



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

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА

На тему **Дистанционное ГНСС-зондирование ионосферы с целью определения предвестников землетрясений**

Исполнитель Лазарева Ольга Данииловна

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент

Чукин Владимир Владимирович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор

Кузнецов Анатолий Дмитриевич

«02» июня 2017 г.

Санкт-Петербург 2017



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

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА**

На тему **Дистанционное ГНСС-зондирование ионосферы с целью определения предвестников землетрясений**

Исполнитель Лазарева Ольга Данииловна

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
Чукин Владимир Владимирович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор
Кузнецов Анатолий Дмитриевич

«__» _____ 20__ г.

Санкт-Петербург 2017

Содержание

Введение	4
1 Методы и технические средства измерения полного электронного со- держания ионосферы	6
1.1 Методы мониторинга ионосферы	6
1.1.1 Методы вертикального зондирования	6
1.1.2 Метод некогерентного рассеяния радиоволн	8
1.1.3 Спутниковый метод радиопросвечивания ионосферы ГНСС-сиг- налами	10
1.1.4 Метод наземной регистрации ГНСС-сигналов	10
1.2 Технические средства мониторинга ионосферы	11
1.2.1 Ионозонды	11
1.2.2 Радары некогерентного рассеяния	14
1.2.3 Навигационные спутниковые системы ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou	15
1.2.4 Спутники систем CHAMP, COSMIC, GRACE	19
2 Алгоритм обработки данных о полном электронном содержании ионо- сферы для выявления предвестников землетрясений	25
2.1 Физика процесса подготовки и реализации землетрясений	25
2.2 Внутренние гравитационные волны в атмосфере	26
2.3 Взаимодействие ВГВ с ионосферой	27
2.4 Результаты регистрации ПЭС над районами землетрясений	28
2.5 Описание алгоритма выявления предвестников землетрясения по данным о ПЭС	29
3 Разработка устройства для измерения полного электронного содер- жания	31
3.1 Концепция технологии Arduino	31
3.2 Интегрированная среда разработки программного обеспечения Arduino IDE	32
3.3 Модуль ГЛОНАСС/GPS-приемника uBlox NEO-M8	33
3.4 Микропроцессорный модуль Arduino Nano	33
3.5 Модуль микроконтроллера ESP8266	35

3.6 Алгоритм обработки данных измерений	36
4 Результаты измерений полного электронного содержания ионосферы	39
4.1 Формат хранения навигационных данных RINEX	39
4.2 Программные средства обработки данных измерений сигналов на-	
вигационных спутников	40
4.3 Методика определения ПЭС по навигационным данным	42
4.4 Результаты экспериментов по регистрации ПЭС ионосферы	43
Заключение	46
Список использованных источников	47

Введение

Землетрясения являются одним из наиболее серьезных проявлений внутренней энергии Земли. Жертвами природной стихии становятся тысячи человек. В результате сейсмической активности происходят разрушения зданий, пожары, повреждение мостов, дорог и трубопроводов, обрыв кабелей системы электропитания. Разрушение инженерных конструкций и промышленных предприятий может спровоцировать техногенные аварии с тяжелыми последствиями. Степень воздействий в значительной степени зависят от того, где происходит землетрясение: будь то преимущественно городские или сельские, плотно или малонаселенные регионы, и, конечно же, большую роль играет способность инфраструктуры выдерживать тряску. Нередко еще одним результатом землетрясений становятся голод и эпидемии. Все это имеет отражение в финансовой нестабильности регионов, подвергшихся землетрясениям. Ощутимый вред наносится и окружающей среде: падение деревьев, изменение ландшафта (обрушение скал, сход пород, оползни) и пыль в воздухе, затрудняющая дыхание всем представителям фауны.

В мире ежедневно регистрируются землетрясения различной степени интенсивности. За год количество только ощущаемых нами может достигать порядка 50000. В этой связи, для сейсмоактивных регионов актуальна ранее оповещение о готовящемся землетрясении. Это поможет предотвратить большое число человеческих жертв и снизит масштабы разрушений. В настоящее время особое внимание уделяется изучению вариаций ионосферных аномалий перед крупными сейсмическими активностями. Это связано прежде всего с тем, что изменение полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы над областью эпицентра в периоды, предшествующие сильным сейсмическим событиям, считается одним из возможных способов идентификации предшественников землетрясений.

Цель дипломной работы - разработать методику расчета полного электронного содержания ионосферы, позволяющего судить о сейсмической ситуации. За основу берется технология одночастотного метода получения информации приемным ГНСС-модулем, подключенным к платформе Arduino. Модуль производит сбор, а микропроцессорная плата - расчет данных.

Для осуществления поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Осуществить выбор аппаратных средств для создания устройства.
2. Подготовить прототип измерительного устройства.
3. Разработать математический аппарат обработки данных измерений.
4. Реализовать программное обеспечение.

Первая глава работы посвящена рассмотрению существующих современных методов и технических средств, используемых для измерения полного электронного содержания ионосферы.

Во второй главе содержится описание физики процесса подготовки и реализации землетрясений. Рассматривается алгоритм обработки данных о полном электронном содержании ионосферы для выявления предвестников землетрясений.

В третьей главе рассматривается разработка устройства для измерения полного электронного содержания. Изложен алгоритм обработки данных измерений. Представлена концепция технологии Arduino, ее интегрированная среда разработки, а также микропроцессорный модуль Arduino Nano и микроконтроллер ESP8266. Дано техническое описание ГНСС-приемника.

В четвертой главе описываются результаты измерений полного электронного содержания ионосферы.

1 Методы и технические средства измерения полного электронного содержания ионосферы

Объектом исследования является ионосфера - верхняя область атмосферы Земли, от 80 до 600 км, где ультрафиолетовая и рентгеновская солнечная радиация ионизируют атомы и молекулы, создавая таким образом слой электронов. Мониторинг ионосферы важен, поскольку имеет влияние на проходящие через нее радиоволны, используемые в том числе для связи и навигации.

1.1 Методы мониторинга ионосферы

1.1.1 Методы вертикального зондирования

Суть метода состоит в способности ионосферы отражать радиоволны используется для определения времени пробега волны до точки отражения и обратно. Зондирование состоит в определении этого времени в зависимости от частоты зондирующей волны. График этой зависимости — ионограмма — это зависимость частоты отраженной волны или, что эквивалентно, электронной концентрации от высоты. Высота пропорциональна времени пробега радиоволны до высоты отражения и обратно предполагая, что скорость волны равна скорости света. Долгое время метод вертикального зондирования был основным методом исследования ионосферы. В 50-х годах прошлого века была организована мировая сеть ионосферных станций вертикального зондирования. В рамках международных проектов такая сеть регулярно проводила одновременные измерения ионосферы примерно в 150 наземных пунктах. С помощью этих измерений был накоплен основной массив информации о поведении электронной концентрации на высотах областей E (90 - 140 км), F1 (140 - 200 км) и F2 (20 - 400 км) [1].

Вертикальное зондирование ионосферы осуществляется с помощью импульсного радиолокатора — ионозонда, расположенного на поверхности Земли. Ионозонд состоит из импульсного передатчика с плавно меняющейся рабочей частотой, приемника с синхронно меняющейся настройкой и регистрирующего устройства, фиксирующего рабочую частоту и время запаздывания сигнала. Несущая частота в процессе измерения изменяется у большинства ионозондов в диа-

пазон от 1 до 20 МГц. На выходе ионозонда записывается ионограмма. Существуют разные режимы измерения, снимающие ионограммы через 1-15 минут. С развитием технологий на смену аналоговым ионозондам пришли цифровые. Они отличаются тем, что в их состав входит компьютер, который осуществляет управление параметрами, обработку и хранение получаемых данных. Цифровые ионозонды СССР — «Базис», «Сойка», «Авгур»; США — ионозонды 128, 256, 610M1 и т. д. Ионозонды нового поколения дигизонды (Digital Integrating Goniometric Ionospheric Sounder) — это системы с фазово-кодовой задержкой радиосигнала, фазово-когерентным детектированием в сочетании с цифровым интегрированием и представлением ионограмм в цифровом виде. В настоящее время существует международная сеть ионосферных станций вертикального зондирования, включающая в себя около 130 ионозондов. На рисунке 1.1 [2] представлено распределение ионосферных станций по земному шару.



Рисунок 1.1 — Международная сети ионосферных станций вертикального зондирования

Метод вертикального зондирования имеет ограничения, стимулировавшие поиски других методов измерения, поскольку этот метод основан на использо-

вании коротких волн и не может быть применен для исследования самых нижних слоев ионосферы — области D (50 - 90 км), отражающей длинные и средние волны. Ему недоступны интервалы высот с убывающей вверх электронной концентрацией. Кроме того метод вертикального зондирования обладает низким пространственно-временным разрешением (метод дает информацию об ионосфере только над измерительной установкой), а также низкой чувствительностью к слабым возмущениям. Именно из-за низкой чувствительности долго считалось, что волнообразные вариации верхней атмосферы явления не регулярные, а являются следствием геомагнитных бурь, солнечной активности, землетрясений и т. д.

1.1.2 Метод некогерентного рассеяния радиоволн

Развитие радиолокации привело к появлению информативного радиофизического метода исследования ионосферы — метод некогерентного (томпсоновского) рассеяния радиоволн. Он основан на измерении слабого сигнала, рассеянного на свободных электронах в ионосфере при излучении с Земли импульса радиоволн на фиксированной частоте. Измеряется не только мощность принятого сигнала, но и его спектральные характеристики. По принятой мощности может быть определена электронная плотность — полная мощность принимаемого сигнала пропорциональна числу свободных электронов в рассеивающем объеме, а следовательно, и электронной концентрации.

Спектр рассеянного сигнала определяет параметры, связанные с движением рассеивающих частиц — распределение электронов по скоростям, а значит информацию о температуре и направленной скорости их движения. По спектру могут быть получены характеристики волн, так как в спектре рассеянного сигнала усилены частоты, соответствующие собственным волнам плазмы. Форма спектра дает возможность измерения электронной и ионной температур, ионный состав, скорость дрейфа на ионосферных высотах. Сигналы, рассеянные в нижних слоях ионосферы определяют и другие параметры ионосферы — частоту соударений и плотность нейтральной атмосферы. Метод некогерентного рассеяния позволяет одновременно измерить ряд перечисленных выше параметров и ионосферных неоднородностей диапазоне высот от 70 до 1000 км и является наиболее информативным в исследовании верхних слоев атмосферы. Результаты метода некогерентного зондирования не зависят от состояния ионосферы, так как он применяет

рабочие частоты, значительно превышающие собственные частоты ионосферы. С помощью этого метода была еще раз доказана регулярность волновых возмущений в ионосфере.

Несомненным преимуществом является возможность проектирования управляемых антенн за счет использования высоких частот. Такая маневренность обеспечивает исследователю выбор положения исследуемого участка ионосферы, в том числе и на дальние расстояния. Однако, для распространения метода некогерентного рассеяния необходимы радары с высоким энергопотреблением и высокой чувствительностью приемных устройств для регистрации слабых сигналов. Такие установки дорогостоящие и отличаются сложностью используемых средств и, как результат, в мире на сегодняшний момент ими пользуются только 11 обсерваторий, расположение которых показано на рисунке 1.2 [3].



Рисунок 1.2 — Международная сеть некогерентных радаров

В силу экономических причин обсерватории не ведут непрерывных наблюдений, а проводят серии измерений в течение коротких временных промежутков. Метод выгодно отличается от ионозондов тем, что имеет возможность измерять

ионосферные параметры на больших высотах, не ограничиваясь уровнем максимума электронной концентрации.

1.1.3 Спутниковый метод радиопросвечивания ионосферы ГНСС-сигналами

Метод радиопросвечивания подразумевает прохождение радиосигнала по трассе спутник-спутник. Использование подобной трассы дает возможность проводить глобальное радиопросвечивание ионосферы во всех районах Земли, что является преимуществом данного метода. В качестве излучающего и принимающего спутников могут использоваться аппараты навигационных сетей [4]. Один из спутников излучает радиосигнал, а другой спутник заходит за лимб Земли по отношению к нему и принимает радиосигнал. Радиопросвечивание ионосферы происходит с регулярным изменением минимальной высоты лучевой линии над земной поверхностью. Для подобных измерений используются волны дециметрового диапазона, мало подверженные влиянию ионосферы. Это затрудняет определение параметров ионосферы и является недостатком метода. Излучаемые сигналы по мере их распространения во времени и пространстве формируют данные о среде прохождения. Определяются регулярные ионосферные изменения амплитуды, частоты и фазы, а также полное электронное содержание в различных районах Земли. Систематическая отработка затменного метода занимаются исследовательские спутники систем COSMIC, CHAMP, GRACE принимающие сигналы навигационных спутников [5]. Радиозатменное вычисление параметров ионосферы и атмосферны основано на наличии связи изменения амплитуды, фазы или частоты и зависимости коэффициента преломления от высоты.

1.1.4 Метод наземной регистрации ГНСС-сигналов

В настоящее время возможности мониторинга ионосферы значительно расширились благодаря появлению спутниковых радионавигационных систем. Основная функция, выполняемая спутниковой радионавигационной системой (СРНС) — определение точных координат приемника, регистрирующего сигналы от навигационных искусственных спутников Земли, при известных координатах спутника. В состав любой СРНС входят космический сегмент, наземный командно-контроль-

ный комплекс (система управления) и аппаратура потребителя. Параметры СРНС определяются качеством навигационных измерений [6].

Полное развертывание глобальных навигационных сетей и усовершенствование алгоритмов решения обратных задач радиопросвечивания существенно улучшили методы определения параметров ионосферы.

Множество факторов как естественного, так и антропогенного происхождения, влияют на состояние ионосферы и изменяют степень ее рефракции от которой зависит насколько изменится траектория распространения радиосигнала. Глобальный мониторинг ионосферы помогает вести учет текущего состояния ионосферы. Использование глобальных навигационных систем для мониторинга ионосферы Земли имеет ряд преимуществ. Международная геодезическая наземная сеть IGS (International Geodynamics Service), используемая для получения данных двухчастотных измерений, хорошо развита. Данные измерений, содержащие информацию о всей толще ионосферы и хранящиеся в едином формате RINEX (Receiver Independent Exchange), могут быть получены через Интернет.

Спутники навигационных систем излучают когерентные сигналы на двух частотах, позволяющие рассчитывать полное электронное содержание вдоль трассы спутник-приемник ГНСС-сигнала. Дистанционное зондирование ионосферы осуществляется на основе анализа изменений сигнала, которые происходят при его прохождении через среду. По дисперсионной зависимости показателя преломления радиоволн в ионосфере определяется полное электронное содержание на пути распространения волн. Характеристики проходящего сигнала зависят от среды распространения. Одновременно в поле зрения приемника может находиться более десятка спутников ГНСС. Обеспечение непрерывной радиовидимости и глобального приема навигационных сигналов позволяет получать распределение ПЭС в пространстве и во времени.

1.2 Технические средства мониторинга ионосферы

1.2.1 Ионозонды

Ионозонд — техническое устройство предназначенное для передачи и приема радиосигналов для целей определения высот отражения радиоволн от ионосферы на фиксированных частотах или в непрерывном диапазоне частот, а также

критических частот ионосферы и высотного распределения электронной концентрации [7]. Ионозонд генерирует радиосигнал, излучает его вертикально вверх в атмосферу, а затем принимает отраженный от ионосферы сигнал. Таким образом получается, что измеряется не высота отражения радиоволн, а время, в течение которого радиоволны достигают своего уровня отражения и возвращаются обратно. Полученные данные проходят обработку, результатом которой и является ионограмма.

Распространение ионозондов началось с изобретением способа вертикального зондирования. Ионозонды делятся на наземные, исследующие ионосферу ниже главного максимума электронной концентрации и спутниковые, занимающиеся исследованиями выше главного максимума электронной концентрации. Сам максимум является общей точкой и регистрируется обеими установками (может служить для согласования наземной и внешней ионограмм). Аналоговые ионозонды представляли собой установку, состоящую из передающего, приемного и управляющего устройств. Зондирующие импульсы длительностью в десятки микросекунд и с мощностью в единицы или десятки кВт, несущая частота которых в процессе измерения меняется (у большинства ионозондов в пределах от 1 до 20 МГц). На выходе такого ионозонда имелся осциллограф, вертикальная развертка которого отсчитывала время пробега волны от излучения до приема после отражения, горизонтальная — частоту зондирования. На экране осциллографа фиксировалась ионограмма — функция $h'(f)$. Обычно, на ионограмме присутствуют отражения от Е-слоя, высота которого зависит от частоты, и от расположенных на больших высотах F1 и F2-слоев. Они характеризуются предельными частотами отражения обыкновенной волны f_0E , f_0F1 и f_0F2 . Это критические частоты ионосферных слоев обыкновенной волны, характеризующиеся максимальными значениями электронной концентрации в слоях (предельные частоты необыкновенной волны отмечаются индексом х, например f_xF2). Расположенный ниже Е-слоя слой D на ионограмме не отражается, так как радиоволны низких частот поглощаются при прохождении сквозь него [1].

У аналоговых ионозондов рабочая частота меняется непрерывно за счет движений механических деталей, либо тем или иным электрическим способом. Импульсный генератор модулирует эту частоту таким образом, что на выходе име-

ется последовательность заполненных медленно меняющейся частотой импульсов необходимой длительности (обычно 100 мкс).

Современные цифровые ионозонды отличаются от аналоговых наличием входящих в их состав компьютеров. Он занимается управлением характеристиками ионозонда и анализом получаемой информации. Для цифровых ионозондов также характерно наличие цифрового синтезатора частоты [1]. Использование цифровых ионозондов позволяет увеличить число измеряемых ионосферных «радиофизических» параметров — регистрируется не только действующая высота или глубина отражения, но и одновременно измеряются частотные зависимости амплитуды сигнала, фазы, доплеровского сдвига, поляризации и т.п. Эта дополнительно получаемая информация в значительной степени увеличивает полезность проводимых измерений, так как потенциально каждый из указанных радиофизических параметров определяет тот или иной геофизический параметр. Современные направления развития: 1. Дигизонд (Digital Integrating Goniometric Ionospheric Sounder) — портативный ионозонд, являющийся одним из наиболее современных и распространенных средств радиозондирования ионосферы. В его состав входят: основной блок; монитор; две передающие антенны; четыре приемные антенны с поляризационными ключами; GPS-приемник и блок батарей резервного питания. Отличительной особенностью дигизонда является его малая мощность — используются два передатчика мощностью по 150 Вт каждый. Используя специальный метод обработки сигнала удастся достичь достаточно высокого отношения сигнал/шум; 2. Диназонд (динамический цифровой ионозонд) обеспечивает автоматическое определение стандартных параметров ионосферы, получает трехмерную инверсию электронной концентрации методом NeXtYZ, проводит диагностику спектра мелкомасштабных неоднородностей методом структурной функции фазы, и определяет векторные скорости движения ионосферных слоев. Применение диназонда позволяет значительно удешевить определение тех параметров ионосферы, которые ранее можно было получить только используя дорогостоящий и сложный метод некогерентного рассеяния. Диназонд, разработанный американской компанией Dynasonde Solutions Ltd. в последние годы, является наиболее передовым средством анализа ионосферных данных и установлен на полигоне NASA Wallops Flight Facility в Вирджинии; на ионосферной станции Томского Государственного Университета и на станции NOAA в Боулдере, Колорадо. Наиболее известный экземпляр работает

в международной обсерватории EISCAT Тромсё, Норвегия. Диназонд — полностью цифровая радарная система, которая допускает очень гибкое программирование; 3. Кинезонд предназначен для изучения ионосферных дрейфов и позволяет определить форму, анизотропию, время жизни неоднородностей. Основан на использовании множества разнесенных приемников, оснащенных элементами традиционного цифрового ионозонда. Начиная с 80-х годов методы кинезонда применяются в диназондах, а после 2000 года самостоятельно не выпускается [8].

1.2.2 Радары некогерентного рассеяния

С помощью радаров некогерентного рассеяния (НР) возможно проводить наиболее полный мониторинг ионосферы. Радары НР способны получать данные о электронной концентрации, электронной и ионной температуры, а также данные о ионном составе и скорости дрейфа в районе высоты от 100 до 1000 км. Использование радара позволяет исследовать вариации ионосферных параметров во время таких возмущений, как ионосферные бури, солнечное затмение, мощные наземные взрывы.

В России используется один радар некогерентного рассеяния, находящийся в Иркутской области. Он включен в «Перечень уникальных экспериментальных установок национальной значимости, требующих дополнительной государственной поддержки» Российской Федерации. Российский радар входит в мировую сеть радаров некогерентного рассеяния, которая включает 9 установок и проходит по территории США, Европы и Японии. Каждая установка имеет свои собственные, уникальные характеристики, обусловленные географическим положением. Особую ценность представляют данные координированных наблюдений за глобальным распределением параметров ионосферы. Проводятся регулярные измерения в рамках Международной программы мировых дней сети радаров некогерентного рассеяния. Измерительный период составляет от 20 до 30 суток в год в диапазоне высот от 200 до 500 км. Данные наблюдений иркутского радара некогерентного рассеяния являются частью международного исследования долготных закономерностей крупномасштабных процессов в ионосфере.

Радары являются мощными инструментами для зондирования ионосферы и ее взаимодействия с космической средой. С их помощью осуществляется мониторинг верхних слоев атмосферы Земли и околоземного пространства для целей

дальней связи, навигации и оценки угроз, вызванных событиями в космической погоде. Интерес представляет радар AMISR, начавший свои измерения в 2009 году в Резолут Бэй, Канада, представляющий собой модульный, мобильный радар, который используется учеными и студентами со всего мира, чтобы проводить исследования верхних слоев атмосферы и ионосферы и наблюдать за явлениями космической погоды. Преимуществом AMISR является способность к быстрому изменению конфигурации, так как радар имеет блочную структуру. Сигнал собирается и обрабатывается в отдельных модулях. Полная антенна состоит из 128 модулей, каждый из которых включает 32 антенны. Он предоставляет информацию о ионосферной динамике вблизи геомагнитного полюса Земли. Этот регион, сложный для изучения из-за трудностей развертывания измерительной аппаратуры в жестких климатических условиях, имеет большое значение, так как горячая плазма солнечного ветра имеет прямой доступ к атмосфере без препятствия магнитного поля Земли. пример трехмерной реконструкции пространственного распределения электронной концентрации представлен на рисунке 1.3 [9].

1.2.3 Навигационные спутниковые системы ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou

В настоящее время широкое распространение получили четыре СРНС: ГЛОНАСС (Россия), GPSи(США), GALILE (Европа), BEIDOU (Китай). Орбиты спутников представлены на рисунке 1.4 [10], а их сравнительные характеристики в таблице 1.1 [10].

С появлением китайской системы BEIDOU, европейской GALILEO, американской GPS и российской ГЛОНАСС увеличилось количество точек «прокалывания» ионосферы. Это дает большие возможности для получения точных глобальных ионосферных карт (GIM) с высоким разрешением, улучшенной точностью позиционирования и возможностью мониторинга ионосферы. Учет всех спутниковых радионавигационных систем, так называемые ГНСС, позволил создать значительно более информативную модель ионосферы, чем при использовании данных только от GPS. Дифференциальный код смещения является побочными продуктами ГНСС в ионосферном моделировании; стандартные отклонения 0.06 нс, 0.10 нс, 0.18 нс, 0.15 нс соответствуют спутникам GPS, ГЛОНАСС, BEIDOU и GALILEO, и примерно 0.2 0.4 нс для приемников. Одночастотное высокоточное позициони-

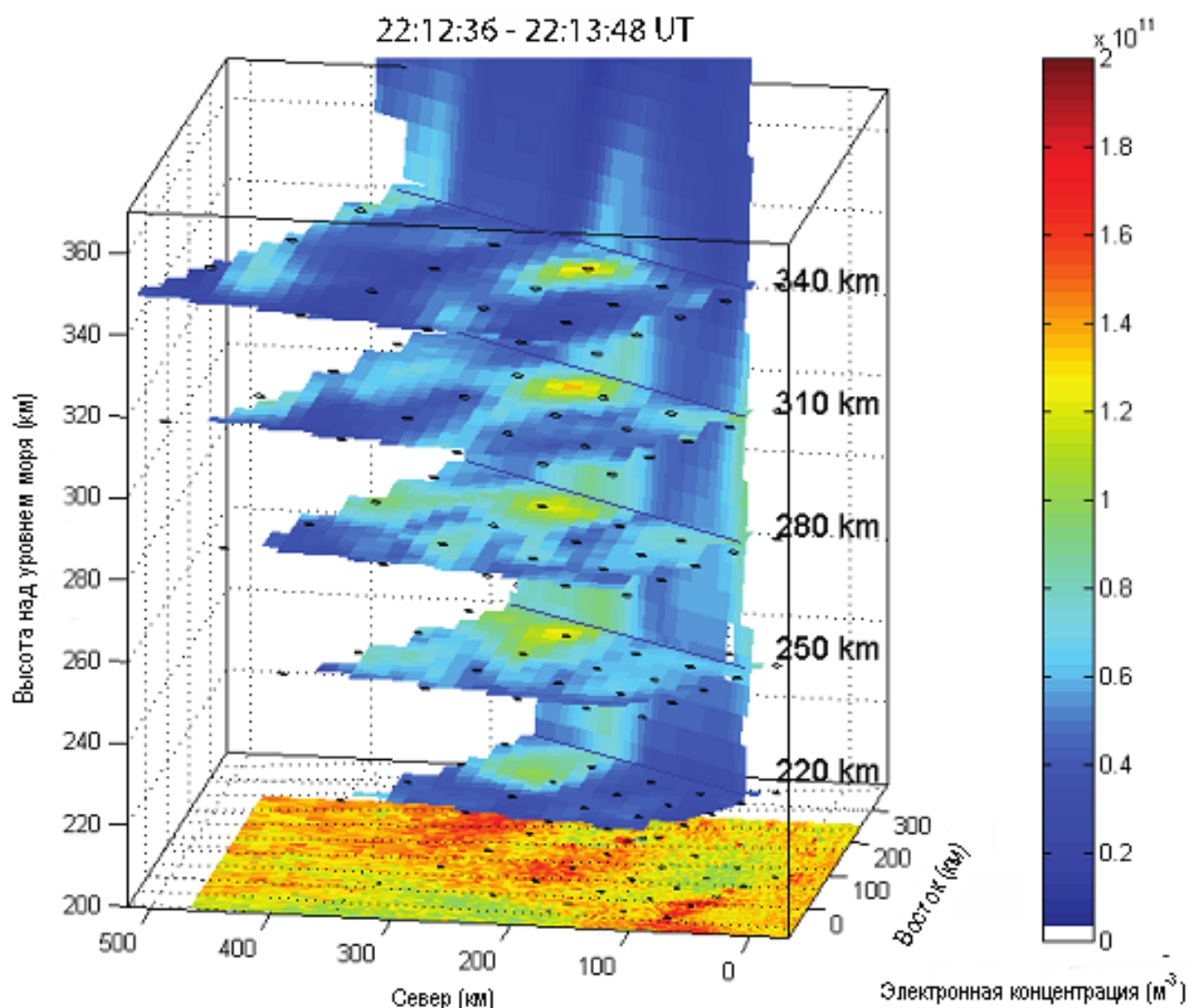
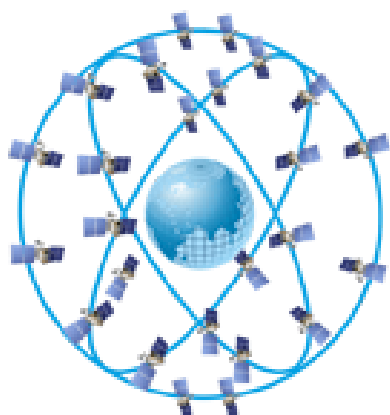


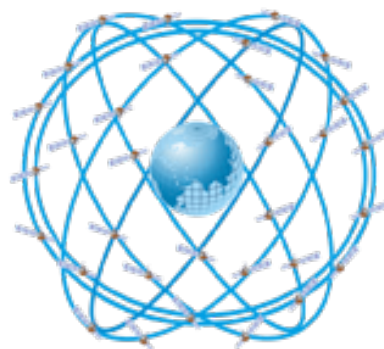
Рисунок 1.3 — Трехмерный вид плотности плазмы в слое 200-400 км, построенный с использованием многолучевых измерений радаром AMISR

рование точки дает результаты, свидетельствующие, что точность моделирования ионосферны предлагаемым методом, основанным на ГНСС наблюдениях лучше, чем у текущей двойной системы GIM.

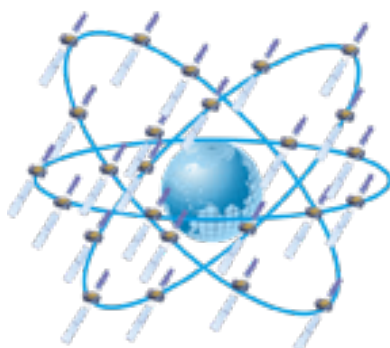
Ионосфера может быть определена как часть верхней атмосферы, где концентрация свободных электронов и ионов достаточно высока, чтобы влиять на распространение электромагнитных радиочастотных волн. Когда сигнал проходит от спутника до приемника, ионосфера может изменить скорость распространения сигнала и вызвать задержку в коде и фазе несущей частоты радиосигнала. В настоящее время считается, что ионосферная задержка является одним из основных источников ошибок при позиционировании ГНСС. Для получения более высокой точности позиционирования очень важно иметь точную модель ионосферы. Со-



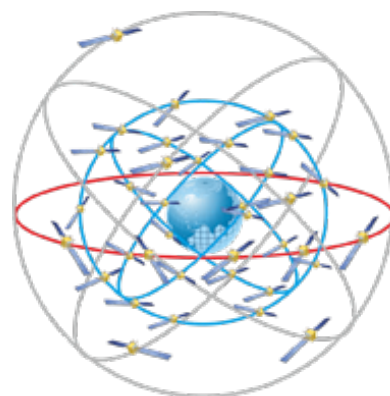
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.4 — Орбиты спутников систем: а) ГЛОНАСС/Россия, б) GPS/США, в) GALILEO/Европа, г) Beidou/КНР

Таблица 1.1 — Таблица сравнительных характеристик ГНСС

Среднеорбитальный сегмент				
Характеристика	ГЛОНАСС	GPS	GALILEO	BEIDOU
Количество КА	24	24	24 (+3 резерв)	27
Высота орбиты, км	19100	20200	23222	21528
Большая полуось, км	25518	26560	29600	-
Период	11ч 15мин 44с	11ч 58мин	14ч 04мин 45с	12ч 53мин 24с
Наклонение, °	64,8	55	56	55
Количество плоскостей	3	6	3	3
Высокоорбитальный геосинхронный сегмент				
Статус	ведутся НИР	нет	ведутся НИР	3
Геостационарный сегмент				
Статус	ведутся НИР	нет	ведутся НИР	5

ответствующие научные исследования (например, ионосферных бурь, аномальных вариаций геомагнитных бурь, землетрясений, цунами) также требуют постоянного и непрерывного мониторинга состояния ионосферы.

ГНСС может обеспечить непрерывный по времени глобальный охват и низкие эксплуатационные расходы при высоком временном разрешении. Она стала для пользователей эффективным инструментом, который широко используется для непрерывного мониторинга ионосферы Земли с высоким пространственным и временным разрешением. Для создания глобальной государственной службы мониторинга полного электронного содержания ионосферы в 1998 году Международной службой IGS была создана ассоциация, состоящая из четырех аналитических цен-

тров: центр определения орбит в Европе (CODE), Лаборатория реактивного движения (JPL), Европейское космическое агентство (ESA) и Политехнический университет Каталонии (UPC). Они используют различные подходы для вычисления глобальной модели ионосферы. В прошлом, ионосферное моделирование основывалось на GPS-наблюдениях или в сочетании с ГЛОНАСС-наблюдениями. Система ГЛОНАСС, действует в полную силу с 24 спутниками с 2011 года. Как и GPS, она гарантирует видимость пользователю не менее четырех спутников. GALILEO, который еще в стадии строительства, является Европейской глобальной спутниковой навигационной системой. Полная система Galileo будет состоять из 30 спутников, равномерно распределенных в трех орбитальных плоскостях наклоненных под углом 56 градусов к экватору. Beidou — это новая система, которую Китай начал строить в 2000 году. С 2012 года система уже предоставляет возможность позиционирования, навигации и синхронизации услуг для всего Азиатско-Тихоокеанского региона. Конечной целью Beidou является возможность глобального охвата своей уникальной спутниковой сетью, состоящая из пяти спутников на геостационарной орбите, трех на наклонной геосинхронной орбите и 27 на средних круговых орбитах к 2020 году. В настоящее время насчитывается более 80 спутников на орбите. Когда все системы будут работать на полную мощность, станет доступно около 120 спутников. Между тем IGS создала сеть для сбора и анализа данных от GPS, ГЛОНАСС, Beidou и Galileo. Эта сеть в настоящее время включает около 140 мониторинговых наземных станций.

1.2.4 Спутники систем CHAMP, COSMIC, GRACE

Немецкий спутник CHAMP (CHAllenging Microsatellite Payload) — система наблюдений за поверхностью Земли, весом 522 кг предназначен для исследования гравитационного поля и магнитосферы Земли. Он изготовлен специалистами компании Dornier Satellitensysteme для потсдамского института GeoForschungsZentrum. Запуск был осуществлен 15 июля 2000 года с космодрома Плесецк, Россия. Расчетное время работы спутника изначально составляло 5 лет, однако CHAMP проработал в два раза дольше и после более чем 10 лет (3718 дней) на орбите, 19 сентября 2010 года спутник сгорел в районе Охотского моря [11].

Спутник оснащен высокоточным, многофункциональным и дополняющим друг друга элементам полезной нагрузки — магнитометр, акселерометр, звезд-

ный датчик, GPS-приемник, лазерный светотражатель, измеритель дрейфа ионов. Внешний вид представлен на рисунке 1.5 [16].

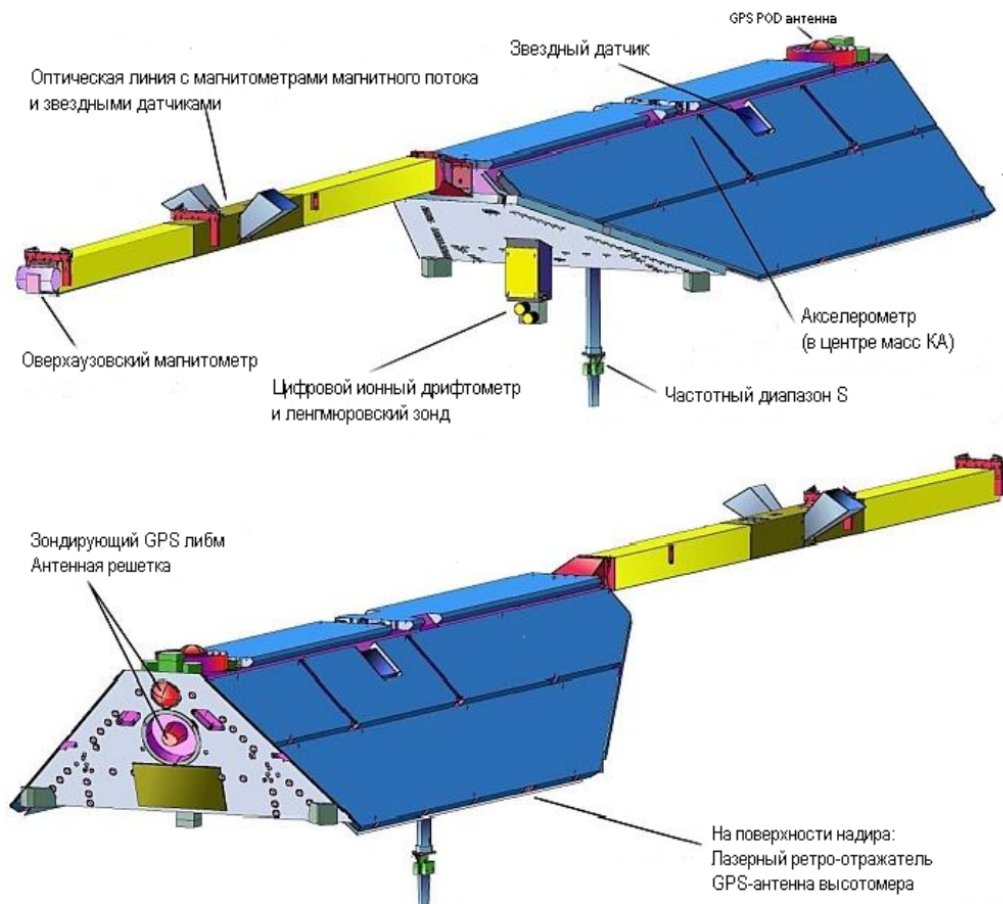


Рисунок 1.5 — Схема спутника CHAMP с двух сторон

В ходе своей миссии, этот миниспутник впервые совершил высокоточные измерения гравитационного и магнитного полей, которые позволили ученым обнаружить не только пространственные, но и временные вариации обоих полей. Кроме того CHAMP использовался для атмосферных и ионосферных исследований, а также других геолого-геофизических исследований, в том числе и радиозатменных измерений с помощью GPS. Данные, полученные CHAMP служат идеальной основой для дальнейшего совершенствования методов спутниковых геодезических работ. Они также полезны в области дистанционного зондирования и картографических приложений. Например, для построения цифровых модели обширных территорий, используемых в строительстве. Оценка всех сигналов, наблюдаемых CHAMP позволила выполнить комплексное моделирование структуры и динамики процессов, происходящих в ядре и мантии Земли. Это дает новый материал

для исследований, касающихся структуры и состава недр Земли и открывает новые области применения в геодезии, физике твердого тела Земли, и океанографии. CHAMP использовал радиозатменный метод на борту космического аппарата в сочетании с методом наземной регистрации ГНСС-сигналов и стал первым аппаратом предварительного оперативного использования космических ГНСС-наблюдений в атмосферных и ионосферных исследованиях, а также прикладных разработок в области прогнозирования погоды и мониторинга космической погоды. Данные CHAMP будут дополнены другими, более поздними, миссиями, которые измеряют гравитационное поле Земли из космоса (GRACE, GOCE).

Низкоорбитальные спутники проекта COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate), космическая система наблюдений для метеорологии, ионосферы и климата) был запущен 15 апреля 2006 года. Цель проекта — сбор данных для метеорологии, климатологии, ионосферных исследований, а также для оперативного прогнозирования космической погоды. Данные со спутника находятся в свободном доступе и в настоящее время ими пользуются около 3000 зарегистрированных исследователей из 77 стран. Эти данные, полученные методом затненного зондирования, включают в себя профили высотного распределения электронной концентрации в ионосфере, а также профили температуры, влажности и атмосферного давления в нижней атмосфере. Сигналы передаются на наземные станции, для дальнейшей обработки прецизионного вычисления физических параметров атмосферы и ионосферы.

COSMIC включает в себя 6 микроспутников (FM1-FM6) весом 69 кг на низких околоземных орбитах с высотой 800 км, вращаясь в 6 орбитальных плоскостях, по одному в каждой плоскости. Каждый спутник оснащен тремя основными видами аппаратуры для дистанционного зондирования: GPS-приемник, трехчастотный передатчик радиосигнала CERTO (Coherent Electromagnetic Radio Tomography) для приема низкоорбитальной радиотомограммы и миниатюрный ионосферный фотометр, который в сочетании с остальными приборами позволяет выполнить томографический трехмерный анализ ионосферы. В день производится до 2500 зондирований в глобальном масштабе [13]. Внешний вид спутника представлен на рисунке 1.6 [14].

В настоящее время примерно 90% данных космического зондирования доступны в течение трех часов после сбора. Использование такой системы наблюде-

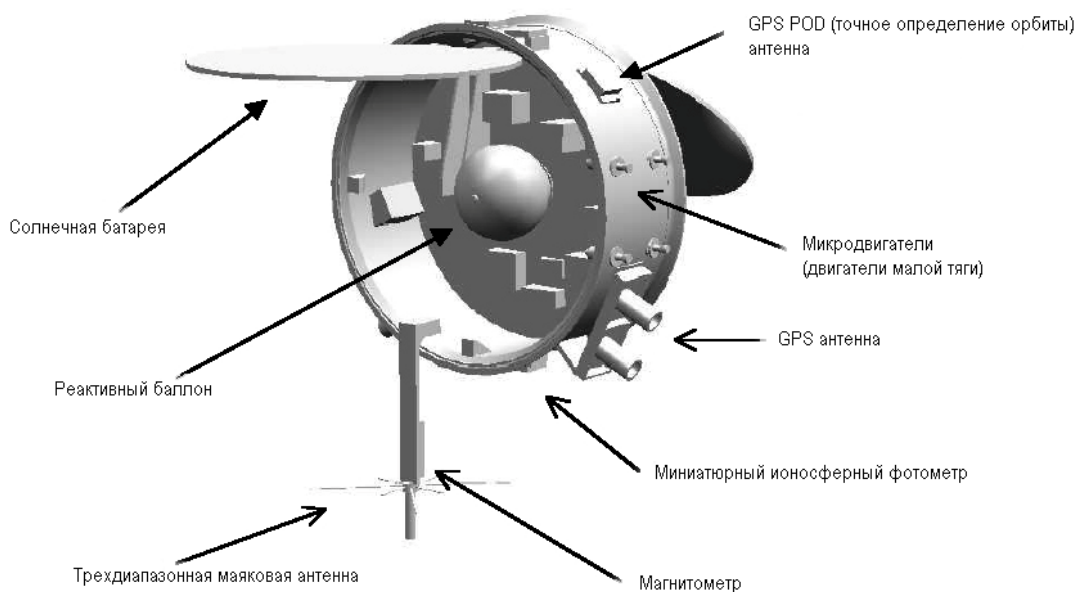


Рисунок 1.6 — Схема спутника COSMIC

ния улучшает глобальный анализ состояния атмосферы над океанами, полярными областями, и другими труднодоступными регионами. Зондирование ведется круглосуточно и охватывает весь земной шар, это обеспечивает создание трехмерной картины суточного цикла всех видов погоды. COSMIC отличается всепогодностью функционирования и предоставляет данные в тех условиях, когда другие спутники не в состоянии сделать это. Спутники системы COSMIC не принимают сигналов от спутников ГЛОНАСС, а работают только с сигналами GPS спутников, что ограничивает повторяемость наблюдений. Что бы обеспечить повторяемости измерений 2-3 раза в сутки, необходимую для случаев высокооперативных прогнозов, нужно увеличить в соответствующее число раз состав орбитальной группировки спутников, что связано со значительным удорожанием и усложнением такой системы.

Основной задачей спутника GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) является исследование гравитационного поля Земли, а также составление высотных профилей температуры и влажности в стратосфере и тропосфере, которые могут быть ассимилированы с моделями численного прогноза погоды. GRACE обеспечивает минимум 600 атмосферных профилей в день. Система GRACE составляет карты гравитационного поля, измеряя положение двух своих спутников, находящихся на полярной орбите высотой 500 км. Спутники находятся на расстоя-

нии примерно 220 ± 50 км друг от друга, причем один немного опережает второй, поэтому им дали имена «Том» и «Джери». Подлетая к зоне с гравитационными аномалиями скорость спутников изменяется и они начинают ускоряться, а к концу аномальной зоны замедляются, так как спутники сильнее или слабее притягиваются Землей. Спутники непрерывно обмениваются радиосигналами в микроволновом диапазоне, что позволяет с микронной точностью отслеживать изменения расстояния между ними. Слежение за траекториями этих спутников осуществляется с помощью системы высокоорбитальных спутников систем ГЛОНАСС/GPS. Собственное движение и ориентация спутников регистрируются с помощью приемников GPS, акселерометров и звездных датчиков [15]. Схема работы спутников GRACE поясняется на рисунке 1.7 [16].

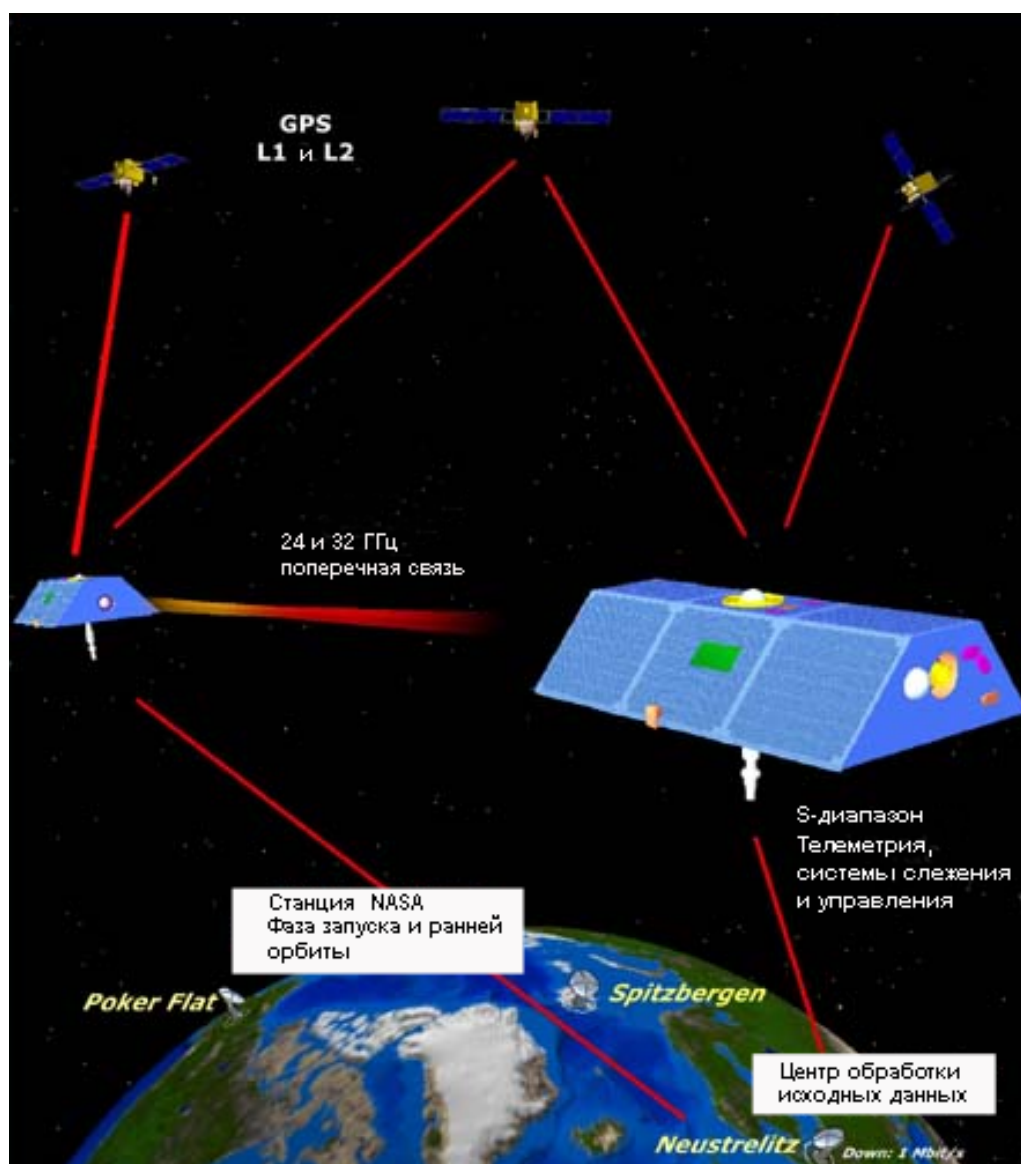


Рисунок 1.7 — Схема спутника GRACE

Непрерывная деятельность спутников GRACE позволяет получать картину гравитационного поля всей планеты каждые 30 дней, что позволяет отслеживать естественные перемещения воздушных и водных масс. Основываясь на данных GRACE была построена наиболее точная на данный момент карта глобального гравитационного поля планеты. В период наблюдения с 2002 по 2005 годы благодаря данным GRACE было зафиксировано ускоренное таяние льдов Гренландии.

2 Алгоритм обработки данных о полном электронном содержании ионосферы для выявления предвестников землетрясений

2.1 Физика процесса подготовки и реализации землетрясений

Термин «землетрясение» очень точно описывает процессы, возникающие при скачкообразном выделении энергии в некоторой области недр Земли. Эта область называется очагом землетрясения. Центр очага, где возникает ударная волна – это гипоцентр (фокус) землетрясения. На поверхности Земли над гипоцентром расположен эпицентр землетрясения. Район, в пределах которого землетрясение обладает максимальной силой, определяется как эпицентральный область. Расстояние от эпицентра до гипоцентра называется глубиной очага.

Одним из наиболее сложных аспектов изучения землетрясений является получение данных эмпирическим путем. Большинство очагов землетрясений находится на глубине до 50 км, ряд очагов землетрясений фиксируется на глубинах 300-450 км, однако в некоторых регионах наблюдались и глубокофокусные землетрясения на глубине до 670 км. Сейсмологи не могут непосредственно наблюдать разрывы, происходящие в недрах Земли. Вместо этого они полагаются на данные, полученную несколькими доступными методами, наиболее важными из которых являются записи сейсмических волн. Во время землетрясения внезапные движения земной коры возбуждают упругие волны, которые проходят через землю и регистрируются сейсмическими станциями на поверхности. Эти волны несут в себе информацию о движениях источника землетрясения, но сложная структура земли между источником и приемником часто затрудняет извлечение информации из полученного сигнала.

Силы, возникающие в земной коре обычно описываются в терминах касательных напряжений и деформаций сдвига. Напряжение сдвига — это сила на единицу площади, приложенная по касательной к плоскости. Сдвиговая деформация является безразмерной величиной, которая описывает искажение тела в ответ на напряжение сдвига. Долговременная нагрузка земной коры традиционно измеряется с использованием геодезических и геологических методов. Недавний прогресс в космической геодезии, таких как система глобального позиционирования (ГНСС) и

спутниковой интерферометрии (ИНСАР) дает нам четкий рисунок движения земной коры и накопления деформации. Когда напряжение в точке, находящейся в коре превышает критическое значение (местная прочность), происходит внезапный разлом (оседание пород). Плоскость, по которой происходит разлом называется плоскостью разлома, а точка, где разлом начинается, называется фокусом. Как правило, происходит внезапное смещение коры в плоскости разлома и излучаются упругие волны. Для большинства землетрясений, смещение происходит в существующем геологическом разломе, то есть плоскости, которая уже слаба. Физика землетрясения включает в себя: механизм формирования ударной волны (УВ) в литосфере на глубине гипоцентра как результат образования и мгновенного сброса упругих напряжений; прохождение УВ от гипоцентра до поверхности Земли, в течении которого она взаимодействует с окружающей ее средой, что приводит к возникновению сейсмических волн; выход УВ на поверхность Земли сопровождающийся движением грунта.

2.2 Внутренние гравитационные волны в атмосфере

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) — распространение колебаний воздушных масс, имеющих продольную и поперечную сдвиговую составляющую. Причинами возникновения волн могут быть изменения метеорологических параметров в приземном слое и на различных высотах, а в сейсмически активных районах — медленные подвижки земной коры. В качестве механизмов могут выступать как наземные, так и подземные химические и ядерные взрывы, вулканические явления и цунами. В сейсмически активных регионах во время подготовки и при возникновении землетрясения возбуждаются интенсивные сейсмогравитационные колебания, имеющие период до 1-3 ч. Подобные колебания способны генерировать волны в атмосфере. Периоды ВГВ составляют десятки минут, скорости распространения — сотни метров в секунду, а длины волн — сотни километров. Воздействуя на атмосферу в вертикальном направлении подобно поршню большой площади, этот эффект усиливается с увеличением периода колебаний [17]. Для ВГВ характерно уменьшение вертикальной длины волны с уменьшением высоты, расплывание неоднородности по вертикали на больших высотах за счет амбиполярной диффузии.

Реакция термосферы на сейсмические колебания имеет импульсный характер. Распространяясь горизонтально с наклонным фронтом возмущение ионосферы формируется на больших высотах, постепенно спускаясь на нижние. С увеличением высоты амплитуда возмущения ВГВ экспоненциально нарастает из-за уменьшения плотности атмосферы. Так происходит до высоты порядка 200 км. Рост амплитуды уравнивается процессом диссипации, возникающим из-за вязкости и теплопроводности, вертикальная неоднородность возмущения сглаживается.

2.3 Взаимодействие ВГВ с ионосферой

Поскольку ВГВ имеют не только продольное, но и поперечное распространение, то они, при определенных условиях, достигают ионосферных высот. В этом случае действие ВГВ проявляются в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) [18]. ПИВ являются видом волновых ионосферных возмущений, которые возможно обнаружить только радиофизическими методами, используя ионозонды вертикального и наклонного зондирования, радары некогерентного рассеяния и спутниковые системы навигации. В соответствии с пространственно-временным охватом и скоростью перемещения выделяют: крупномасштабные (КМ) и среднемасштабные (СМ) ПИВ. КМ ПИВ имеют временные периоды 0.5 — 3 ч., длину волны от 300 — 1000 км и горизонтальные фазовые скорости 300-1000 м/с. СМ ПИВ обладают горизонтальными размерами от 100 до 300 км, временными периодами от 0.2 — 1 ч., горизонтальными фазовыми скоростями от 100 до 300 м/с). Отдельно говорят о мелкомасштабных ПИВ с параметрами меньшими, чем СМ ПИВ [19].

При вертикальном распространении внутренние гравитационные волны будут рассеиваться (в основном на высотах 80 - 100 км D-слоя нижней ионосферы), в результате происходит увеличение турбулентности и выработка тепла [20]. Такой нагрев ионосферы приводит к увеличению концентрации электронов в нижней ионосфере [21]. ВГВ, а следовательно и ПИВ распространяются от высоких широт к низким и деформируют весь высотный профиль электронной концентрации. В результате, на ионосферных высотах будут возникать предвестники и индикаторы как сейсмических событий, так и других кризисных явлений в приземной атмосфере, которые могут регистрироваться наземной техникой или спутниками с низкой орбитой.

2.4 Результаты регистрации ПЭС над районами землетрясений

Большое количество наземных и спутниковых наблюдений показали, что перед сейсмическими событиями формируются ионосферные аномалии — возрастание или убывание электронной концентрации в E- и F-слоях ионосферы над эпицентральной областью. Благодаря широкому развитию спутниковых систем глобального позиционирования, работающих совместно с широкой сетью наземных приемников, получают данные глобального распределения полного электронного содержания ионосферы. На их основе оценивается не только состояние ионосферы непосредственно над эпицентральной областью, но и формируется глобальное представление вариаций полного электронного содержания перед сильными сейсмическими событиями. Таким образом были зафиксированы аномалии в изменении полного электронного содержания в период от 1 до 15 суток перед землетрясениями в области эпицентра [\[\[22\]\]](#). Основной причиной развития подобных отклонений считается вертикальный электромагнитный $E \times B$ дрейф ионосферной плазмы F2-области. Он формируется под действием электрического поля, имеющего сейсмическое происхождение и способного вызывать изменения концентрации электронов не только в районе подготовки землетрясения, но и в магнитосопряженной зоне [\[23\]](#).

За несколько суток или часов до землетрясения в ионосфере начинает формироваться область положительных возмущенных значений параметров среды и электромагнитного поля. С приближением времени первого толчка увеличивается пространственный охват области возмущенных значений. Она движется ближе к эпицентру, величина возмущенности тоже увеличивается до 60 — 85% от невозмущенных значений. Пространственные размеры аномалии достигают 1 тыс. км по широте и более 4 тыс. км по долготе [\[24\]](#), [\[25\]](#).

Ионосфера реагирует на сейсмическую активность изменением в параметрах: регистрируется возмущение компонент магнитного и электрического полей; увеличивается диффузность в E и F-слоях, формируются спорадические слои в E-слое над околоэпицентральной областью будущего землетрясения; за несколько суток перед землетрясением происходит повышение (в ряде случаев - понижение) критических частот (f_oE_s , f_oE , f_oF_2), высоты максимума электронной концентрации ($h'E_s$) и плотности на высотах максимума F2-слоя [\[26\]](#), [\[27\]](#). Сейсмо-ионо-

сферные вариации критических частот наблюдаются в течение нескольких суток (2-3 суток) до землетрясений в одно и то же местное время. В широкой области ионосферы в период подготовки землетрясений происходит общее увеличение электронной концентрации в слое F2 за 2-3 суток до момента толчка. За сутки до начала землетрясения отмечается локальный минимум электронной концентрации над эпицентральной областью [28].

2.5 Описание алгоритма выявления предвестников землетрясения по данным о ПЭС

Использование ГНСС-данных дает возможность пространственно-временного мониторинга полного электронного содержания, а именно построение карт GIM (Global Ionosphere Map). Карты GIM имеют 2х-часовое временное разрешение, пространственный диапазон по долготе $0^\circ - 360^\circ$, по широте $-90^\circ - 90^\circ$, с размером ячейки 5° по долготе и $2,5^\circ$ по широте. Единицей измерения полного электронного содержания является TECU (total electron content unit; $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$). Карты обновляются каждые сутки.

На основе карт GIM можно проследить нормальный суточный ход ПЭС. Ночной минимум ПЭС составляет 5–7 TECU независимо от сезона, широты и долготы местности. Минимум регистрируется около 05:00 LT (англ. local time, местное время), за исключением высоких широт Южного полушария, т. к. там наблюдается аномальный суточный ход ПЭС из-за системы атмосферных ветров. Максимум суточного хода ПЭС регистрируется в 14:00–15:00 LT и составляет 38 ± 5 TECU в экваториальных широтах, 14 ± 2 TECU на средних широтах, 10 ± 2 TECU в высоких широтах. Наибольшие изменения (20–35 TECU) суточный ход ПЭС имеет в экваториальных широтах, наименьшие (2–6 TECU) – в высоких. Наибольшая амплитуда регистрируется в марте, наименьшая – в декабре. Долготные вариации практически не наблюдаются, что может быть связано с примененным усреднением по широтам. Сравнение усредненных суточных вариаций вертикального ПЭС с поведением критической частоты слоя F2 ионосферы и данными регистрации ПЭС показало, что, несмотря на применяемую интерполяцию, карты GIM дают адекватную картину поведения ионизации в спокойных условиях [29].

Выявление предвестников землетрясения выполняется с помощью фиксирования отклонений в «спокойном» состоянии плазмы ионосферы. Подобные откло-

нения, определяющие период землетрясения, регистрируются относительно усредненных значений электронной концентрации, чувствительных к сейсмической активности, в максимуме слоя F2. Изменение полной электронной концентрации отражает изменение состояния ионосферы в F2-области и ее пространственно-временные изменения, коэффициент корреляции между параметрами ПЭС и f_0F_2 может достигать 0.9 [30].

В настоящее время использование данных ПЭС является одним из наиболее эффективных средств изучения пространственно-временной вариации ионосферы.

В данной главе были рассмотрены процессы подготовки и реализации землетрясений, а также регистрация полного электронного содержания ионосферы. В следующей главе будет осуществлен обзор современных технических средств для создания устройства измерения ПЭС ионосферы.

3 Разработка устройства для измерения полного электронного содержания

3.1 Концепция технологии Arduino

С развитием технологий появляются все новые средства решения прикладных задач. В качестве современного инструмента часто используют открытую программируемую аппаратную платформу Arduino, состоящую из печатной платы с микроконтроллером. Платформа отличается простотой в освоении и использовании. Устройства, собранные на базе Arduino имеют возможность с помощью разнообразных датчиков получать данные о параметрах атмосферы, охватывающих самые разные области изучения. Это, например, данные о температуре, влажности, давлении, количественном содержании и составе газов, а также различные физические параметры [31]. Основным достоинством платформы Arduino является возможность собрать устройство полностью персонализированным и отвечающим индивидуальным потребностям пользователя. Кроме режима работы в непосредственной связи с компьютером, устройства на базе Arduino могут работать автономно, поддерживая связь через WiFi - модули. Связь с платой поддерживается через интегрированную среду разработки - Arduino IDE с интуитивно понятным интерфейсом. Пример реализации плат Arduino представлен на рисунке 3.1.

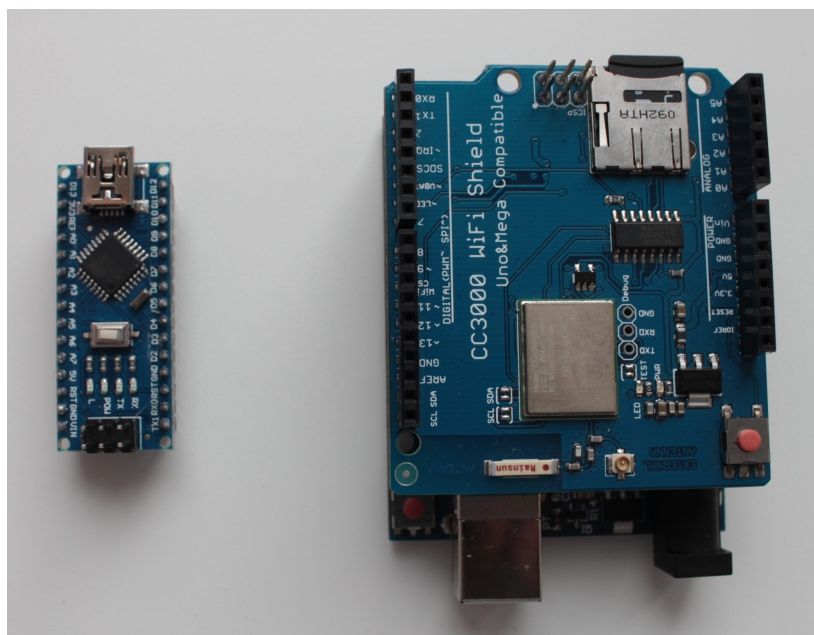
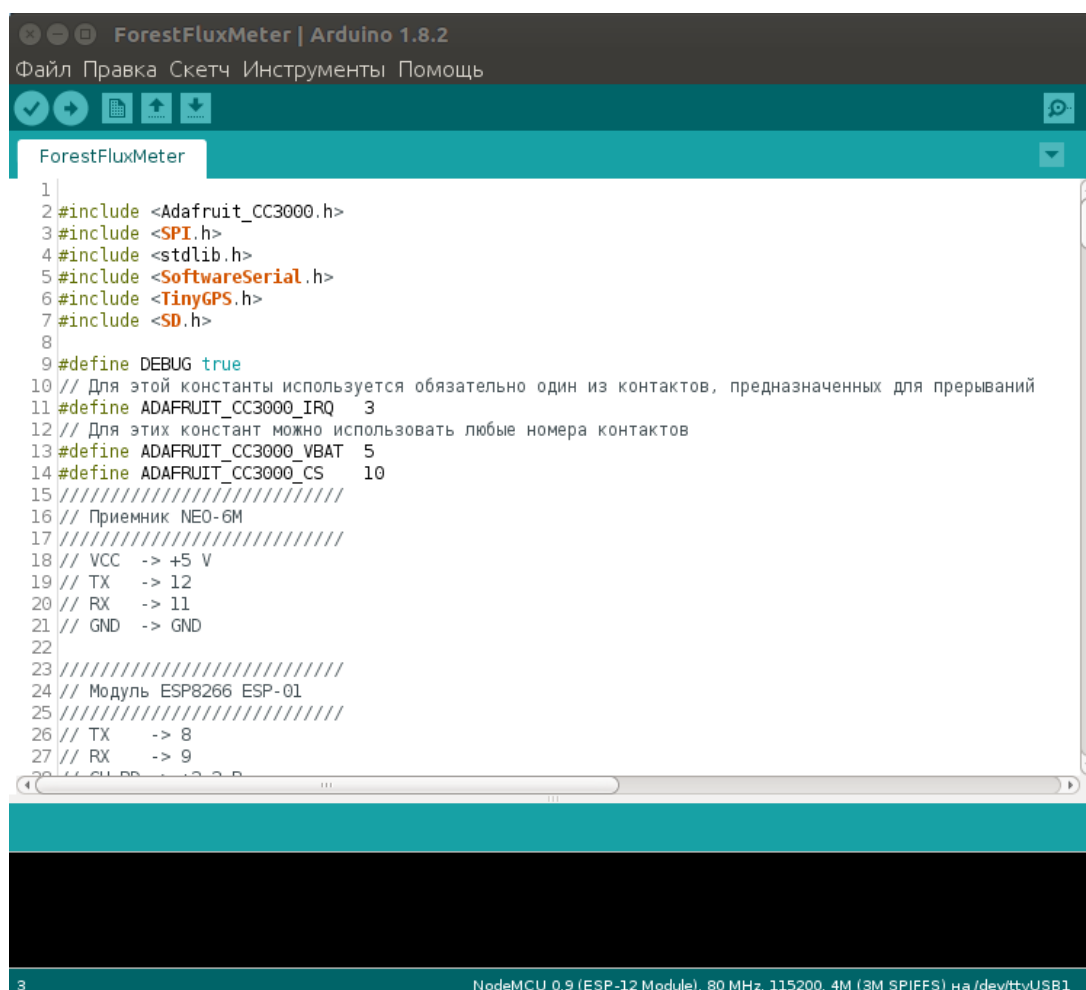


Рисунок 3.1 — Пример аппаратных платформ Arduino

3.2 Интегрированная среда разработки программного обеспечения Arduino IDE

Arduino IDE служит для визуализации работы и коммуникации пользователя с микроконтроллером. В этой среде создаются так называемые скетчи — файлы с инструкциями для устройства, которые загружаются в аппаратную часть платы. Язык написания скетчей похож на язык C/C++ и подходит для использования даже начинающим пользователям. Arduino IDE поддерживается такими операционными системами, как Linux, Windows и Macintosh OS.

Arduino IDE дает возможность выбрать тип микропроцессора, задать скорость получения данных, а также подключать множество дополнительных библиотек, отвечающих различным целям. На рисунке 3.2 представлен пример скетча в среде Arduino IDE.



```
ForestFluxMeter | Arduino 1.8.2
Файл Правка Скетч Инструменты Помощь

ForestFluxMeter

1
2 #include <Adafruit_CC3000.h>
3 #include <SPI.h>
4 #include <stdlib.h>
5 #include <SoftwareSerial.h>
6 #include <TinyGPS.h>
7 #include <SD.h>
8
9 #define DEBUG true
10 // Для этой константы используется обязательно один из контактов, предназначенных для прерываний
11 #define ADAFRUIT_CC3000_IRQ 3
12 // Для этих констант можно использовать любые номера контактов
13 #define ADAFRUIT_CC3000_VBAT 5
14 #define ADAFRUIT_CC3000_CS 10
15 ///////////////////////////////////////////////////
16 // Приемник NEO-6M
17 ///////////////////////////////////////////////////
18 // VCC -> +5 V
19 // TX -> 12
20 // RX -> 11
21 // GND -> GND
22
23 ///////////////////////////////////////////////////
24 // Модуль ESP8266 ESP-01
25 ///////////////////////////////////////////////////
26 // TX -> 8
27 // RX -> 9
28 // GND -> GND
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
1001
1002
1003
1004
1005
1006
1007
1008
1009
1010
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1060
1061
1062
1063
1064
1065
1066
1067
1068
1069
1070
1071
1072
1073
1074
1075
1076
1077
1078
1079
1080
1081
1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095
1096
1097
1098
1099
1100
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1195
1196
1197
1198
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1296
1297
1298
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1400
1401
1402
1403
1404
1405
1406
1407
1408
1409
1410
1411
1412
1413
1414
1415
1416
1417
1418
1419
1420
1421
1422
1423
1424
1425
1426
1427
1428
1429
1430
1431
1432
1433
1434
1435
1436
1437
1438
1439
1440
1441
1442
1443
1444
1445
1446
1447
1448
1449
1450
1451
1452
1453
1454
1455
1456
1457
1458
1459
1460
1461
1462
1463
1464
1465
1466
1467
1468
1469
1470
1471
1472
1473
1474
1475
1476
1477
1478
1479
1480
1481
1482
1483
1484
1485
1486
1487
1488
1489
1490
1491
1492
1493
1494
1495
1496
1497
1498
1499
1500
1501
1502
1503
1504
1505
1506
1507
1508
1509
1510
1511
1512
1513
1514
1515
1516
1517
1518
1519
1520
1521
1522
1523
1524
1525
1526
1527
1528
1529
1530
1531
1532
1533
1534
1535
1536
1537
1538
1539
1540
1541
1542
1543
1544
1545
1546
1547
1548
1549
1550
1551
1552
1553
1554
1555
1556
1557
1558
1559
1560
1561
1562
1563
1564
1565
1566
1567
1568
1569
1570
1571
1572
1573
1574
1575
1576
1577
1578
1579
1580
1581
1582
1583
1584
1585
1586
1587
1588
1589
1590
1591
1592
1593
1594
1595
1596
1597
1598
1599
1600
1601
1602
1603
1604
1605
1606
1607
1608
1609
1610
1611
1612
1613
1614
1615
1616
1617
1618
1619
1620
1621
1622
1623
1624
1625
1626
1627
1628
1629
1630
1631
1632
1633
1634
1635
1636
1637
1638
1639
1640
1641
1642
1643
1644
1645
1646
1647
1648
1649
1650
1651
1652
1653
1654
1655
1656
1657
1658
1659
1660
1661
1662
1663
1664
1665
1666
1667
1668
1669
1670
1671
1672
1673
1674
1675
1676
1677
1678
1679
1680
1681
1682
1683
1684
1685
1686
1687
1688
1689
1690
1691
1692
1693
1694
1695
1696
1697
1698
1699
1700
1701
1702
1703
1704
1705
1706
1707
1708
1709
1710
1711
1712
1713
1714
1715
1716
1717
1718
1719
1720
1721
1722
1723
1724
1725
1726
1727
1728
1729
1730
1731
1732
1733
1734
1735
1736
1737
1738
1739
1740
1741
1742
1743
1744
1745
1746
1747
1748
1749
1750
1751
1752
1753
1754
1755
1756
1757
1758
1759
1760
1761
1762
1763
1764
1765
1766
1767
1768
1769
1770
1771
1772
1773
1774
1775
1776
1777
1778
1779
1780
1781
1782
1783
1784
1785
1786
1787
1788
1789
1790
1791
1792
1793
1794
1795
1796
1797
1798
1799
1800
1801
1802
1803
1804
1805
1806
1807
1808
1809
1810
1811
1812
1813
1814
1815
1816
1817
1818
1819
1820
1821
1822
1823
1824
1825
1826
1827
1828
1829
1830
1831
1832
1833
1834
1835
1836
1837
1838
1839
1840
1841
1842
1843
1844
1845
1846
1847
1848
1849
1850
1851
1852
1853
1854
1855
1856
1857
1858
1859
1860
1861
1862
1863
1864
1865
1866
1867
1868
1869
1870
1871
1872
1873
1874
1875
1876
1877
1878
1879
1880
1881
1882
1883
1884
1885
1886
1887
1888
1889
1890
1891
1892
1893
1894
1895
1896
1897
1898
1899
1900
1901
1902
1903
1904
1905
1906
1907
1908
1909
1910
1911
1912
1913
1914
1915
1916
1917
1918
1919
1920
1921
1922
1923
1924
1925
1926
1927
1928
1929
1930
1931
1932
1933
1934
1935
1936
1937
1938
1939
1940
1941
1942
1943
1944
1945
1946
1947
1948
1949
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
2051
2052
2053
2054
2055
2056
2057
2058
2059
2060
2061
2062
2063
2064
2065
2066
2067
2068
2069
2070
2071
2072
2073
2074
2075
2076
2077
2078
2079
2080
2081
2082
2083
2084
2085
2086
2087
2088
2089
2090
2091
2092
2093
2094
2095
2096
2097
2098
2099
2100
2101
2102
2103
2104
2105
2106
2107
2108
2109
2110
2111
2112
2113
2114
2115
2116
2117
2118
2119
2120
2121
2122
2123
2124
2125
2126
2127
2128
2129
2130
2131
2132
2133
2134
2135
2136
2137
2138
2139
2140
2141
2142
2143
2144
2145
2146
2147
2148
2149
2150
2151
2152
2153
2154
2155
2156
2157
2158
2159
2160
2161
2162
2163
2164
2165
2166
2167
2168
2169
2170
2171
2172
2173
2174
2175
2176
2177
2178
2179
2180
2181
2182
2183
2184
2185
2186
2187
2188
2189
2190
2191
2192
2193
2194
2195
2196
2197
2198
2199
2200
2201
2202
2203
2204
2205
2206
2207
2208
2209
2210
2211
2212
2213
2214
2215
2216
2217
2218
2219
2220
2221
2222
2223
2224
2225
2226
2227
2228
2229
2230
2231
2232
2233
2234
2235
2236
2237
2238
2239
2240
2241
2242
2243
2244
2245
2246
2247
2248
2249
2250
2251
2252
2253
2254
2255
2256
2257
2258
2259
2260
2261
2262
2263
2264
2265
2266
2267
2268
2269
2270
2271
2272
2273
2274
2275
2276
2277
2278
2279
2280
2281
2282
2283
2284
2285
2286
2287
2288
2289
2290
2291
2292
2293
2294
2295
2296
2297
2298
2299
2300
2301
2302
2303
2304
2305
2306
2307
2308
2309
2310
2311
2312
2313
2314
2315
2316
2317
2318
2319
2320
2321
2322
2323
2324
2325
2326
2327
2328
2329
2330
2331
2332
2333
2334
2335
2336
2337
2338
2339
2340
2341
2342
2343
2344
2345
2346
2347
2348
2349
2350
2351
2352
2353
2354
2355
2356
2357
2358
2359
2360
2361
2362
2363
2364
2365
2366
2367
2368
2369
2370
2371
2372
2373
2374
2375
2376
2377
2378
2379
2380
2381
2382
2383
2384
2385
2386
2387
2388
2389
2390
2391
2392
2393
2394
2395
2396
2397
2398
2399
2400
2401
2402
2403
2404
2405
2406
2407
2408
2409
2410
2411
2412
2413
2414
2415
2416
2417
2418
2419
2420
2421
2422
2423
2424
2425
2426
2427
2428
2429
2430
2431
2432
2433
2434
2435
2436
2437
2438
2439
2440
2441
2442
2443
2444
2445
2446
2447
2448
2449
2450
2451
2452
2453
2454
2455
2456
2457
2458
2459
2460
2461
2462
2463
2464
2465
2466
2467
2468
2469
2470
2471
2472
2473
2474
2475
2476
2477
2478
2479
2480
2481
2482
2483
2484
2485
2486
2487
2488
2489
2490
2491
2492
2493
2494
2495
2496
2497
2498
2499
2500
2501
2502
2503
2504
2505
2506
2507
2508
2509
2510
2511
2512
2513
2514
2515
2516
2517
2518
2519
2520
2521
2522
2523
2524
2525
2526
2527
2528
2529
2530
2531
2532
2533
2534
2535
2536
2537
2538
2539
2540
2541
2542
2543
2544
2545
2546
2547
2548
2549
2550
2551
2552
2553
2554
2555
2556
2557
2558
2559
2560
2561
2562
2563
2564
2565
2566
```

3.3 Модуль ГЛОНАСС/GPS-приемника uBlox NEO-M8

Рассматриваемый метод дистанционного мониторинга атмосферы предполагает использование приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. Получить данные с подобных приемников можно путем подключения к Arduino специального ГНСС - модуля. Например, модуль серии uBlox NEO-M8N. Этот модуль использует сигналы, излучаемые космическим аппаратом, чтобы определить расстояние до каждого спутника на орбите, от которого идет прием навигационного сигнала.

Модуль NEO-M8N принимает и отслеживает сигналы нескольких ГНСС систем: GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BEIDOU. По умолчанию приемник настроен одновременно на системы GPS и ГЛОНАСС. Для более экономного энергопотребления приемник должен быть настроен на одну операцию с ГНСС системой [33].

Информация от спутников принимается в двух форматах: NMEA и собственный формат модуля — UBX. На рисунке 3.3 представлен внешний вид модуля u-blox NEO-M8N. В таблице 3.1 приведены сообщения, формируемые по умолчанию.

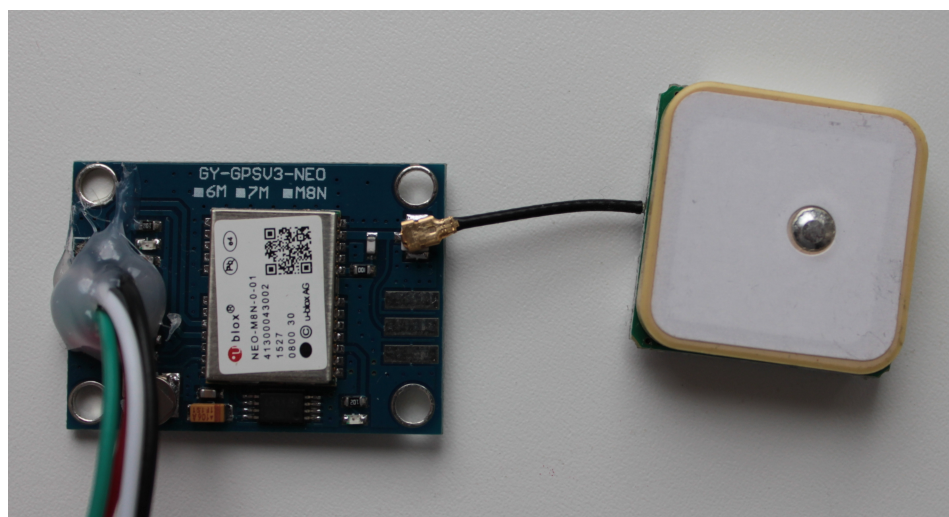


Рисунок 3.3 — Модуль ГЛОНАСС/GPS-приемника u-blox NEO-M8N

3.4 Микропроцессорный модуль Arduino Nano

Arduino Nano - это компактная макетная плата на основе микроконтроллера ATmega328 (Arduino Nano 3.0), благодаря своим небольшим размерам удобная

в лабораторном использовании. Плата может использовать внешний источник питания (5В) или от подключения через MiniB USB. Микроконтроллер ATmega328 имеет флеш память 32 кБ (из которых 2 кБ необходимы для загрузчика) [32]. Внешний вид представлен на рисунке 3.4.

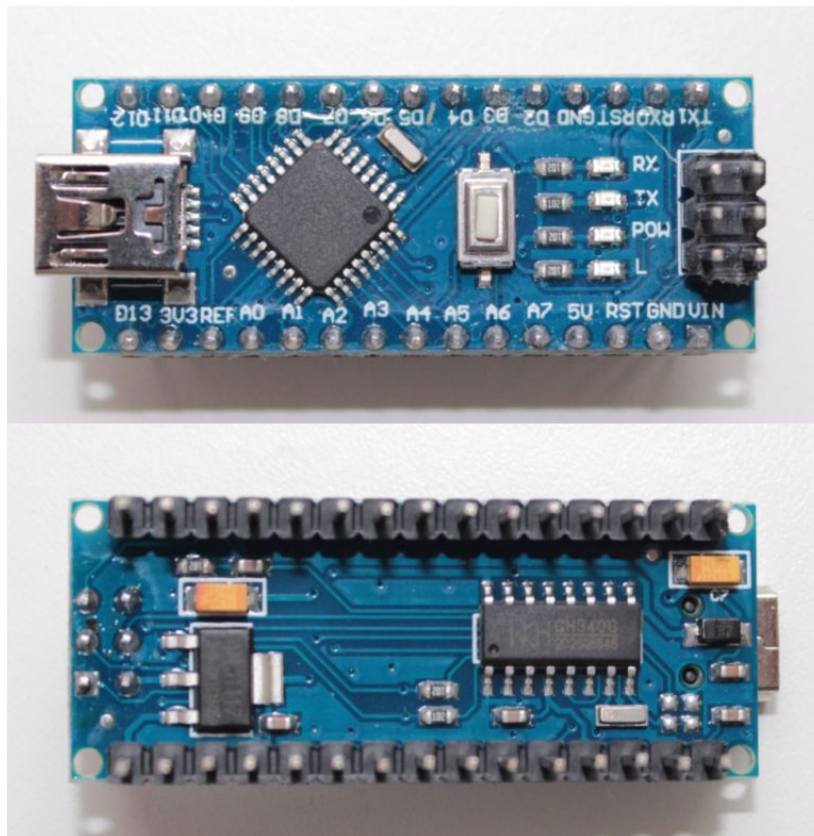


Рисунок 3.4 — Микропроцессорный модуль Arduino Nano

Работа с платой происходит с помощью среды разработки Arduino IDE. В меню среды выбираются конфигурации платы и микроконтроллера. Arduino Nano имеет ряд средств для связи с компьютером, другими устройствами Arduino или микроконтроллерами.

На ATmega328 это обеспечивает интерфейс последовательной связи UART TTL (5 В), который доступен на цифровых выводах 0 (RX) и 1 (TX). Чип платы FTDI FT232RL обеспечивает работу интерфейса через USB. При наличии необходимости, существует возможность создать виртуальный COM порт для успешной работы программы на компьютере. Программное обеспечение Arduino включает в себя последовательный монитор, который позволяет отправлять и получать простые текстовые данные при подключении к плате. Светодиоды RX и TX на платформе будут «мигать» при передаче данных через микросхему FTDI или USB

подключение (исключая использование последовательной передачи данных через выводы 0 и 1).

3.5 Модуль микроконтроллера ESP8266

Модуль ESP8266 осуществляет возможность получения по средствам WiFi показаний датчиков подключенных к нему устройств, а также непосредственно управлять устройствами.

Модуль WiFi ESP8266 представляет собой автономную систему на кристалле (электронная схема, выполняющая функции целого устройства, СнК) с интегрированным стеком протоколов TCP/IP, который может предоставить любому микроконтроллеру доступ к сети Wi-Fi. ESP8266 способен либо размещать приложение, либо разгружать все сетевые функции Wi-Fi от другого прикладного процессора. Каждый модуль ESP8266 поставляется с предварительно запрограммированной прошивкой для AT-команд, его можно просто подключить его к устройству Arduino через UART и получить столько же возможностей WiFi, сколько предлагает WiFi Shield. Для питания ESP8266 требуется 3.3В, поэтому при подключении к управляющей плате 5В необходимо воспользоваться делителем напряжения [34].

Модуль ESP8266 - это чрезвычайно эффективная плата с огромным и постоянно растущим сообществом пользователей. Внешний вид платы NodeMCU 1.0 представлен на рисунке 3.5.

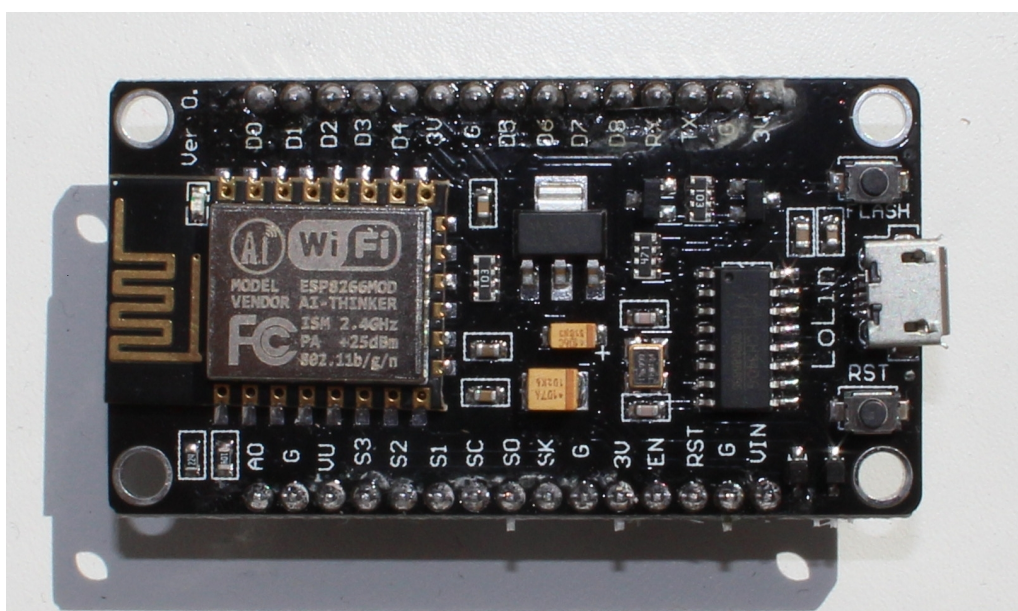


Рисунок 3.5 — Модуль микроконтроллера ESP8266

3.6 Алгоритм обработки данных измерений

Для работы ГНСС-модуля, подключенного к плате Arduino необходимо в тексте скетча указать подключение соответствующих функционалу библиотек. Библиотека TinyGPS подключается для возможности парсинга NMEA-данных, библиотека SoftwareSerial — непосредственно для подключения приемника u-Blox NEO-M8. Далее устанавливается скорость последовательного порта и его инициализация для подключения ГНСС-приемника. После прохождения инициализации происходит ожидание данных от модуля. Данные считываются с последовательного порта и проходят процесс обработки. Подобный алгоритм повторяется вновь по сигналу готовности от модуля. Поскольку скетч является единственной программой в микроконтроллере, то выход из алгоритма возможен только при выключении питания.

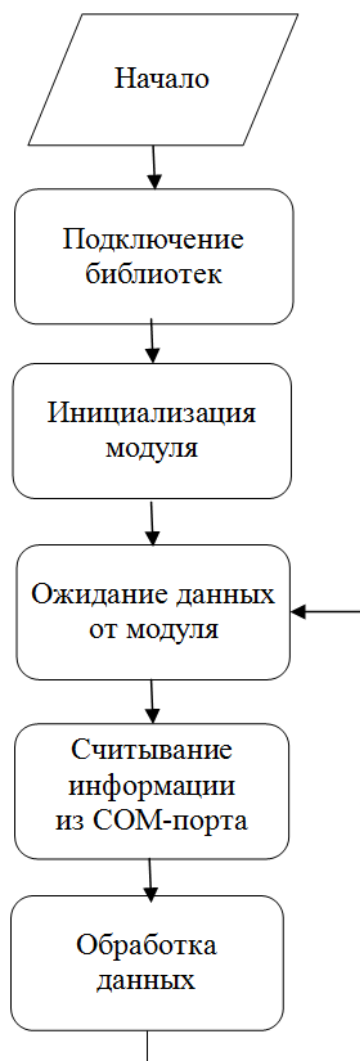


Рисунок 3.6 — Блок-схема работы алгоритма обработки данных измерений

На основе обзора характеристик и функционала модулей можно сделать вывод, что устройства на базе технологии Arduino подходят для сборки прототипного устройства определения ПЭС ионосферы одночастотным методом. О методике обработки полученных данных будет сказано в следующей главе.

Таблица 3.1 — Таблица сообщений по умолчанию модуля ГЛОНАСС/GPS

Интерфейс	Настройки
Вывод по UART	9600 бод, 8 бит, бит четности, 1 стоповый бит. Настроен для передачи как NMEA, так и UBX протоколов, но только следующие NMEA (и без UBX). Сообщения, активированные при запуске: GGA, GLL, GSA, GSV, RMC, VTG, TXT
Выход USB	Настроен для передачи как NMEA, так и UBX протоколов, но только следующие NMEA (и без UBX). Сообщения, активированные при запуске: GGA, GLL, GSA, GSV, RMC, VTG, TXT. Режим питания USB: питание от шины
Вход по UART	9600 бод, 8 бит, бит четности, 1 стоповый бит, автовысылка отключена. Автоматически принимает следующие протоколы без необходимости явной настройки: UBX, NMEA, RTCM. Приемник GNSS поддерживает чередующиеся сообщения UBX и NMEA
USB вход	Автоматически принимает следующие протоколы без необходимости явной настройки: UBX, NMEA Приемник GPS поддерживает чередующиеся сообщения UBX и NMEA. Режим питания USB: питание от шины
DDC	Полностью совместим со стандартом I2 C, доступным для связи с внешним хост-процессором или сотовыми модулями u-blox, работающими только в режиме ведомого устройства. Сообщения по умолчанию активированы. NMEA и UBX включены в качестве входных сообщений, в качестве выходных сообщений - только NMEA. Максимальная скорость передачи 400 кбит с
SPI	Обмен данными с центральным процессором, работающим только в ведомом режиме. Сообщения по умолчанию активированы. SPI недоступен в конфигурации по умолчанию
Частота импульсов (1Гц)	1 импульс/с, синхронизирован по переднему фронту, длительностью 100 мс

4 Результаты измерений полного электронного содержания ионосферы

4.1 Формат хранения навигационных данных RINEX

RINEX (Receiver Independent Exchange Format) является самым распространенным форматом обмена навигационными данными, который служит основой для высокоточной обработки данных глобальной навигационной системы.

RINEX-формат используется для обработки навигационной системой «сырых» данных со спутников. Это дает пользователям возможность обрабатывать данные для поиска новых и более эффективных решений проблем с использованием дополнительных данных, которые не были доступны в исходном наборе информации. Расчеты, измерения и информация о местоположении, предоставляемые геоинформационными системами могут передаваться между несколькими спутниками и приемниками, каждый из которых может изменять, организовывать и управлять информацией. Формат обмена RINEX может быть интерпретирован большинством программ, предназначенным для обработки навигационных данных. Таким образом, появляется возможность обрабатывать данные вне зависимости от типа получателя или производителя, обеспечивая глобальную навигационную индустрию коммуникационной инфраструктурой [36].

Глобальные навигационные системы постоянно развиваются и RINEX-формат непрерывно адаптируется под эти условия. Он использует самые современные навигационные технологии, чтобы отвечать современным требованиям. Каждое новое обновление RINEX поставляется с поддержкой новых измерений и более совершенными функциями обработки данных.

В настоящее время формат состоит из семи типов файлов в ASCII:

1. файл данных наблюдений;
2. файл навигационного сообщения;
3. файл метеорологических данных;
4. файл навигационных сообщений ГЛОНАСС;
5. файл навигационных сообщений GEO;
6. файл данных часов спутников и приемников;
7. файл широкозонной корректирующей информации SBAS.

Каждый файл состоит из раздела заголовка и раздела данных. Раздел заголовка содержит глобальную информацию для всего файла и помещается в начале файла. Раздел заголовка содержит метки заголовков в столбцах 61-80 для каждой строки, содержащейся в разделе заголовка. Эти метки являются обязательными и должны отображаться в точности так, как указано в описании формата. Формат файла RINEX предназначен для экономии места. Он оптимизирован для удовлетворения минимальных требований к пространству. В компьютерных системах, допускающих запись переменной длины в результате наблюдения, сообщение делается максимально сжатым. Пробелы могут удаляться из записей. Максимальная длина составляет 80 байт на каждую запись. RINEX-файл включает в себя текстовые форматы для: наблюдения ("o"), навигация ("n"), метеорология ("m"), данные ионосферы («i»). Конвенция имени файла RINEX: местоположение кодируют буквы SSSS, номер дня года DDD, сессия T и год YY:

SSSSDDDT.YY_o (файл наблюдений RINEX, ГНСС данные о местоположении);

SSSSDDDT.YY_n (навигационный файл RINEX).

Например, hers1270.03_o является данными наблюдения для «Herstmonceaux», день 127, сессия 0, 2003 год. Все даты и время указываются в системной шкале времени GPS (GPST).

Для эффективного обмена данными между файлами RINEX-файлы должны следовать строгому и обязательному разделу заголовка и рекомендуемому соглашению об именах, чтобы сэкономить место для хранения и обеспечить максимальную совместимость со всем программным обеспечением обработки. Перед хранением или передачей происходит сжатие файлов.

4.2 Программные средства обработки данных измерений сигналов навигационных спутников

Для использования всего функционала ГНСС-модуля при работе через Arduino IDE необходимо установить дополнительные библиотеки. Библиотеки представляют собой набор кодов, которые упрощают подключение к модулю. В Интернете для скачивания доступны сотни дополнительных библиотек. Для целей определения ПЭС понадобятся следующие библиотеки [37]:

1) Библиотека SPI позволяет общаться с устройствами SPI (Serial Peripheral Interface (SPI) — последовательный периферийный интерфейс, шина SPI), используя Arduino в качестве ведущего устройства. SPI - это синхронный последовательный протокол данных, используемый микроконтроллерами для быстрой связи с одним или несколькими периферийными устройствами на коротких расстояниях. Он также может использоваться для связи между двумя микроконтроллерами. При использовании SPI-соединения всегда имеется одно ведущее устройство (обычно это микроконтроллер), которое управляет периферийными устройствами. Обычно для всех устройств используются три линии: MISO (Master In Slave Out) - подчиненная линия для отправки данных ведущему устройству, MOSI (Master Out Slave In) - мастер-линия для отправки данных на периферийные устройства, SCK (Serial Clock) - импульсы синхронизации, которые синхронизируют передачу данных, сгенерированную ведущим. И одна строка для каждого устройства: SS (Slave Select) - контакт на каждом устройстве, который мастер может использовать для включения и выключения определенных устройств.

Когда контакт SS устройства находится на низком уровне, он обменивается данными с ведущим. Когда он высок, он игнорирует мастера. Это позволяет иметь несколько устройств SPI, использующих одни и те же линии MISO, MOSI и CLK.

2) Библиотека SoftwareSerial была разработана для обеспечения последовательной связи на других цифровых контактах Arduino, используя программное обеспечение для репликации функциональности. Возможно иметь несколько программных последовательных портов со скоростью до 115200 бит / с.

Аппаратное обеспечение Arduino имеет встроенную поддержку последовательной связи на выводах 0 и 1 (которая также поступает на компьютер через USB-соединение). Собственная последовательная поддержка осуществляется через аппаратное обеспечение (встроенное в микросхему), называемое UART. Это аппаратное обеспечение позволяет чипу Atmega принимать последовательную связь даже во время работы над другими задачами, при условии наличия места в 64-байтовом последовательном буфере.

3) TinyGPS ++ - библиотека Arduino для анализа потоков данных NMEA, предоставляемых модулями GPS. Эта библиотека предоставляет компактные и простые в использовании методы для извлечения местоположения, даты, времени, высоты, скорости и курса с потребительских GPS-устройств. Библиотека может

извлекать произвольные данные из любого множества предложений NMEA, даже из собственных.

Кроме подключения модуля через Arduino, существует возможность пользоваться официальной программой «u-center», работающей с ГНСС-модулями U-blox. U-center является мощным инструментом оценки и визуализации ГНСС-информации от модулей u-blox. Он позволяет пользователям оценивать и тестировать чипы и ГНСС-модули позиционирования u-blox для навигации и определения местоположения.

Цель u-center - предоставить пользователям возможность: проводить эксплуатационные испытания на u-blox и других устройствах ГНСС, конфигурировать чипы и ГНСС-модули позиционирования u-blox и обновлять прошивку на модулях.

В данной программе имеется возможность выбора формата получаемых данных. В зависимости от цели для дальнейшего использования можно выбрать NMEA или UBX-форматы. Пользователь ставит фильтры, исключая ненужные ему данные, что значительно сокращает объем выходных файлов.

4.3 Методика определения ПЭС по навигационным данным

В настоящее время существует несколько методов определения полного электронного содержания ионосферы: использование двухчастотной и одночастотной аппаратуры. Двухчастотные кодовые приемники ГНСС-сигналов не могут обеспечить экономически эффективное решение для большинства пользователей. Недостатком также является неспособность установления связи с достаточным количеством видимых спутников: в городских районах из-за плохой видимости, в отдаленных районах из-за отсутствия густой сети наблюдений.

Определение же ПЭС ионосферы одночастотным навигационным приемником осуществляется на основе обработки кодовых и фазовых измерений псевдодальности на одной несущей частоте. Метод основан на определении разностей между двумя последовательными измерениями псевдодальностей, измеренных по коду и по фазе несущей частоты радиосигнала. На основе метода [38] были получены формулы:

$$TEC = \frac{(\Delta P_k - \Delta L_k) \cdot f^2}{80.8 \cdot [m_i(\beta_k) - m_i(\beta_{k-1})]} + \frac{\varepsilon \cdot f^2}{80.8 \cdot [m_i(\beta_k) - m_i(\beta_{k-1})]}, (1)$$

где $(\Delta P_k - \Delta L_k)$ - приращение псевдодальностей, измеренных по дальномерному коду и фазе несущей частоты; ТЕС - полное электронное содержание ионосферы; $[m_i(\beta_k) - m_i(\beta_{k-1})]$ - разность отображающих функций (предназначена для пересчета вертикальной задержки сигнала в наклонную).

Формула для расчета отображающей функции:

$$m_i = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R \cdot \cos(\frac{h}{180 \cdot \pi})}{R + Z_{max}}\right)^2}}, (2)$$

где R - средний радиус Земли, равный 6371221 м; Z_{max} - высота максимума содержания электронов в ионосфере, равная 432500 м.

Одночастотный приемник может обеспечить дециметровую точность и, как правило, достигает этого уровня точности гораздо быстрее, чем двухчастотный приемник. Эта модель очень эффективна с точки зрения вычислительной сложности и удаляет более 50% ошибок ионосферы, а также все ошибки тропосферы.

На рисунке 4.1 [39] представлен график распределения полной электронной концентрации от времени. Значения полной электронной концентрации рассчитаны по формуле (1).

4.4 Результаты экспериментов по регистрации ПЭС ионосферы

На основе рисунка 4.1 можно сделать вывод, что использование формулы (1) дает шум, значения которого превышают значения ПЭС. Для выделения полезного сигнала и устранения шума целесообразно применять фильтрацию. В данном случае был использован фильтр Калмана, который основан на принципе непрерывной рекурсивной корректировки измерений по мере их поступления. В случае обработки ПЭС ионосферы фильтр Калмана учитывает ошибки точности измерений дальности до приемника и изменчивость значений ПЭС, минимизируя среднеквадратичную ошибку измерений. На рисунке 4.2 [39] представлен график изменения ПЭС ионосферы по времени, прошедший фильтрацию Калмана с применением стандартного математического аппарата.

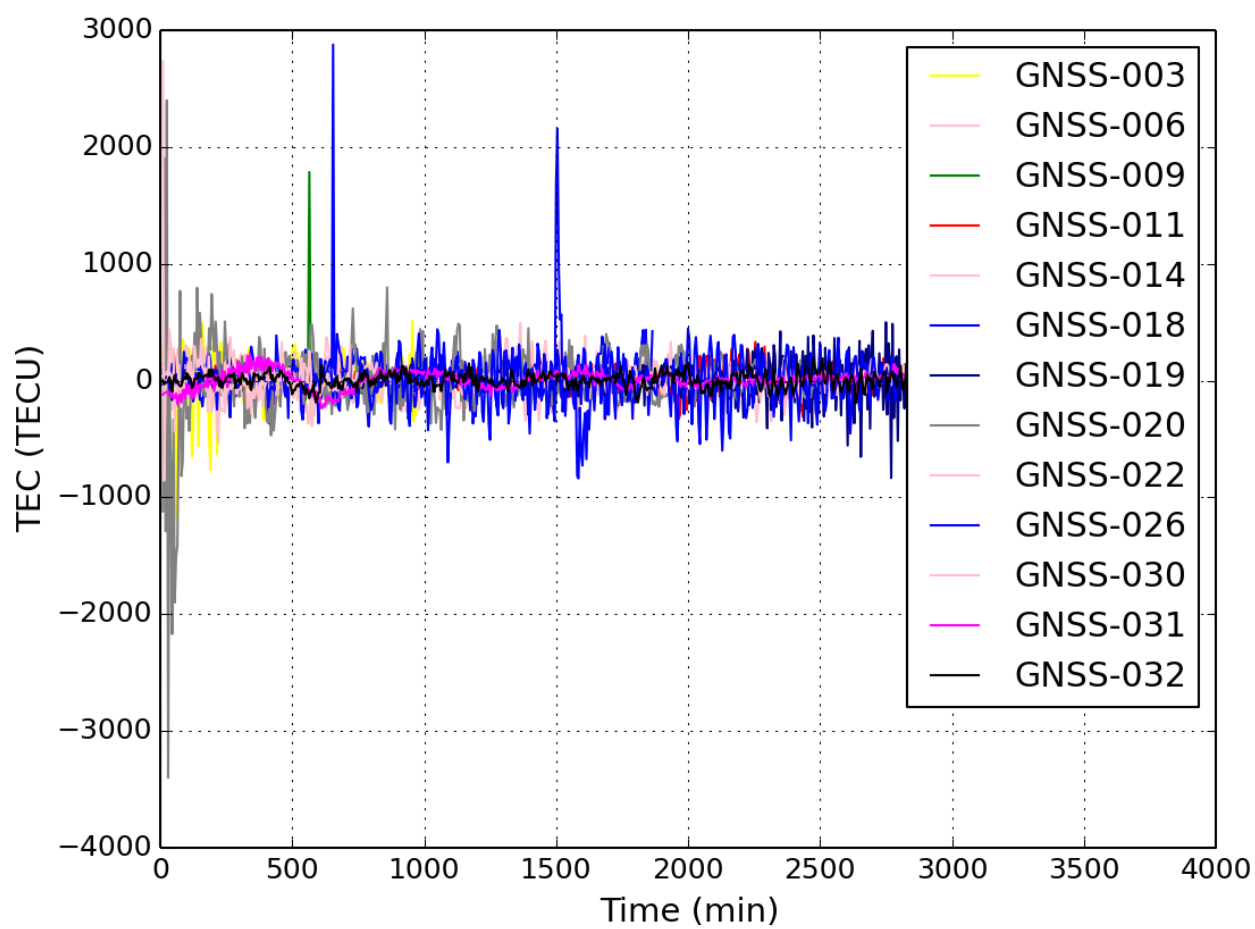


Рисунок 4.1 — График зависимости ПЭС от времени

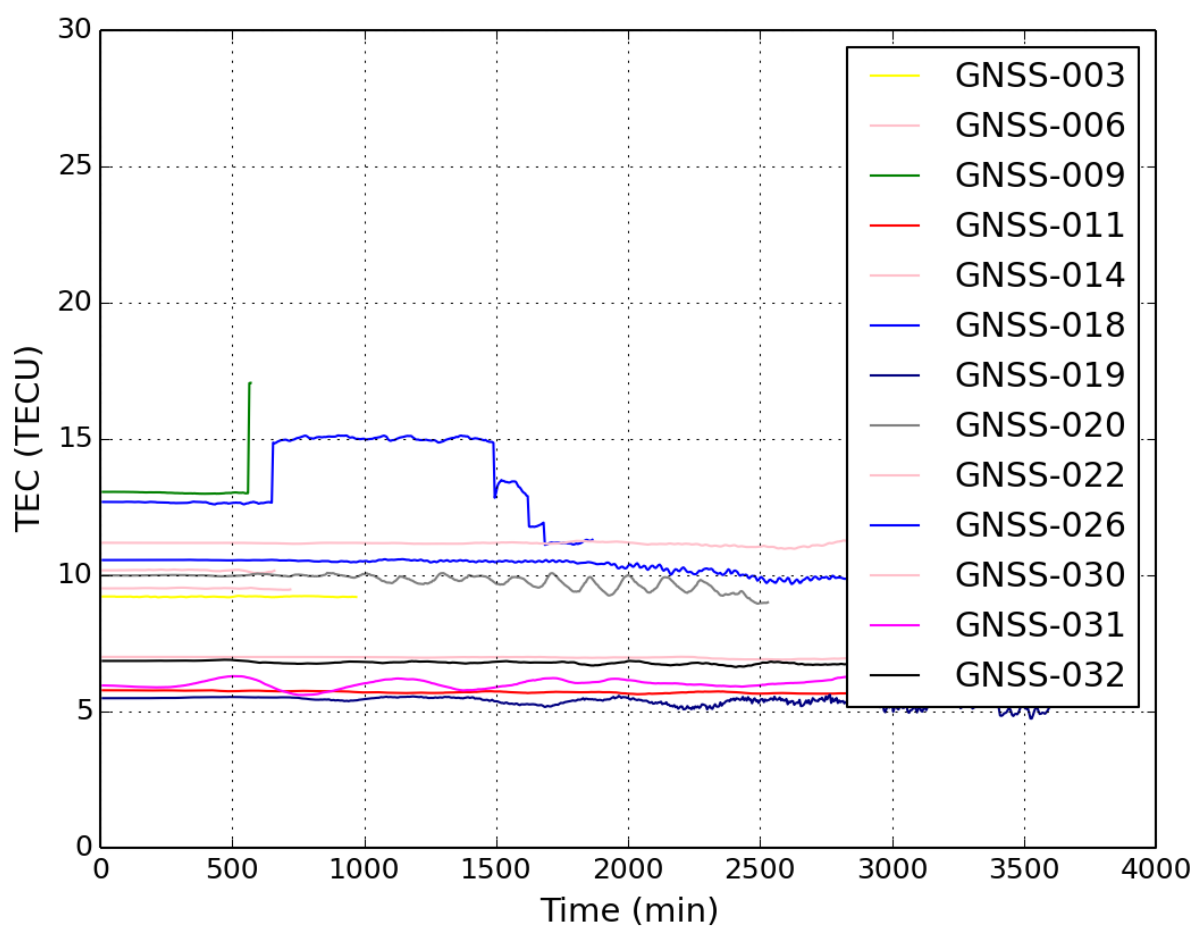


Рисунок 4.2 — График зависимости ПЭС от времени

Заключение

В ходе проделанной работы были достигнуты следующие цели:

- осуществлен обзор современных аппаратных средств для создания устройства измерения ПЭС;
- создан прототип устройства определения ПЭС ионосферы одночастотным методом на основе микропроцессорной платы с подключенным ГНСС-модулем;
- разработана и апробирована методика обработки первичных навигационных данных, служащих основой для высокоточных расчетов ПЭС.

Возможность использования одночастотных приемников ГЛОНАСС и GPS для мониторинга ионосферы действительно интересна, так как это позволяет уплотнять количество наблюдений, которые могут быть проанализированы, чтобы получить полную томографию ионосферы. Развитие ГНСС-технологий и методов ассимиляции позволяет улучшить наше понимание ионосферы. В ближайшем будущем ПЭС будет все чаще использоваться для обнаружения механизма сейсмо-ионосферной связи. Регистрация ПЭС посредством дистанционного ГНСС зондирования является потенциальным методом обнаружения предвестников землетрясений. С большим количеством таких систем возможно не только обнаружить аномалию ПЭС, но и расположение эпицентра на основе пространственного анализа вариаций ПЭС. Эти данные могут помочь в уменьшении последствий землетрясений.

Проведенное исследование показало, что существует возможность мониторинга и выявления ионосферных предвестников землетрясений в сейсмоопасных районах с применением одночастотных измерений на основе радиосигналов навигационной спутниковой системы.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на осуществление серии натурных измерений одночастотным и двухчастотным методами в сейсмоопасных регионах для верификации разработанной методики.

Список использованных источников

- 1 Брюнелли Б.Е. *Физика ионосферы [Текст]* / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе. - М.: Наука, 1988. - 528 с.
- 2 *Источник рисунка [Электронный ресурс]*. - URL: <http://umlcar.uml.edu/index.html> (дата обращения: 05.01.2017)
- 3 *Источник рисунка [Электронный ресурс]*. - URL: <http://www.haystack.edu/atm/mho/iswg/isrmap.gif> (дата обращения: 09.01.2017)
- 4 Смирнов В.М. *Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС [Текст]* / В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова. - Журнал радиоэлектроники. – 2010. – №6. – С.1-16.
- 5 Яковлев О.И. *Возможности радиозатенного мониторинга нижней ионосферы на трассах спутник-спутник [Текст]* / О.И. Яковлев, В.А. Ануфриев, И. Викерт, С.С. Матюгов . - Аудиотехника и электроника. – 2008. – №2. – С.169-176.
- 6 Терещенков Е.Д. *Определение полного электронного содержания по сигналам спутников глобальной навигационной системы ГЛОНАСС [Текст]* // Полярный геофизический институт КНЦ РАН / Е.Д. Терещенко, А.Н. Миличенко, М.В. Швец, С.М. Черняков, И.В. Кораблева. - Вестник Кольского научного центра РАН. – 2015. – 1(20) – С.32-43
- 7 *Метео Энциклопедия [Электронный ресурс]*. - URL: <http://www.meteorologist.ru/> (дата обращения: 27.01.2017)
- 8 *Школа молодых ученых ИДГ РАН [Электронный ресурс]*. - URL: <http://www.geospheres.ru/> (дата обращения: 02.02.2017)
- 9 *Источник рисунка [Электронный ресурс]*. - URL: <http://isr.sri.com/iono/amisr/> (дата обращения: 04.02.2017)
- 10 *ИАЦ координатно-временного и навигационного обеспечения [Электронный ресурс]*. - URL: <http://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/index.php> (дата обращения: 05.02.2017)
- 11 *Helmholtz Centre Potsdam [Электронный ресурс]*. - URL: <http://op.gfz-potsdam.de/champ/> (дата обращения: 05.02.2017)
- 12 *Источник рисунка [Электронный ресурс]*. - URL: http://op.gfz-potsdam.de/champ/media_CAMP/champfront.jpg

- (дата обращения: 05.02.2017)
- 13 *COSMIC Program Office [Электронный ресурс].* - URL: <http://cosmic.ucar.edu/about.html> (дата обращения: 07.02.2017)
- 14 *Источник рисунка [Электронный ресурс].* - URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:COSMIC-FORMOSAT-3.jpg> (дата обращения: 07.02.2017)
- 15 *Center for Space Research [Электронный ресурс].* - URL: <http://www.csr.utexas.edu/grace/mission/> (дата обращения: 08.02.2017)
- 16 *Center for Space Research [Электронный ресурс].* - URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/grace> (дата обращения: 09.02.2017)
- 17 Григорьев А.С. *Обнаружение ионосферных и тропосферных откликов сейсмической активности по спутниковым данным [Текст] / А.С. Григорьев, В.Б. Кашкин.* - Вестник СибГАУ. – 2013. – №5(51) – С.152-156
- 18 *Глобальная численная модель верхней атмосферы Земли [Электронный ресурс].* - URL: https://uamod.wordpress.com/keywords/traveling_ionospheric_disturbances/ (дата обращения: 06.03.2017)
- 19 Хомяков А.А. *Волновые возмущения в околоземной плазме по данным спутникового зондирования [Текст] // Автореферат диссертации/ А.А. Хомяков.* - Ростов-на-Дону. – 2014
- 20 Липеровский В.А. *Литосферно-ионосферные связи перед землетрясениями [Текст] // Изв. АН СССР / В.А. Липеровский, В.А. Гладышев, С.Л. Шалимов.* - Физика Земли. – 1991. – №3 – С.26-35
- 21 Данилов А.Д. *Метеорологические эффекты в ионосфере [Текст] / А.Д. Данилов, Э.С. Казимировский, Г.В. Вергасова.* - Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 271 с.
- 22 Афраймович Э.Л. *Определение характеристик ионосферного возмущения в ближней зоне эпицентра землетрясения [Текст] / Э.Л. Афраймович, В.В. Кирюшкин, Н.П. Перевалова.* - Радиотехника и электроника. – 2002. – №7(47). – С.830.
- 23 Namgaladze A.A. *Ionospheric total electron content variation observed before earthquakes: possible physical mechanism and modeling [Text] / A.A. Namgaladze, O.V. Zolotov, I.E. Zakharenkova, I.I. Shagimuratov, O.V. Martynenko.* - Proceedings of the

- MSTU. – 2009. – №2(12). – P.308-315.
- 24 Пулинец С.А. *Зависимость сейсмоионосферных вариаций в максимуме слоя от местного времени [Текст]* / С.А. Пулинец, А.Д. Легенька, Т.И. Зеленова. - Геомагнетизм и аэрономия. – 1998. – №3(38). – С. 178.
- 25 Захаренкова И.Е. *Исследование ионосферных эффектов, ассоциированных с землетрясениями в Японии, по данным GPS-измерений [Текст]* / И.Е. Захаренкова, А.Ф. Лаговский, И.И. Шагимурастов. - Вестник РГУ им. И.Канта. – 2006. – №10. – С.58-64.
- 26 Pulinet S.A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes [Text]* / S.A. Pulinets, K.A. Boyarchuk. - Springer. – 2005. – P.315.
- 27 Золотов О.В. *Эффекты землетрясений в вариациях полного электронного содержания ионосферы [Текст]* // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / О.В. Золотов. - ФГБОУВПО «МГТУ». – 2015. – С.146.
- 28 Белинская А.Ю. *Сейсмические эффекты в ионосфере по результатам мониторинга F-слоя над Новосибирском [Текст]* / А.Ю. Белинская, С.Ю. Хомутов, О.М. Грехов. - АСФ ГС СО РАН. – 2011.
- 29 Перевалова Н.П. *Суточные вариации вертикального полного электронного содержания в спокойных гелиогеомагнитных условиях [Текст]* / Н.П. Перевалова, А.С. Полякова, А.В. Зализовский. - Солнечно-земная физика. – 2009. – №14. – С.82-88.
- 30 Houminer Z. *Improved short-term predictions of F2 using GPS time delay measurements [Text]* / Z. Houminer, H. Soicher. - Radio Science. – 1996. – №5(31). – P.1099-1108.
- 31 Компания Arduino [Электронный ресурс]. - URL: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardNano> (дата обращения: 19.04.2017)
- 32 Компания Arduino Product [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano> (дата обращения: 19.04.2017)
- 33 Фирма Ublox [Электронный ресурс]. - URL: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8_DataSheet\(UBX-13003366\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8_DataSheet(UBX-13003366).pdf) (дата обращения: 21.04.2017)

- 34 *Фирма ESPRESSIF [Электронный ресурс].* - URL:
<https://espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview>
(дата обращения: 01.05.2017)
- 35 *Время электроники [Электронный ресурс].* - URL:
<http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2189/doc/40316/> (дата обращения:
23.04.2017)
- 36 *Аппаратнонезависимый формат обмена навигационными данными [Электрон-
ный ресурс]. – 2007. - URL: ftp://ftp.unibe.ch/aiub/rinex/rinex211.txt (дата обращения:*
01.05.2017)
- 37 *Компания Arduino Product [Электронный ресурс].* - URL:
<https://www.arduino.cc/en/reference/libraries> (дата обращения: 26.05.17)
- 38 Казанцев М.Ю. *Определение ионосферной погрешности измерения псевдодаль-
ностей в одночастотной аппаратуре систем ГЛОНАСС и GPS [Текст] / М.Ю.
Казанцев, Ю.Л. Фатеев. - Журнал радиоэлектроники. – 2002. – №12.*
- 39 *Pacific Northwest geodetic array [Электронный ресурс].* - URL:
<http://www.panga.cwu.edu/sites/arln/> (дата обращения: 26.05.17)