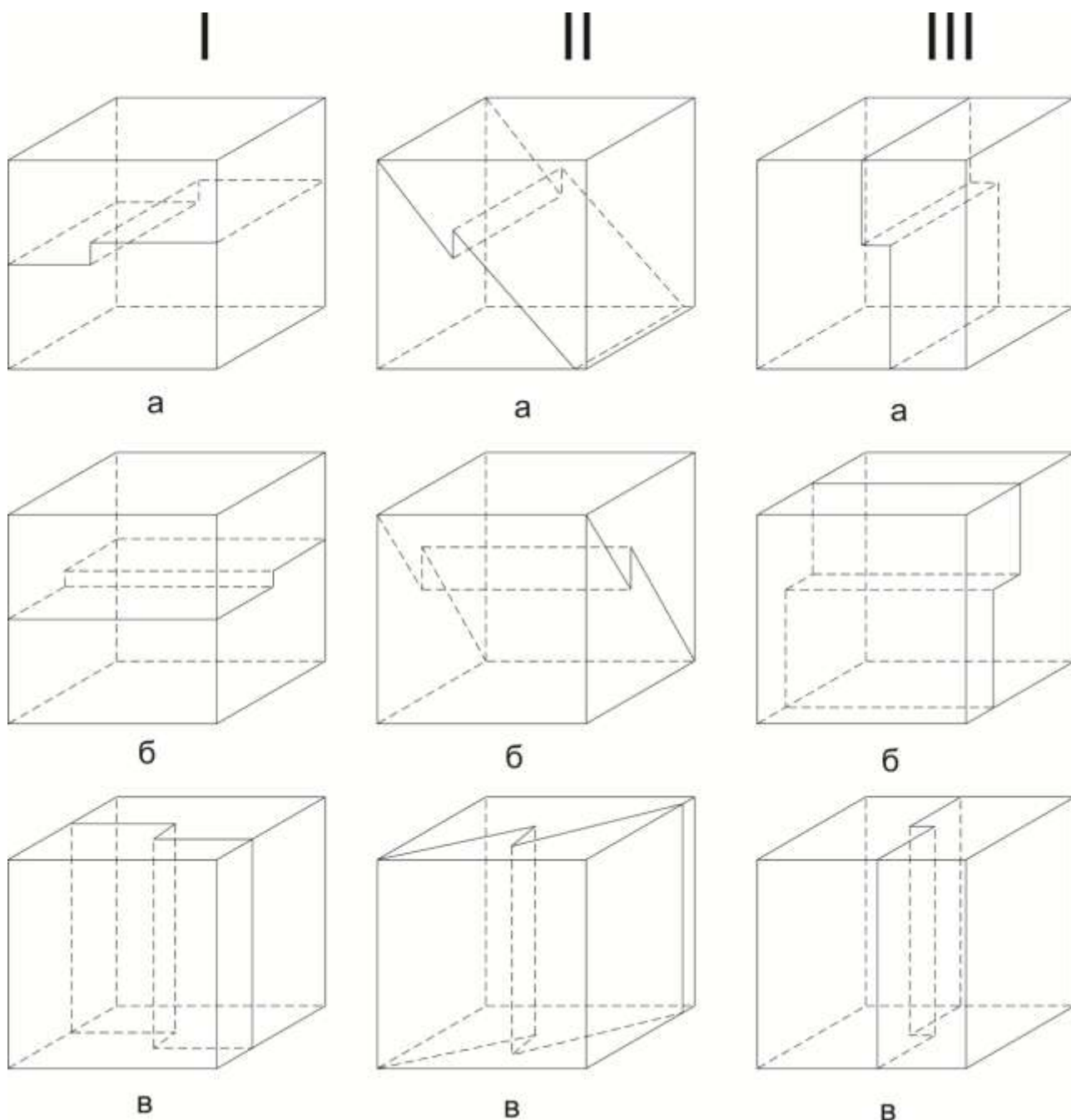
По данному рисунку можно отметить следующее: в общем случае, повышенные значения интегрального воздействия приливных сил вполне соответствуют зонам с повышенным количеством землетрясений, тем не менее, имеются зоны, в которых значения приливных сил велики, однако землетрясений практически нет.

### 2.2.3. Расчет модельной среды

Для того, что бы с наибольшей точностью и достоверностью исследовать взаимосвязь приливных сил и сейсмологической активности следующим шагом исследования является моделирование условной среды и расчета приливных компонент для нее. Модельная среда представляет собой некоторый объем земной коры с заданными размерами. Обязательным условием для такой среды является наличие двух блоков, олицетворяющих участки различных литосферных плит, а так же наличие «зацепа» на границе этих блоков – в котором как раз и будет накапливаться напряжение, приводящее, в последствие к землетрясению.

Что бы рассчитать и проанализировать влияние приливных компонент на процесс накопления напряжения и его разгрузки, задавшись скоростями движения модельных плит рассчитать время, через которое произойдет разгрузка напряжения без учета влияния приливных компонент и с учетом этого влияния. Далее, если результат данной операции будет положителен, произвести переход от абстрактной модели к более реальной, с точной привязкой к реальным тектоническим разломам с повышенной сейсмологической активностью.

Для построения простейшей модели объемной среды согласно заданным условиям, достаточно рассмотреть девять возможных вариантов (рис. 18). В каждом из них условия накопления напряжения будут разными и, как следствие, возможна различная степень влияния лунно-солнечных приливных модуляций.



*Рис. 18. Варианты моделей сред.*

*I – с горизонтальной границей (а – ступень направлена по оси Y, б – X, в – Z),*

*II – с наклонной границей, III – с вертикальной границей*

Для расчета горизонтальной и вертикальной составляющих приливных модуляций необходимо задать координаты поверхности и временной интервал, в котором будут происходить изменения ускорения силы тяжести.

Характеристики заданной поверхности приведены в таблице 5

Таблица 5

## Характеристики расчетной поверхности

|               | Долгота,<br>град. | Широта,<br>град. | Шаг сетки,<br>град. | Интервал              | Шаг времени,<br>час |
|---------------|-------------------|------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| Начальная(ый) | -10               | 0                | 0,5                 | 01.01.2010<br>0:00:00 | 3                   |
| Конечная(ый)  | 10                | 20               |                     | 01.01.2011<br>0:00:00 |                     |

Таким образом, получаем расчетную сеть размером 40x40 точек, в каждой из которых получим 2921 значение ускорения силы тяжести. Зависимость изменения ускорения силы тяжести от времени и долготы приведена на рисунке 19, зависимость от времени и широты – на рисунке 20.

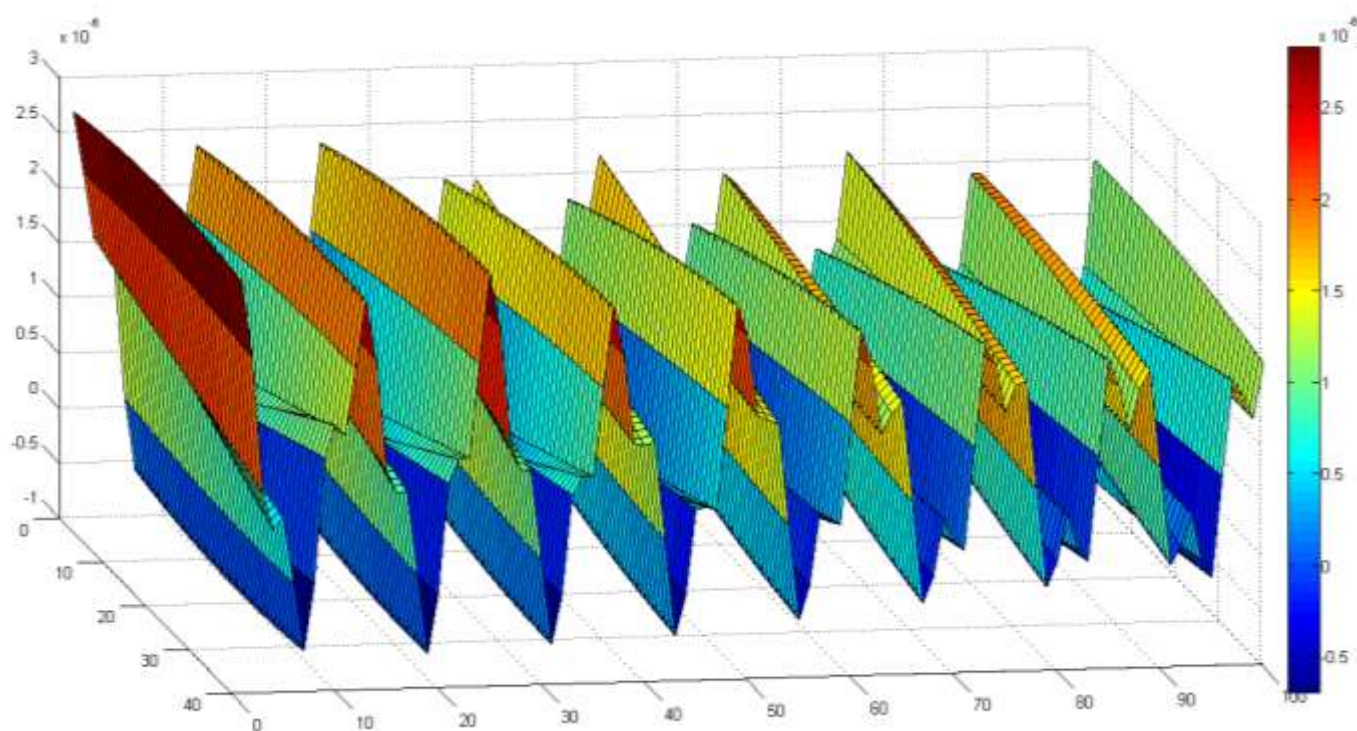


Рис. 19. Изменение вертикальной компоненты ускорения силы тяжести от времени (300 часов) и широты

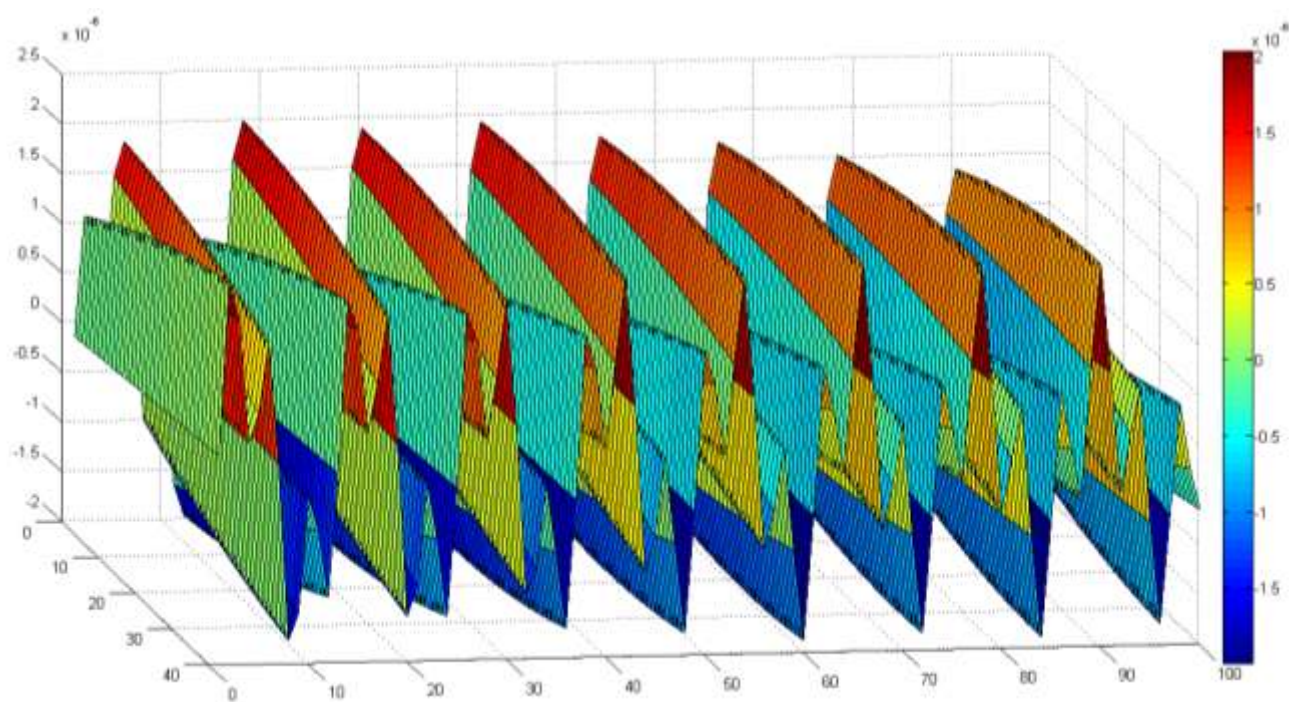


Рис. 20. Изменение вертикальной компоненты ускорения силы тяжести от времени (300 часов) и долготы

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы были исследованы несколько процедур калибровки сейсмологических станций. Стоит отметить, что на сегодняшний день в российских сетях сейсмологических наблюдений ни одна из них еще не применяется, что указывает на новизну работы.

Что касается актуальности исследования помимо тезиса, указанного во введении можно остановиться на еще одном немаловажном факторе.

Экономика России вот уже многие годы практически полностью зависит от углеводородов и, соответственно, вопросам разведки и эксплуатации месторождений нефти и газа уделяется очень большое внимание. Особое внимание в последнее время уделяется разработке шельфовых месторождений. В нашей стране на сегодняшний день активно ведется разработка шельфа Каспийского и Охотского морей, а так же ведутся активные исследования по разработке Арктического шельфа.

Условия разработки месторождений Сахалина с точки зрения сейсмологической обстановки крайне тяжелые – за последние 20 лет в этой области произошло порядка 15 крупных землетрясений с магнитудой, превышающей 6 баллов. Технологически, вопрос о сейсмостойкости нефтяных платформ решен посредством маятниковой скользящей опоры, при этом детальный сейсмологический мониторинг в районе нефтедобывающих платформ не ведется вообще.

Таким образом, проблема повышения точности оценки записей сейсмологических данных в этом регионе стоит особо остро, так как любой не учет данных может привести к аварии на платформе и, как следствие, к экологической катастрофе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Butikov E. *A Dynamical Picture of the Oceanic Tides*. American Journal of Physics, v. 70, No 10 (October 2002) pp. 1001 – 1011.
2. Crockett, R. G. M., Gillmore, G. K., Phillips, P. S. & Gilbertson, D. D. 2006c. Tidal synchronicity of the 26 December 2004 Sumatran earthquake and its aftershocks. Geophys. Res. Lett., 33, L19302, doi:10.1029/2006GL027074.
3. Dicke R. H. Dating the Galaxy by uranium decay, Nature, 194 (1962), pp. 329 – 330.
4. Emter, D. (1997), Tidal triggering of earthquakes and volcanic events, in Tidal Phenomena, edited by H. Wilhelm, W. Zurn, and H. G. Wenzel, pp. 293 – 310, Springer, New York.
5. Heaton, T. H., 1975: Tidal triggering of earthquakes. Geophys. J. R. astr. SOC. (1975) 43, 307-326.
6. Knott C. G. On Lunar Periodicities in Earthquake Frequency. Proc. R. Soc. Lond. 1896 60, 457-466, published 1 January 1896
7. Knopoff, L., 1964. Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes, Bull. seism. SOC. Am., 54, 1865-1870.
8. Lin C. H. Earthquake Clustering Relative to Lunar Phases in Taiwan // C. H. Lin, Y. H. Yeh, Y. I. Chen, J. Y. Liu, K. J. Chen, TAO, Vol. 14, No. 3, 1-10, September 2003
9. Palumbo, A., 1986: Lunar and solar tidal components in the occurrence of earthquakes in Italy. Geophys. J. R. Astr. Soc., 84, 93-99.
10. Rydelek, P. A., P. M. Davies, and R. Y. Koyanagi, 1988: Tidal triggering of earthquake swarms at Kilauea Volcano, Hawaii. J. Geophys. Res., 95, 4401-4411.
11. Shirley, J. H., 1988: Lunar and solar periodicities of large earthquake: Southern California and Alaska-Aleutian islands seismic region. Geophys. J., 92, 403-420.

12. Schuster A. On Lunar and Solar Periodicities of Earthquakes. *Proc. R. Soc. Lond.* 1897 61, 455-465, published 1 January 1897.
13. Tamrazyan G. P. Tide-forming forces and earthquakes, *Icarus* №7(1967), pp. 59 – 65.
14. Wilcock, W. S. D. (2001), Tidal triggering of micro earthquakes on the Juan de Fuca Ridge, *Geophys. Res. Lett.*, 28(20), 3999 – 4002.
15. Авсюк Ю. Н. Приливные силы и природные процессы. Москва. ОИФЗ РАН. 188 с.
16. Авсюк Ю. Н. Связь приливной эволюции системы Земля-Луна с проблемами геодинамики// Вестник Российской Академии Наук. 1996. Т.66 №2 – с.129 – 134;
17. Авсюк Ю.Н. Эволюция системы Земля-Луна и ее место среди проблем нелинейной геодинамики // Геотектоника. 1993. № 1. С. 13-22.
18. Бинкин И. Г., Газарян З. И. «Алгоритм построения сейсмических разрезов-изображений среды по суммоламентам РНИ» // "Прикладная геофизика", вып. 86. М., Недра, 1977, с. 25 – 34.
19. Кочнев В. А. Кинематико-гравитационная модель геодинамо// Геофизический журнал №4, т.35, 2013г. – с. 3 – 15;
20. Лемзиков В. К. «Предварительные оценки стационарных поправок сейсмических станций юга Камчатки и авачинско-корякской группы вулканов»// В.К. Лемзиков, М.В. Лемзиков, В.И. Левина, **Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России**. Труды Второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. – с. 64 – 66;
21. Макоско, А.А. Панин Б.Д. «Динамика атмосферы в неоднородном поле силы тяжести».- СПб.: РГГМУ, 2002. - 245 с.
22. Невинный А.В. «Коррекция сейсмических построений в условиях слоистых сред с криволинейными границами» // "прикладная геофизика", вып.90. М., Недра, 1978, с.17-31.
23. Салтыков В.А., Зайцев В.Ю., Матвеев Л.А. Модель модуляции сейсмических

шумов приливными деформациями // // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. Т.2. С.19-23.

24.Салтыков В.А., Синицын В.И., Чебров В.Н. Вариации приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума в результате изменений напряженного состояния среды // Вулканология и сейсмология. 1997№4. С. 73-83.

25.Степанов М. В. Изучение краткосрочных предвестников землетрясений методом электромагнитной эмиссии : Дис. канд. физ.-мат. наук : 25.00.10 : Москва, 2004 190 с. РГБ ОД, 61:05-1/573.