

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА**

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

НАПРАВЛЕНИЕ

ГЕОЛОГИЯ

КАФЕДРА

СЕЙСМОМЕТРИИ И ГЕОАКУСТИКИ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Определение характеристик лунной поверхности методом георадиолокации при помощи математического моделирования

Дубровин Иван Олегович

Заведующий кафедрой:
профессор Владов М. Л.

Научный руководитель:
Бричёва С. С.

Рецензент:
профессор Владов М. Л.

**Москва
2018**

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Общие сведения о Луне, её геологической истории, характеристиках пород и поверхности.....	5
Теория происхождения и геологическая история.....	5
Лунные породы.....	7
Реголит.....	8
Поверхность и ландшафт.....	8
Глава 2. Физические свойства лунных пород и почв.....	10
Плотность.....	10
Температура.....	11
Проводимость.....	12
Диэлектрическая проницаемость.....	12
Тангенс диэлектрических потерь.....	16
Выводы о применимости метода георадиолокации.....	17
Глава 3. Моделирование.....	18
Программное обеспечение.....	18
Выбор свойств материалов.....	19
Выбор шага дискретизации.....	20
Оценка влияния проводимости на форму импульса.....	24
О разрешающей способности орбитального радара.....	27
Модели поверхности Луны.....	27
Глава 4. Результаты моделирования.....	30
Об ожидаемых результатах.....	30
Синтетические радарограммы.....	31
Выводы о результатах моделирования.....	35
Заключение.....	36
О выполнении поставленных задач.....	36
О благодарностях и планах.....	37
Список использованной литературы.....	38

Введение

Множественные советские и американские исследования второй половины прошлого века показали, что Луна представляет собой важный с точки зрения науки объект. Она хранит уникальную информацию о формировании планет и ранних стадиях их развития, в структурах её пород содержатся отпечатки космической радиации, накопленные на протяжении миллиардов лет. Из-за своей близости к Земле, Луна так же является очевидной целью для долговременных космических исследований.

Первые космические аппараты, целью которых было изучение Луны, были запущены ещё в 1959 году. С тех пор было совершено более 50 различных лунных миссий, и изучение продолжается непрерывно. За это время по поверхности Луны прошли 12 астронавтов. На данный момент количество всевозможных исследований продолжает набирать обороты, существуют даже готовые проекты потенциальных лунных баз.

Радиолокация играет важную роль во многих лунных исследованиях. Так, первые измерения электрофизических свойств Луны проводились дистанционными радиолокационными зондированиями с Земли ещё в 1949 году. Множество искусственных спутников Луны имели и имеют установленные на борту радары, применяющиеся для множества различных целей, например, для поиска водяного льда в областях полюсов.

Спектр задач, связанный с исследованием Луны, очень широк, и для каждой из этих задач необходим тщательный подход к выбору мест посадки лунных аппаратов. Важнейшими характеристиками поверхности, определяющими вышеупомянутый выбор, являются так называемые каменистость и кратерированность, то есть содержание крупных обломков лунных пород и кратеров различных размеров на единицу площади поверхности. Не менее важной является и информация о подповерхностном строении, в особенности в местах, где потенциально опасные для техники и персонала структуры скрыты под слоем нецементированного песчанистого материала, называемого реголитом. Такие структуры никак не будут видны на сделанных с орбит снимках.

Помимо этого, побывавшие на Луне астронавты описывают сложности оценки размеров и расстояний до объектов, связанные с отсутствием атмосферы, фильтрующей свет, и привычных ориентиров с известными размерами. Поэтому даже при отсутствии скрытых под реголитом объектов, снимки не всегда позволяют точно оценить обстановку на поверхности.

Изображения поверхности, построенные с помощью радаров с синтезированной апертурой, не подвержены влиянию описанных выше факторов, однако всё равно не предоставляют никакой информации о подповерхностных структурах.

Возвращаясь к радиолокации, важно отметить, что она не просто так играет столь значительную роль в изучении Луны. Дело в том, что лунные породы представляют собой практически идеальную среду для электромагнитных зондирований, поскольку, как будет описано в тексте работы, характеризуются чрезвычайно низкими сопротивлениями и диэлектрическими потерями. Это значит, что, возможно, при помощи тех же радаров на орбитах, возможно получать информацию не только о выраженных в рельефе особенностях верхней части разреза, но и в подповерхностных.

Данная работа посвящена исследованию возможностей выявления подповерхностных структур, а также определения самых важных характеристик лунно поверхности методом георадиолокации. Особое внимание уделяется георадиолокации в привычном её проявлении – профильных измерений с совмещёнными источником и приёмником, производящиеся непосредственно с поверхности. Ниже сформулированы поставленные перед ней цель и задачи.

Целью данной работы являлась оценка возможностей георадиолокации в изучении характеристик верхней части лунного разреза. **Задачи**, поставленные для достижения этой цели, включали в себя:

- анализ литературных данных с целью сбора информации о физических свойствах Луны и геологических особенностях верхней части её разреза;
- составление моделей верхней части разреза Луны;
- оценка ожидаемых результатов моделирования для составленных моделей, основанная на собранной информации о физических свойствах;
- моделирование в условиях наземного и орбитального радаров и последующее сравнение получившихся результатов с ожидаемыми.

Глава 1. Общие сведения о Луне, её геологической истории, характеристиках пород и поверхности

Луна – ближайшее к Земле небесное тело, её единственный естественный спутник. Помимо Земли, это единственное небесное тело, на котором побывал человек, и с которого были отобраны геологические образцы.

Различия между Землёй и Луной очевидны при сравнении их физических характеристик, приведённых в таблице 1.1. (Heiken et al., 1991)

Свойство	Земля	Луна
Масса	5.98×10^{24} кг	7.35×10^{22} кг
Сферический радиус	6371 км	1738 км
Площадь поверхности	510.1×10^6 км ²	37.9×10^6 км ²
Средняя плотность	5.5 г/см ³	3.3 г/см ³
Ускорение силы тяжести на экваторе	978 Гал	162 Гал
Средняя температура поверхности	22°C	107°C днём; -153°C ночью
Экстремумы температуры	-89°C и 58°C	-233°C и 123°C
Атмосфера	2.5×10^{19} молекул/см ³	$\sim 10^4$ молекул/см ³
Магнитное поле	25.000 — 65.000 нТл	0 (слабое палеополе)
Продолжительность суток	1 день	24 дня, 12 часов и 44 минуты

Теория происхождения и геологическая история

Среди всех гипотез о происхождении Луны только одна – теория Гигантского столкновения – объясняет все существенные наблюдения. Согласно этой теории, Луна образовалась в результате столкновения ещё формирующейся Земли с другим большим объектом, масса которого составляла $\sim 10\%$ массы Земли. В процессе столкновения, которое произошло около 4.5 миллиардов лет назад, часть материала планеты была выброшена на орбиту, и из этого материала сформировалась Луна. По геологическим меркам времени это произошло почти мгновенно: через тысячу лет после столкновения формирование Луны преимущественно завершилось.

Теория Гигантского столкновения объясняет наиболее важные и неожиданные результаты, полученные при изучении образцов лунных пород, из наблюдений астронавтов и при изучении снимков Луны. Так, например, в лунных породах полностью отсутствует кристаллическая вода и водородосодержащие минералы. Другие летучие элементы, такие как карбон и азот, также практически отсутствуют. Это объясняется

крайне высокими температурами выброшенного при Гигантском столкновении материала – они улетучились. Также по сравнению с Землёй и метеоритами, в веществе Луны очень мало железа. Это ожидаемо, если предположить, что столкновение произошло после того, как сформировалось железное ядро Земли, и выброшенный материал состоял только из вещества мантии и коры.

На ранней стадии развития Луны связанные с Землёй приливные силы были более чем в тысячу раз сильнее, чем сейчас, что способствовало её нагреванию и плавлению. Тогда Луна была покрыта океаном магмы, в результате чего происходила дифференциация её вещества. Застывание этого океана магмы привело к разделению на геохимически различимые кору, мантию и ядро.

Изучение возрастов лунных кратеров позволило установить, что в промежутке около 4.1 – 3.8 миллиардов лет назад в Солнечной системе происходила так называемая *поздняя тяжёлая бомбардировка*, или лунный катаклизм, во время которого непропорционально большое количество астероидов сталкивалось с планетами внутренней Солнечной системы. В этот временной промежуток на лунной поверхности образовалось более 10 кратеров диаметрами более 500 километров. Ещё до того как образовались последние такие бассейны, часть из них начала заполняться изливающимися базальтовыми лавами – результатом частичного плавления мантии. (Geiss, 2000)

Когда Луна почти полная, даже невооружённым глазом на её поверхности можно увидеть контраст между тёмной и светлой поверхностями. Светлые и тёмные зоны соответствуют двум основным типам лунного ландшафта, сохранившим свои названия ещё с 17 века: *maria* (ед. *mare*, от лат. «море») и *terrae* (ед. *terra*, от лат. «земля»), или лунные моря и лунные континенты (Wilhelms, 1987). Моря – это заполненные базальтовыми лавами импактные бассейны. Их тёмный цвет вызван более высоким содержанием титана в породах.

Абсолютные возраста образцов «морских» базальтов заключены в пределах от 3.8 до 3 миллиардов лет. Формирование базальтов лунных морей, символизирующих последнюю крупную геологическую эпоху на Луне, закончилось немногим позднее 3 миллиардов лет назад. С тех пор Луна была геологически неактивна, полностью истратив свои энергетические ресурсы (Geiss, 2000).

На рисунке 1.1 изображена схема внутреннего строения Луны.

В отсутствии геологических процессов образ Луны почти не изменился за последние 3 миллиарда лет. Эрозия лунной поверхности сейчас обусловлена только им-

пактными событиями, хотя и гораздо менее частыми и крупными, чем в период поздней бомбардировки, всё же постоянными.

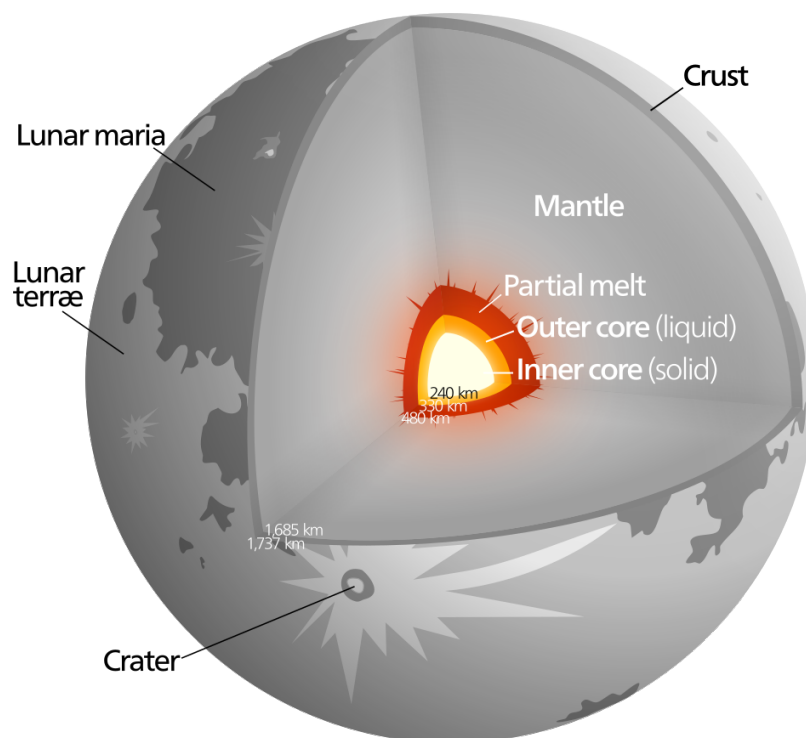


Рисунок 1.1. Схема внутреннего строения Луны.
Из центра наружу: твёрдое внутреннее ядро, жидкое внешнее ядро, частично расплавленная часть мантии, мантия, кора.
Расстояния, отмеченные на рисунке, отсчитываются от центра Луны

Лунные породы

Лунные породы можно разделить на четыре группы: *базальтовые вулканические* породы, включающие в себя лавовые потоки и пирокластиты; *примитивные* породы лунных континентов (те породы континентов, которые по составу не изменены – не имеют примесей, привнесённых импактными событиями); сложные *полимиктовые брекчи*, образующиеся при постоянной метеоритной бомбардировке, дробящей, смешивающей и прессующей лунную поверхность, и *импактные расплавы*, образующиеся при плавлении лунных пород при бомбардировке; а также *лунные почвы*, представляющие собой рыхлый слой обломков (<1 см) внутри лунного реголита, покрывающего поверхность Луны (Heiken et al., 1991). Из-за уникальных свойств лунного реголита ему посвящён отдельный подраздел.

Все эти породы изначально являлись вулканическими. Основными породообразующими минералами являются пироксены, оливин, плагиоклаз и различные силикаты.

Плавление и последующее остывание Луны происходило в разных местах в разное время. Светлые, богатые алюминием породы, обнажённые на лунных материках, образовались на ранних стадиях её истории, сразу после формирования. Покрывающие лунные бассейны тёмные лавовые потоки образовались позже, при внутреннем плавлении и вулканических извержениях. Образование брекчий, расплавов и реголита происходит и по сей день.

Реголит

Реголит – несцементированный продукт дробления и переотложения пород на поверхности Луны. Движущими силами образования лунного реголита являются непрерывная бомбардировка метеоритами разных размеров и заряженными частицами Солнечного ветра. Как только свежие коренные породы обнажаются, они начинают разрушаться при постоянных импактных воздействиях, в процессе которых становятся полностью покрыты слоем раздробленных, подплавленных обломков. Этот процесс продолжается непрерывно, сильнее и сильнее перерабатывая материал, уменьшая размеры обломков вплоть до песка и пыли. Этот слой и называется реголитом, или лунной почвой. (Heiken et al., 1991)

Он представляет собой сложную смесь, пятью основными компонентами которой являются фрагменты кристаллических пород и минералов, брекчии, стёкла и агглютинаты (спёкшиеся в плотную каменную массу скопления продуктов вулканической деятельности).

Образуется реголит относительно медленно и с постоянной скоростью, что позволяет, основываясь на мощности слоя реголита и распределении размеров частиц в нём, судить о возрасте рассматриваемой поверхности.

Так же существует термин *мегареголит*, относящийся к верхнему слою твёрдой лунной коры: так называют прослой раздробленных и хаотично перемешанных импактных обломков, мощность которого достигает первых километров.

Поверхность и ландшафт

Структура лунного ландшафта определяется двумя факторами: высокоскоростными импактными событиями и вулканизмом. Бассейны лунных морей окружены высокими горами, образованными в процессе бомбардировки, большая часть которых была

выровнена в процессе заполнения их лавами. Глубокие борозды изрезают поверхности морей, множественные разломы и складки деформируют эти же поверхности.

Вся поверхность Луны покрыта кратерами от гладких неглубоких понижений до острых по краям, крутых, засыпанных булыжниками. Почти вся поверхность, за исключением, разве что, крутых стенок кратеров, покрыта слоем реголита мощностью от первых метров до десятков метров. (Wilhelms, 1987)

На рисунке 1.2 изображена схема поверхности лунного континента.

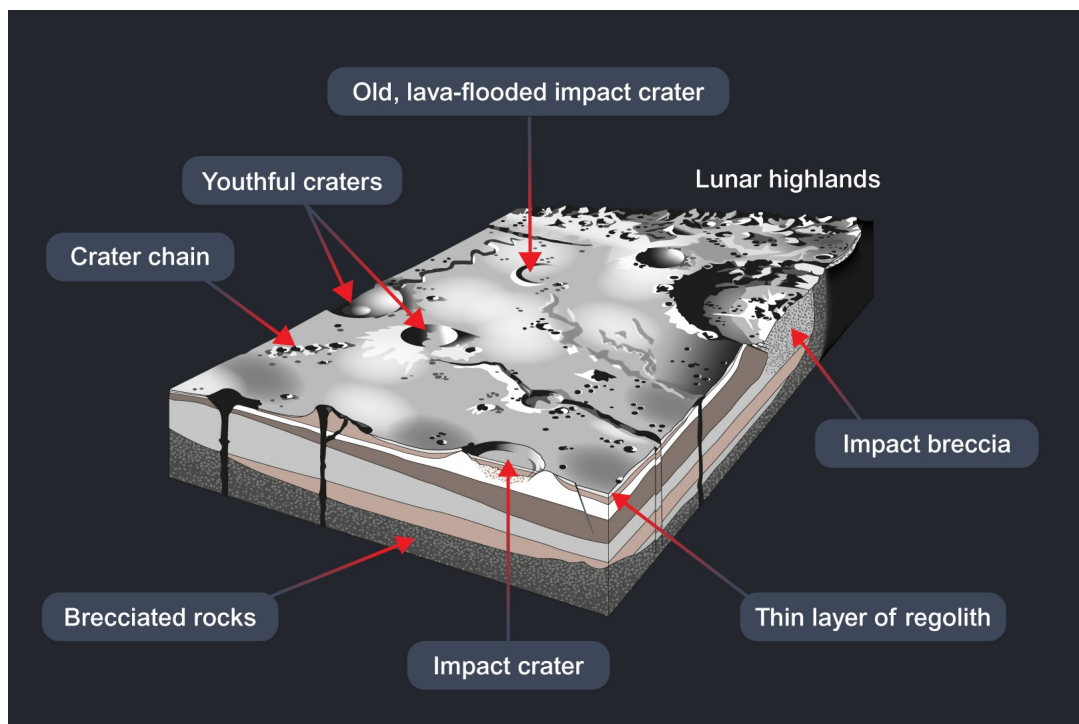


Рисунок 1.2. Схема поверхности лунного континента

Глава 2. Физические свойства лунных пород и почв

Лунный реголит сильно отличается от земных материалов. Его минеральный состав, к примеру, сильно ограничен. Меньше сотни минералов было найдено на поверхности Луны, в то время как на Земле их больше пяти тысяч. Лунные базальты также значительно отличаются от земных, поскольку, несмотря на схожий минеральный состав, сформировались в совершенно других условиях: значительно меньшей гравитации, почти полном отсутствии кислорода и воды.

Помимо этого, непрерывная бомбардировка метеоритами разных размеров превратила материал на лунной поверхности в хорошо отсортированный пылеватый песок, который достиг «стабильного состояния» на большей части поверхности Луны в отношении мощностей, распределения размеров частиц и других свойств. Таким образом, ограниченные в размерах и типах частицы реголита, отсутствие лунной атмосферы и недостаток воды и органического материала в породах ограничивают их физические свойства в относительно узкие, хорошо определённые пределы. Основными факторами, влияющими на физические свойства, являются объёмная плотность и температура (Heiken et al., 1991).

В данной главе рассматривается распределение этих свойств в верхней части лунного разреза, а также главных электрофизических свойств, определяющих возможность применения георадиолокации: проводимости, диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь, и их зависимости от плотности и температуры.

Плотность

Объёмная плотность является фундаментальным свойством лунной почвы, поскольку влияет на такие её характеристики, как несущая способность, устойчивость склонов, сейсмические скорости, теплопроводность и электрическую проводимость.

В работе Mitchell et al., 1974 приводятся результаты оценки объёмных плотностей лунной почвы на для различных интервалов глубин, измеренных в лабораторных условиях на образцах керна.

В работе Kiefer et al., 2012 приводятся результаты оценки плотностей с учётом пористости для 13 образцов лунных пород, включающих в себя породы всех трёх основных типов: базальтов лунных морей, примитивных пород континентов и брекчий из импактных бассейнов.

По предложенным в упомянутых работах результатам была составлена сводная таблица 2.1.

Таблица 2.1. Сводная таблица плотностей лунных пород и реголита			
Породы			
Тип породы	Плотность гранул, г/см ³	Типичные значения пористости, %	Плотность с учётом пористости, г/см ³
Базальты лунных морей	от 3.27 ± 0.01 до 3.46 ± 0.05	2 – 10	от 3.01 ± 0.04 до 3.27 ± 0.05
Примитивные породы континентов	от 2.84 ± 0.01 до 2.91 ± 0.05	2 – 11	от 2.51 ± 0.02 до 2.84 ± 0.04
Импактные брекчии	от 3.03 ± 0.03 до 3.05 ± 0.01	17 – 22	от 2.36 ± 0.04 до 2.52 ± 0.03
Реголит			
Средняя объёмная плотность, г/см ³		Интервал глубин, см	
1.50 ± 0.05		0 – 15	
1.58 ± 0.05		0 – 30	
1.74 ± 0.05		30 – 60	
1.66 ± 0.05		0 – 60	

Для сравнения, средняя плотность базальтовых магм на Земле составляет ~ 2.7 г/см³.

Температура

Из-за отсутствия атмосферы, температура на поверхности Луны в пределах лунных суток изменяется примерно на 260 К. В работе Dalton and Hoffman, 1972 приведены оценки средних температур поверхности и экстремальных значений температур для различных зон. Эти оценки приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Оценки значений температуры поверхности Луны				
	Полярные зоны	Экваториальная температура ближней стороны Луны	Экваториальная температура дальней стороны Луны	Температуры в средних широтах
Средняя температура	220 К	254 К	256 К	220 < T < 255 К
Месячные колебания	±10 К	±140 К	±140 К	±110 К

В работе Langseth and Keihm, 1977 так же отмечается, что на глубине в 30 сантиметров суточные колебания температуры составляют всего ±3 К. То есть покрытие из всего 30 сантиметров реголита уже является крайне эффективным демпфером для температурных колебаний, связанных со сменой дня и ночи. На глубинах в 60 сантиметров термометры регистрируют отсутствие каких-либо колебаний температуры в пределах лунного дня.

Проводимость

Электрические проводимости лунных материалов очень малы и в основном зависят только от температуры. В работе Olhoeft et al., 1973 приводится эмпирическая зависимость, установленная на образце реголита, имеющая следующий вид:

$$\sigma_{regolith} = 6 \times 10^{-18} e^{0.0237 T} \text{ См/м} \quad [2.1],$$

где T – температура в Кельвинах. Такой тип температурной зависимости характерен для аморфных материалов и типичен для повреждённых радиацией частиц лунной почвы.

Наиболее общую эмпирическую зависимость проводимости лунных пород от температуры можно найти в Schwerer et al., 1974. Она имеет вид:

$$\sigma_{rock} = \sigma_0 e^{-E_0/kT} + \sigma_1 e^{-E_1/kT} \text{ См/м} \quad [2.2],$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 8.6176 \times 10^{-5}$ эВ/К; T – температура в Кельвинах; σ_0 и σ_1 – электронная и ионная проводимости соответственно; а E_0 и E_1 – соответствующие энергии активации (см. таблицу 2.3). Данная формула использовалась при расчётах параметров для моделирования.

Таблица 2.3. Электрические проводимости лунных пород

Номер образца в базе данных NASA	Тип породы	σ_0 , См/м	E_0 , эВ	σ_1 , См/м	E_1 , эВ
10048	Реголитовая брекчия	3.5	0.896	2.66×10^{-3}	0.559
12002	Оливиновый базальт	13	1.09	1.8×10^{-4}	0.48
15058	Пижонитовый базальт	134	1.374	2.78×10^{-2}	0.593
15418	Импактная брекчия	137	1.509	9.84×10^{-2}	0.971
15555	Оливиновый базальт	36.8	1.04	1.27×10^{-2}	0.604
68415	Базальтовая импактная брекчия	1.28×10^8	2.64	0	0
68815	Стекловатая брекчия	14.2	1.366	0	0

При расчёте проводимостей этих образцов по приведённой выше формуле для температуры 254 К (средняя температура на поверхности в экваториальной части ближней стороны Луны) максимальное значение составляет 5.4×10^{-14} См/м. Оно соответствует оливиновому базальту, фотография образца приведена на рисунке 2.1.

Проводимости лунных пород схожи с проводимостями земных силикатов при полном отсутствии воды.

Диэлектрическая проницаемость

Множество научных работ посвящено анализу зависимости диэлектрической проницаемости лунных материалов от объёмной плотности, частоты и процентного содержания оксидов титана и железа.

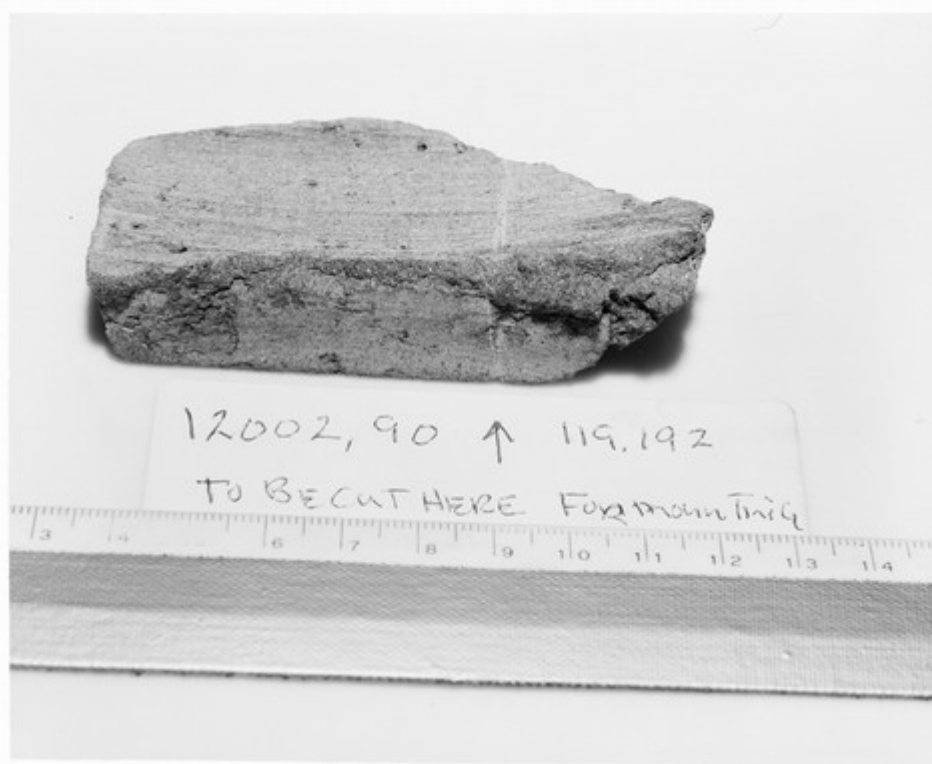


Рисунок 2.1. Фотография образца 12002 из базы данных NASA – оливинового базальта. Его проводимость при температуре 254 К составляет 5.4×10^{-14} См/м. Плотность – 3.3 г/см^3 . Процент содержания оксида титана — 2.76, оксида железа – 19.38. Тангенс диэлектрических потерь – 0.05.

В Heiken et al, 1991 приведена сводная таблица диэлектрических свойств 133 лунных образцов (таблица A9.16, стр. 581 – 584). В ней собраны плотности, относительные диэлектрические проницаемости, тангенсы диэлектрических потерь и процентные содержания оксидов титана и железа для пород различных типов, включая реголит. Среди них есть и упомянутый в разделе «Проводимость» образец 12002. В подписи к рисунку 2.1 перечислены его свойства, взятые из этой таблицы.

На рисунках 2.2 и 2.3 изображены приведённые в Heiken et al, 1991 графики диэлектрической проницаемости от плотности и процентного содержания оксидов титана и железа. На рисунке 2.4 приведены графики зависимости относительной диэлектрической проницаемости образца базальта 12002 и образца реголита от частоты.

Сплошная линия на графике 2.2 соответствуют строгой формуле Брюггемана-Ханаи-Сена (Sen et al., 1981):

$$\frac{([9.8+i0.1]-\varepsilon)}{([9.8+i0.1]-1)}(\varepsilon)^{-1/3}=\rho/3.5 \quad [2.3],$$

где ρ – объёмная плотность, г/см^3 ; ε – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость, соответствующая плотности ρ ; i – квадратный корень из -1; а [9.8

+ i0.1] – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость гипотетического лунного материала с нулевой пористостью и плотностью $\rho = 3.5 \text{ г/см}^3$.

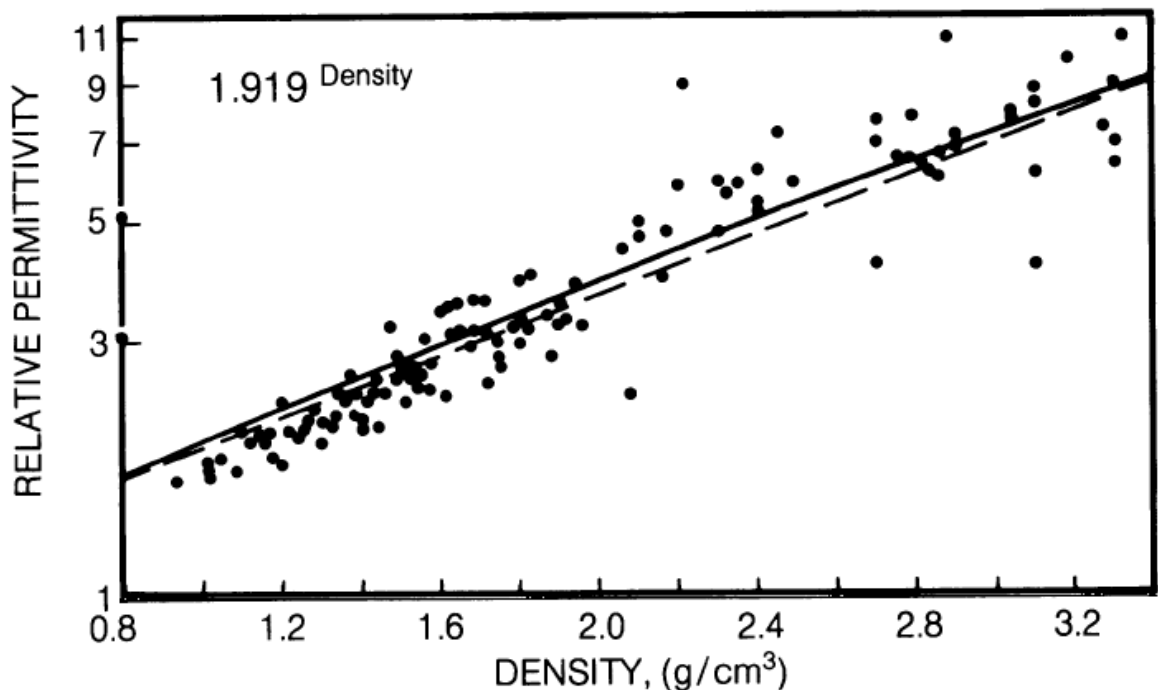


Рисунок 2.2. Относительная диэлектрическая проницаемость лунных материалов как функция плотности. Сплошной чёрной линией проведена зависимость Брюггемана-Ханаи-Сена, пунктирной – подобранная по методу наименьших квадратов показательная функция.

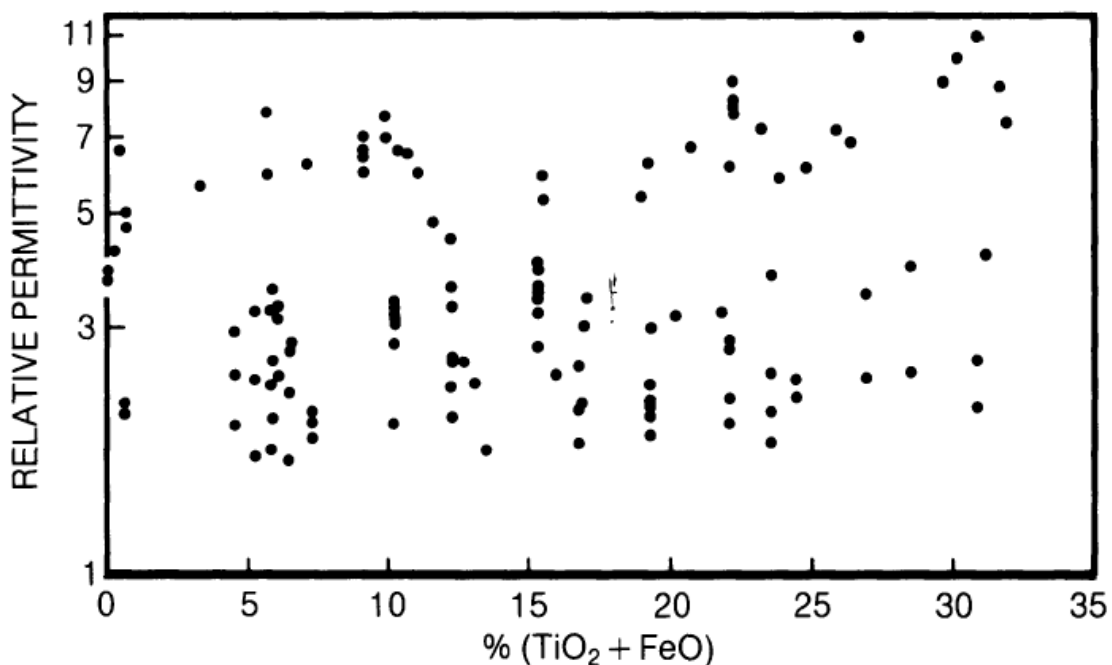


Рисунок 2.3. Относительная диэлектрическая проницаемость лунных материалов как функция процентного содержания оксидов титана и железа

Пунктирная линия на этом же графике – более простая формула, предложенная в Olhoeft and Strangway, 1975 после регрессивного анализа всего набора данных, представленного в упомянутой выше таблице А9.16:

$$\varepsilon = 1.919^p \quad [2.4].$$

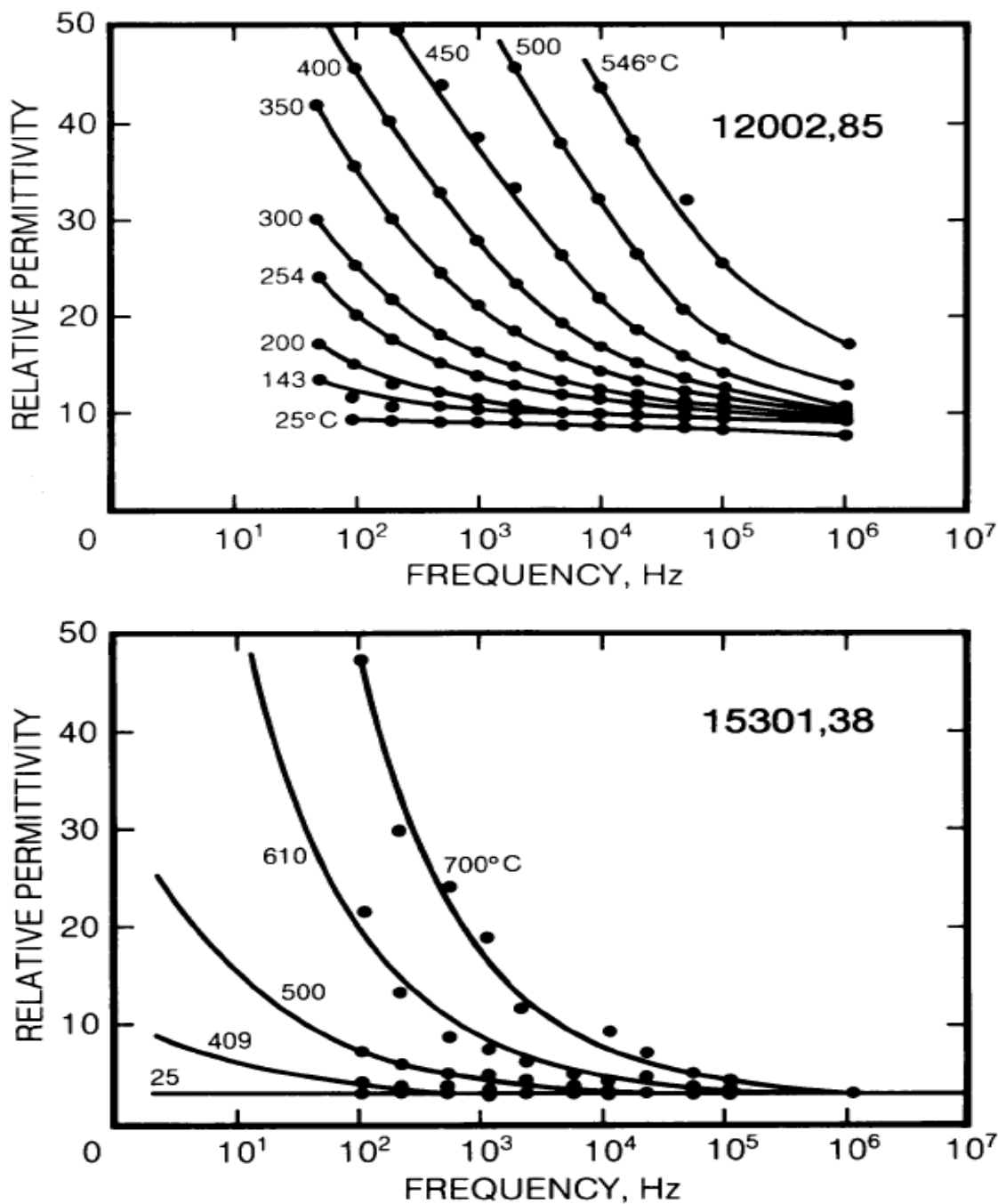


Рисунок 2.4. Относительные диэлектрические проницаемости образцов 12002 – оливинового базальта (сверху) – и 15301 – реголита (снизу) – как функции частоты при разных температурах (шифры кривых).

На графике зависимости диэлектрической проницаемости от процентного содержания оксидов титана и железа отсутствует какая-либо видимая связь между параметрами. Рассматривая зависимость ϵ от частоты, можно заметить, что в зоне температур, преобладающих на поверхности Луны ($< 200^\circ\text{C}$), диэлектрическая проницаемость почти не зависит от частоты даже для частот < 1 МГц. Согласно Olhoeft et al., 1974 на частотах выше 1 МГц зависимость отсутствует совсем.

Таким образом, единственным параметром, от которого значительно зависит относительная диэлектрическая проницаемость, является плотность (Heiken et al, 1991). В целях расчёта параметров для моделирования использовалась формула [2.4].

Тангенс диэлектрических потерь

Аналогично определению эмпирической формулы для диэлектрической проницаемости, на том же наборе образцов в Olhoeft and Strangway, 1975 при применении множественной регрессии была получена следующая формула:

$$\tan \delta = 10^{(0.038 \times (\% \text{TiO}_2 + \% \text{FeO}) + 0.312 \times \rho - 3.26)} \quad [2.5].$$

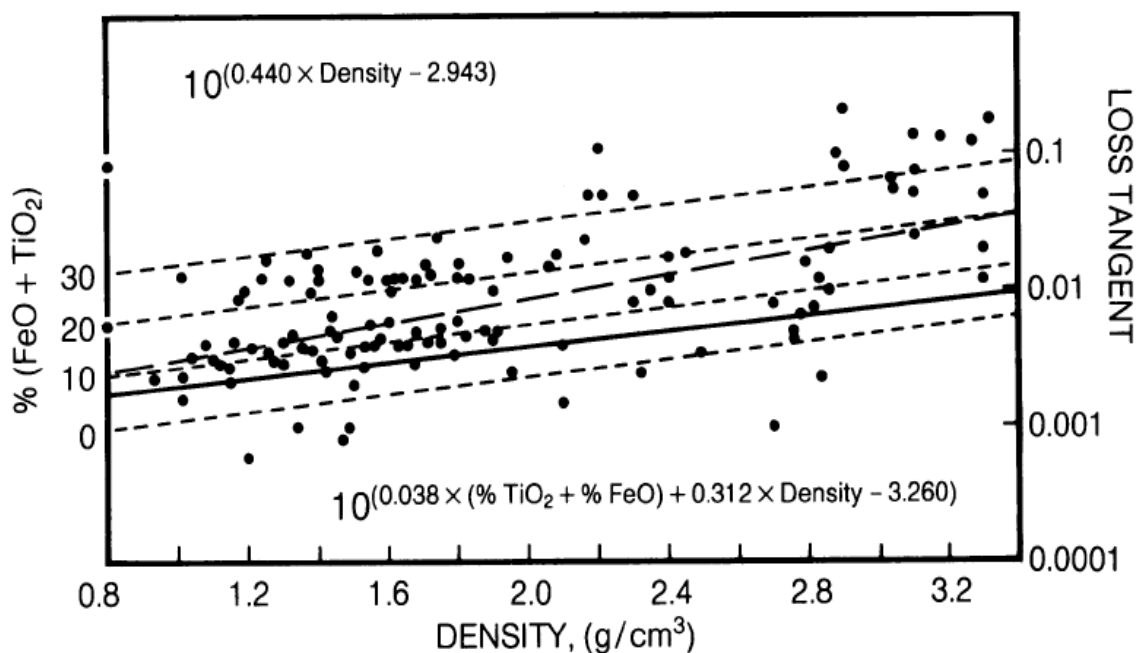


Рисунок 2.5. Тангенс диэлектрических потерь (правая ось) лунных материалов как функция плотности (горизонтальная ось) и суммарного процентного содержания оксидов титана и железа (левая ось). Отображены три варианта теоретического подбора зависимости: сплошной линией — эквивалентная Брюггеманна-Ханаи-Сен формула, длинным штрихом — результат двумерной регрессии, формула — в левом верхнем углу, мелким штрихом — результат трёхмерной регрессии, формула — в правом нижнем углу. Результат трёхмерной регрессии проведен для значений суммарного процентного содержания титана и железа 0, 10, 20 и 30.

На рисунке 2.5 построен график тангенса диэлектрических потерь как функции плотности и суммарного процентного содержания оксидов титана и железа. Данные включают в себя образцы и пород, и реголита. Сплошной линией на графике изображена формула, выведенная аналогично формуле Брюггемана-Ханай-Сена для диэлектрической проницаемости. Длинным пунктиром – результат двумерной регрессии, формула для которого записана в левом верхнем углу рисунка; коротким пунктиром – трёхмерной, формула – в правом нижнем углу. Эта формула использовалась в дальнейшем при расчёте параметров для моделирования.

Абсолютные значения тангенса диэлектрических потерь, как видно из рисунка 2.5, очень малы. Максимальное для данного набора составляет 0.0252 у образца 15555 (был рассмотрен в таблице 2.3).

Выводы о применимости метода георадиолокации

Электрические свойства материалов лунной поверхности схожи со свойствами силикатов, характеризующихся крайне низкими диэлектрическими потерями и электрическими проводимостями – они практически «прозрачны» для электромагнитных волн. Это свидетельствует в пользу того, что георадиолокация является идеальным методом для изучения подповерхностного строения Луны вплоть до глубин, превышающих 100 метров.

Глава 3. Моделирование

В задачи данной работы входило построение моделей лунной поверхности и расчёт синтетических радарограмм. Данная глава посвящена описанию методики и процесса составления и расчёта моделей для орбитального и поверхностного радаров.

Программное обеспечение

Моделирование георадарных откликов производилось при помощи открытого программного пакета `grgMax`, предназначенного для моделирования распространения электромагнитных волн. Программа основана на решении уравнений Максвелла конечно-разностным методом во временной области (Warren et al., 2016).

Конечно-разностный подход к решению уравнений Максвелла заключается в дискретизации пространства и времени. Пространственные шаги Δx , Δy и Δz , а также временной шаг Δt играют крайне важную роль, поскольку их величины отображают приближённость модели к реальным объектам. Значения шагов дискретизации обычно ограничены снизу параметрами доступных компьютеров.

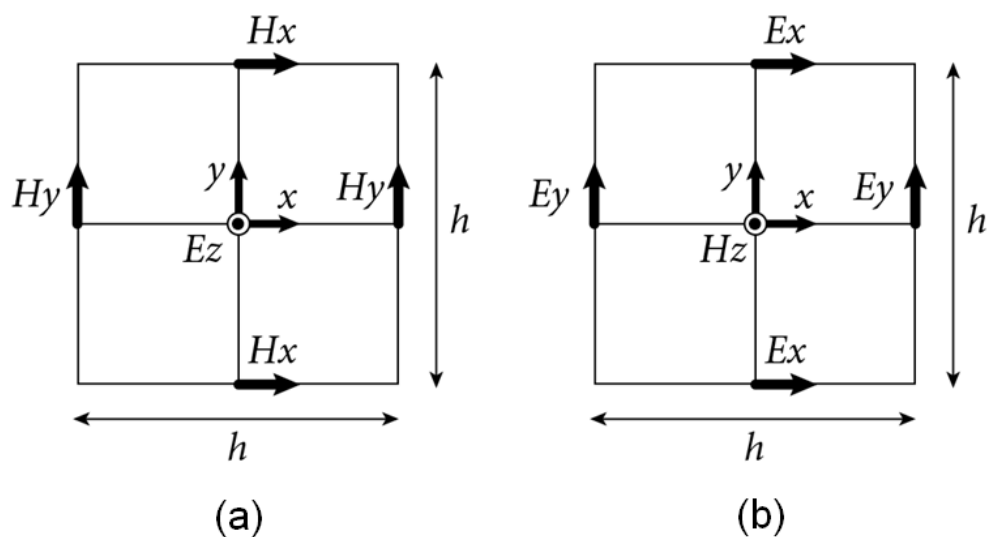


Рисунок 3.1. Ячейка Йи в двумерном случае для ТМ-волны (а) и ТЕ-волны (б). h – пространственный шаг дискретизации. H_i и E_i – компоненты магнитного и электрического полей соответственно

В `grgMax` дискретизация происходит по алгоритму Йи (Yee, 1966): компоненты электрического и магнитного полей смещены друг относительно друга на половину шага дискретизации как в пространстве, так и во времени. Такая схема вычисления называется «чехарда» и её преимущество заключается в уменьшении количества вычислений, необходимых для решения, без потери точности. На рисунке 3.1 приведена схема ячейки Йи для двумерного пространства.

Численное решение находится напрямую во временной области итерационным процессом: на каждой итерации электромагнитное поле распространяется в координатной сетке модели, и каждая итерация соответствует сдвигу во времени на шаг Δt .

Решение во временной области накладывает ограничения на выбор значений Δx , Δy , Δz и Δt : для достижения устойчивого численного решения, они не могут быть заданы независимо друг от друга. Критерий устойчивости решения называется критерием Куранта-Фридрихса-Леви и описывается следующим неравенством:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad [3.1],$$

где c – скорость света в вакууме. Таким образом, значение шага дискретизации по времени ограничено выбранными значениями пространственной дискретизации. Критерий устойчивости для двумерного случая получается из этого неравенства при стремлении Δz к бесконечности.

Одной из наиболее сложных задач при моделировании является учёт конечных размеров моделей. Для того чтобы избежать отражений от границ модели, нужно задать поглощающие граничные условия, имитирующие уход поля на бесконечность. В `grgMax` для этой цели применяются так называемые `perfectly matched layers (PML)` – слои из искусственного высоко поглощающего материала, сконструированного таким образом, что падающие на него волны не отражаются.

Взаимодействие с программой осуществляется через командную строку. Входными данными для неё является текстовый файл, в котором при помощи специальных команд описывается модель: геометрия, параметры источников и приёмников, свойства материалов и т. д. На выходе создаётся файл формата `hdf5`, содержащий в себе информацию о модели и рассчитанные значения полей.

Выбор свойств материалов

Одной из составных частей входного файла для `grgMax` является задание электрофизических свойств используемых материалов. Три материала, которые использовались при создании моделей, это вакуум, реголит и два типа пород: базальты и брекчии. Материал, соответствующий вакууму, называется `free_space` и является встроенным в `grgMax`. Процесс выбора свойств для реголита и пород описан ниже.

Первым параметром, необходимым для создания материала, является относительная диэлектрическая проницаемость. Как было сказано во второй главе, диэлектри-

ческая проницаемость лунных материалов зависит только от плотности этих материалов. За плотность реголита была взята средняя плотность первых 60 сантиметров, приведённая в таблице 2.1. Она составляет 1.66 г/см^3 , а соответствующая ей диэлектрическая проницаемость, согласно формуле [2.4]:

$$\varepsilon_{soil} = 1.919^{1.66} \approx 2.95 \quad .$$

Плотности базальтов и брекчий были взяты из той же таблицы для средних значений пористости, они составляют соответственно 3.14 и 2.44 г/см^3 . Соответствующие этим плотностям проницаемости:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{basalt} &= 1.919^{3.14} \approx 7.74 \\ \varepsilon_{breccia} &= 1.919^{2.44} \approx 4.91 \end{aligned}$$

Следующим параметром является проводимость. Проводимости на поверхности Луны зависят только от температуры. В качестве температуры была выбрана средняя температура поверхности в экваториальной зоне ближней стороны Луны, приведённая в таблице 2.2 и составляющая 254 К .

В таком случае проводимость реголита, согласно формуле [2.1], составляет:

$$\sigma_{soil} = 6 \times 10^{-18} e^{0.0237 \times 254} \approx 2.47 \times 10^{-15} \text{ См/м} \quad .$$

Проводимости выбранных пород были рассчитаны по формуле [2.2] по данным таблицы 2.3 (образцы 12002 и 15418):

$$\begin{aligned} \sigma_{basalt} &= 13 \times e^{-1.09 / (8.6176 \times 10^{-5} \times 254)} + 1.8 \times 10^{-4} \times e^{-0.48 / (8.6176 \times 10^{-5} \times 254)} \approx 5.39 \times 10^{-14} \text{ См/м} \\ \sigma_{breccia} &= 137 \times e^{-1.509 / (8.6176 \times 10^{-5} \times 254)} + 9.84 \times 10^{-2} \times e^{-0.971 / (8.6176 \times 10^{-5} \times 254)} \approx 5.34 \times 10^{-21} \text{ См/м} \end{aligned} \quad .$$

Третьим параметром материала является относительная магнитная проницаемость. Все материалы считались немагнитными, то есть относительная магнитная проницаемость их равна 1.

Последний параметр – магнитные потери. Поскольку материалы не магнитны, магнитные потери равны 0.

Выбор шага дискретизации

Одной из важнейших задач при моделировании является определение наиболее уместных параметров дискретизации. Как уже было упомянуто выше, эти параметры определяют, насколько близка будет модель к реальности, а также время, необходимое для расчёта: при уменьшении пространственного шага дискретизации увеличивается точность ступенчатой аппроксимации криволинейных границ, но при этом увеличивается количество ячеек в модели, и, следовательно, время расчёта.

При выборе шага дискретизации важно учитывать возможную численную дисперсию – явление, возникающее при моделировании сплошных сред сетками конечных размеров, при котором модель среды проявляет себя гораздо более дисперсно, чем в реальности. Данная ошибка может быть сведена к минимуму при соблюдении следующего эмпирического правила (Giannopoulos, 1997):

$$\Delta l = \frac{\lambda}{10} \quad [3.2],$$

то есть шаг дискретизации должен быть как минимум в десять раз меньше минимальной длины волны распространяющихся электромагнитных полей. При этом нужно учитывать, что в моделируемых средах длины волн значительно меньше, чем в вакууме. Для оценки минимальной длины волны необходимо знать самую низкую скорость и самую высокую частоту.

Категорически важно отметить, что центральная частота импульса не является самой высокой в модели. Рассмотрим для примера простую модель: однородное полупространство из материала со свойствами реголита, описанными в предыдущем подразделе. В качестве зондирующего сигнала возьмём импульс Рикера с центральной частотой 1 ГГц. Источник разместим в 1 метре над поверхностью полупространства, приёмник заглубим на полметра под поверхность (для демонстрации эффекта численной дисперсии). Принимая за максимальную частоту центральную частоту спектра, можно неправильно оценить необходимый шаг дискретизации:

$$\begin{aligned} \lambda_{min} &= \frac{v_{min}}{f_{max}} \\ v_{min} = v_{soil} &= \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{2.95}} \approx 1.747 \times 10^8 \text{ м/с} \\ f_{max} &= f_c = 10^9 \text{ Гц} \\ \lambda_{min} &= \frac{1.747 \times 10^8}{10^9} \approx 0.17 \text{ м} \\ \Delta l &= \frac{\lambda_{min}}{10} = 0.017 \text{ м} \end{aligned}$$

При расчёте одной трассы модели с пространственным шагом дискретизации, равным 17 миллиметрам, и свойствами реголита получается результат, приведённый на рисунке 3.2. Численная дисперсия проявляется в виде дребезга в трассе после прихода прямой волны.

Для правильного выбора максимальной частоты необходимо оценить амплитудный спектр используемого импульса. На рисунке 3.3 изображён импульс Рикера с центральной частотой 1 ГГц и его спектр.

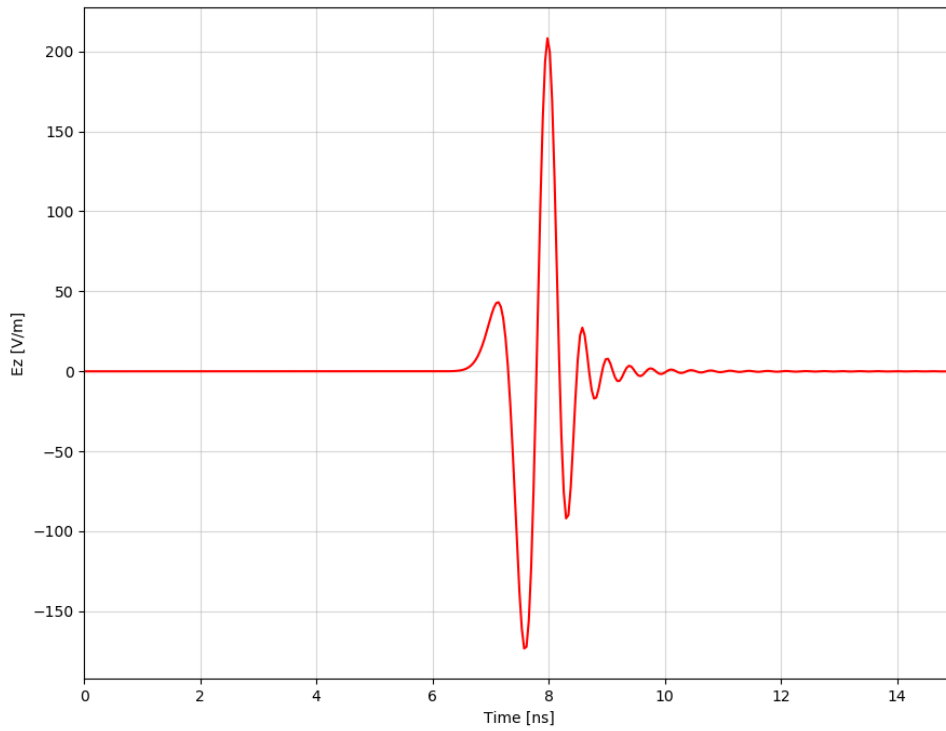


Рисунок 3.2. Численная дисперсия при неправильном выборе пространственного шага дискретизации. Время расчёта составило 3 секунды

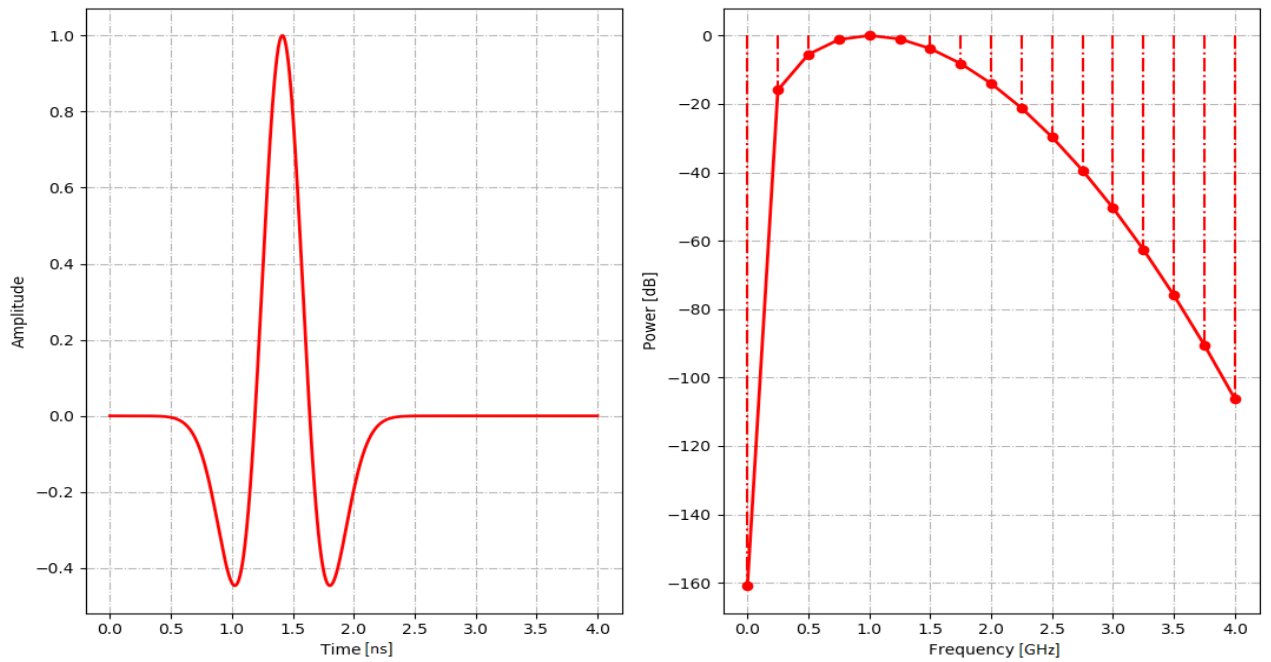


Рисунок 3.3. Слева: импульс Рикера с центральной частотой 1 ГГц. По горизонтальной оси отложено время в наносекундах, по вертикальной – амплитуда. Справа: амплитудный спектр этого импульса в шкале дБ

На спектре видно, что амплитуды на частотах выше 3 ГГц меньше амплитуды центральной частоты на 60 дБ (то есть в 1000 раз), поэтому пренебрежём ими. Отсюда

максимальная значительная частота равна 3 ГГц, то есть в три раза превышает центральную. Увеличивая частоту в три раза получаем новое значение шага дискретизации:

$$\Delta l_{new} = \frac{0.017 \text{ м}}{3} = 0.0057 \text{ м}$$

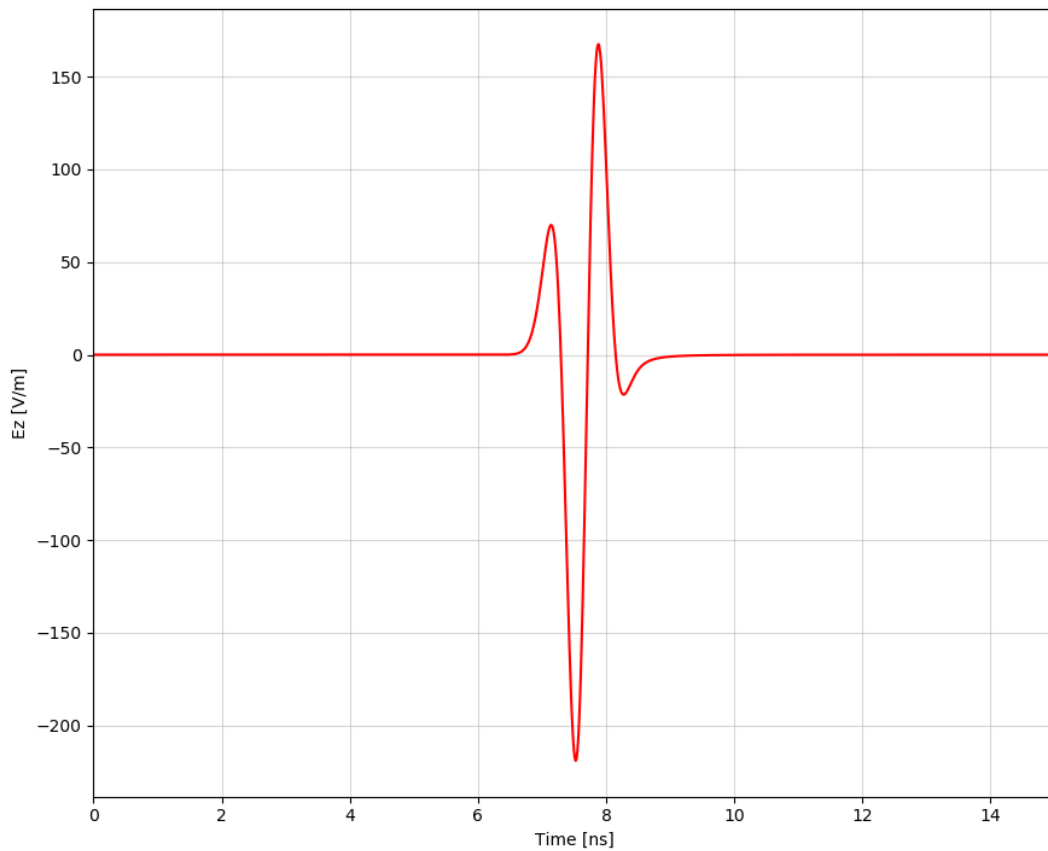


Рисунок 3.4. Отсутствие численной дисперсии при расчёте той же модели с правильно выбранным шагом пространственной дискретизации (см. рисунок 3.1 для сравнения). Время расчёта составило 20 секунд.

На рисунке 3.4. представлен результат расчёта той же модели с пространственным шагом дискретизации 5.7 миллиметра. Численной дисперсии на получившейся трассе нет.

Шаг дискретизации по времени рассчитывается программой автоматически переходом к равенству в критерии Куранта-Фридрихса-Леви.

В таблице 3.1 собрана вся информация об описанных выше тестовых моделях.

Таблица 3.1. Сводная таблица параметров тестовых моделей

Модель	Центральная частота импульса	Выбранная максимальная частота	Δl	Численная дисперсия	Δt	Время расчёта модели
1	1 ГГц	1 ГГц	17 мм	есть	4×10^{-11} с	3 с (375 итераций)
2		3 ГГц	5.7 мм	нет	1.37×10^{-11} с	10 с (1097 итераций)

Оценка влияния проводимости на форму импульса

Первые рассчитанные модели были простыми – камень на поверхности полупространства реголита и камень под поверхностью. Они были составлены для того, чтобы проверить, будут ли связанные с изменением температуры вариации проводимости на поверхности влиять на форму излучаемого импульса. Геометрия этих моделей приведена на рисунке 3.4.

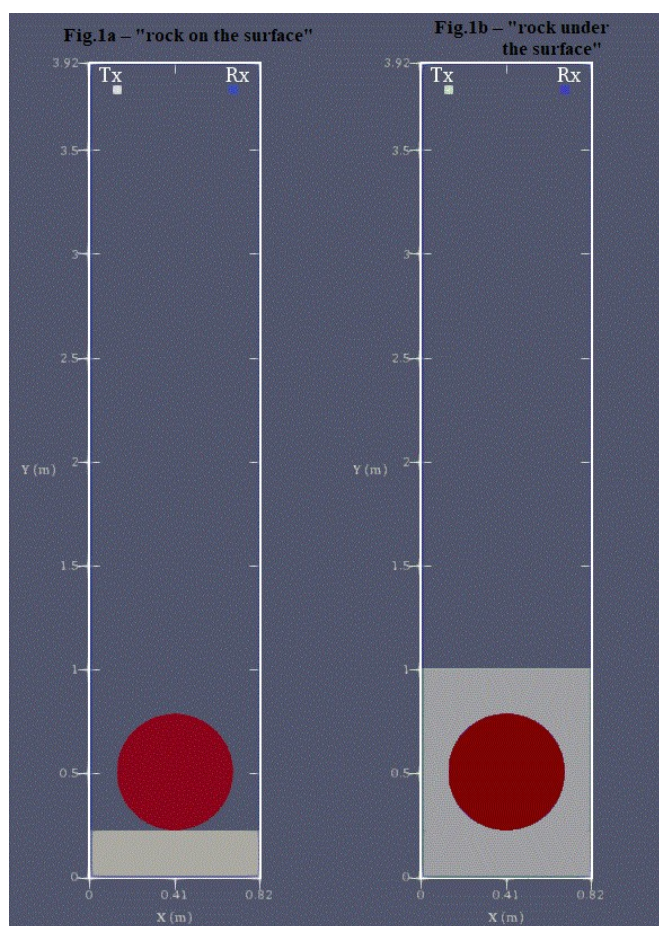


Рисунок 3.4. Геометрия первых простых моделей – камень на поверхности и камень под поверхностью реголита. Красным цветом обозначен материал ударной брекчии, серым — реголита. Tx и Rx – источник и приёмник соответственно. Диаметр камня составляет 56 см

Каждая из этих моделей была рассчитана при разных значениях проводимостей, соответствующих различным температурам поверхности. В первую очередь были проверены экстремальные температуры, указанные в таблице 1.1, а именно 123 °С (396 К) и -233 °С (40 К). По формулам [2.1] и [2.2] были рассчитаны соответствующие проводимости для реголита и породы. Полученные значения были использованы при задании свойств соответствующих материалов. Остальные параметры оставались фиксированными, значения их приведены в разделе «Выбор свойств материалов».

Ожидаемыми результатами являлись уменьшение амплитуды и смена знака, связанные с расхождением фронта и коэффициентом отражения. Коэффициент отражения оценивался для случая нормального падения по формуле (Владов М. Л., Старовойтов А. В., 2004):

$$k_{omp} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}},$$

а также по формуле, учитывающей проводимость (Судакова М. С., Владов М. Л., 2016):

$$|k_{omp}| = \frac{\sqrt{(r_1 \cos \alpha_1 - r_2 \cos \alpha_2)^2 + (r_1 \sin \alpha_1 - r_2 \sin \alpha_2)^2}}{\sqrt{(r_1 \cos \alpha_1 + r_2 \cos \alpha_2)^2 + (r_1 \sin \alpha_1 + r_2 \sin \alpha_2)^2}}, \text{ где}$$

$$r_i = \sqrt[4]{\varepsilon_i^2 + \left(\frac{\sigma_i}{\omega}\right)^2}$$

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \arctg \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i \omega}$$

$$i = 1, 2.$$

Значения коэффициентов отражения для границ различных материалов, используемых в моделях, приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Коэффициенты отражения на границах различных материалов				
Без учёта проводимости				
	Вакуум	Реголит	Базальт	Брекчия
Вакуум		0.24	0.47	0.38
Реголит	-0.24		0.24	0.15
Базальт	-0.47	-0.24		-0.11
Брекчия	-0.38	-0.15	0.11	
С учётом проводимости (модуль коэффициента отражения)				
	Вакуум	Реголит	Базальт	Брекчия
Вакуум		0.24	0.47	0.38
Реголит	0.24		0.24	0.15
Базальт	0.47	0.24		0.11
Брекчия	0.38	0.15	0.11	

В обоих случаях значения округлены до двух знаков после запятой.

На рисунке 3.5 представлен результат расчёта одной трассы модели «камень на поверхности» при температуре 396 К. Видно, что помимо ожидаемых уменьшения амплитуды и смены знака, форма зондирующего импульса не изменилась. Аналогичные результаты получились во всех четырёх случаях: для обеих моделей при обеих экстремальных температурах.

Ещё один результат был получен ранее, в разделе «Выбор шага дискретизации» (см. рисунок 3.3). Там температура составляла 254 К, и форма импульса также не изменилась.

Таким образом, по результатам простого моделирования и расчётам коэффициентов отражения был сделан вывод, что вариации проводимости на поверхности, вызванные изменением температуры, не будут влиять на форму зондирующего импульса, то есть любые её изменения могут быть связаны лишь с особенностями зондируемой среды.

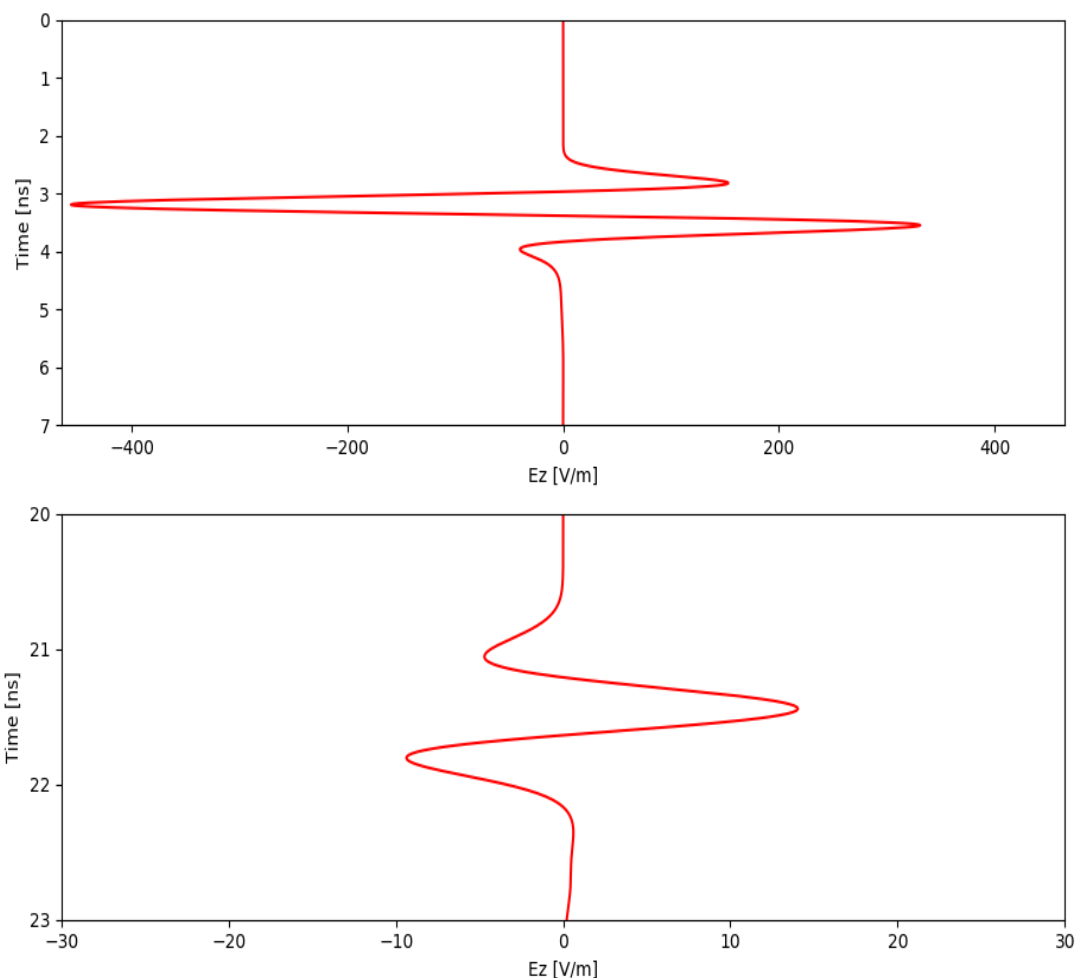


Рисунок 3.5. Сравнение формы импульса для прямой и отражённой от камня волны для проводимости камня, соответствующей температуре 396 К.

О разрешающей способности орбитального радара

Известно, что горизонтальная разрешающая способность волновых методов геофизики определяется диаметром первой зоны Френеля, которая в свою очередь зависит от длины волны λ и расстояния до объекта h . Минимальное расстояние между объектами для их разделения в пространстве должно составлять (Соколова Т. Б. и др., 2011):

$$L = \sqrt{2\lambda h} \quad [3.3].$$

На примере радара Miniature Radio Frequency (Mini-RF), установленного на борту американского искусственного спутника Луны Lunar Reconnaissance Orbiter, можно оценить ожидаемые значения пространственной разрешающей способности орбитальных радаров. Высота орбиты Lunar Reconnaissance Orbiter составляет $h = 50$ километров. В Nozette et al., 2010 приведены технические характеристики Mini-RF, в частности – рабочие частоты: $f_1 = 2380$ МГц и $f_2 = 7140$ МГц. Соответствующие этим частотам длины волн для вакуума составляют приблизительно $\lambda_1 \approx 12$ сантиметров и $\lambda_2 \approx 4$ сантиметра. Подставляя эти значения в формулу [3.3], получаем:

$$\begin{aligned} L_1 &= \sqrt{2 * 0.12 * 50000} \approx 112 \text{ м} \\ L_2 &= \sqrt{2 * 0.04 * 50000} \approx 64 \text{ м} \end{aligned}$$

где L_1 и L_2 – разрешающие способности на частотах f_1 и f_2 соответственно. Любые особенности поверхности, не превышающие по размерам этих значений (например, кратеры меньшего диаметра, неширокие перемычки между крупными кратерами и т. д.), не будут выделяться на радарограммах.

Модели поверхности Луны

Модели составлялись в соответствии с различными упрощёнными схемами поверхности, приведёнными в Neiken et al, 1991. На рисунке 3.6 приведена геометрия одной из моделей для поверхностного радара – модели края гладкого неглубокого кратера, частично заполненного базальтовыми лавами.

В качестве зондирующего сигнала был использован импульс Рикера с центральной частотой 1 ГГц. Шаг пространственной дискретизации, выбор которого подробно описан в соответствующем разделе, составлял 5.7 миллиметра. Источник и приёмник были совмещены и расположены на высоте 7.4 метра (в системе координат модели). Расстояние между трассами составляло 10 сантиметров. Всего была посчитана 251 трасса, общее время расчёта составило чуть больше 33 часов (~ 8 минут на трассу).

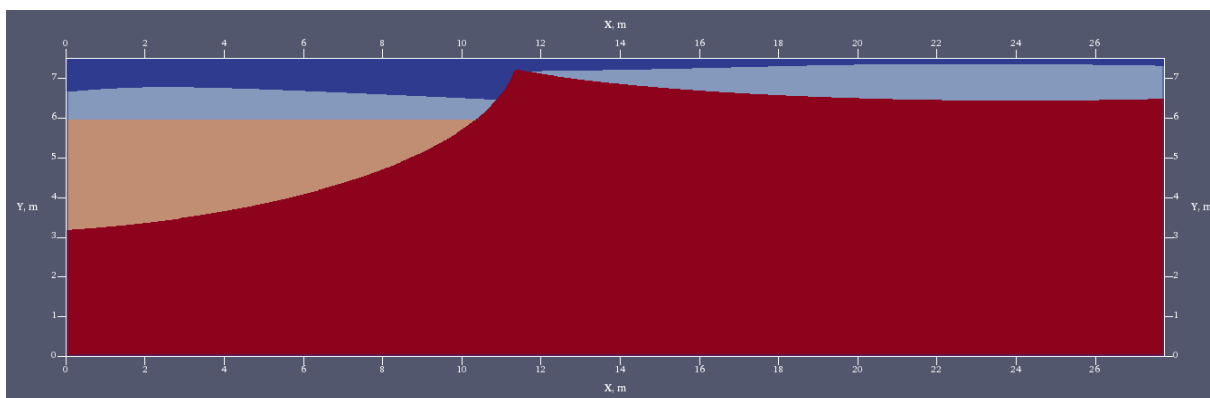


Рисунок 3.6. Геометрия модели края кратера на поверхности Луны. По осям отложены размеры модели в метрах. Красный цвет соответствует материалу импактной брекчии, светло-коричневый – базальтам, голубой – реголиту, тёмно-синий – вакууму

Для моделирования орбитального радара при реальных размерах моделей необходимая вычислительная мощность значительно превосходит доступную. В разделе «О разрешающей способности орбитального радара» на примере инструмента Mini-RF была посчитана примерная горизонтальная разрешающая способность, для частоты 7140 МГц составляющая около 64 метров. Для этой же частоты необходимый шаг дискретизации составляет приблизительно 0.5 миллиметра. То есть минимальное расстояние между объектами для их разделения на записи, определяющее в свою очередь и размеры модели, должно составлять 128000 ячеек. Если высота модели составляет хотя бы 5 метров, общее количество ячеек возрастает до 1.28×10^9 . Количество оперативной памяти, необходимое для расчёта такой модели при этом составляет порядка 30 гигабайт.

В связи с этим при составлении модели для орбитального радара было сделано несколько упрощений. Рассматривался теоретический радар, рабочая центральная частота которого составляет 150 МГц, а высота орбиты – 5 километров (такая орбита возможна, но крайне нестабильна и опасна из-за неоднородности распределения массы Луны). Разрешающая способность по горизонтали в таком случае составляет ~140 метров.

Размеры и расстояния между объектами были уменьшены, а частота импульса увеличена таким образом, что отношение размеров к длине волны оставалось неизменным. Поскольку высота источника влияет только на разрешающую способность и амплитуду сигнала, ей было решено пренебречь: оценка разрешающей способности произведена заранее, а амплитуду легко восстановить в процессе обработки. Таким образом, для ещё большего уменьшения размеров модели, источник с приёмником были опущены, а расстояния между объектами уменьшены.

Модель включала в себя различные состояния поверхности и верхней части разреза, и основной её целью являлась оценка возможности разделения этих состояний. Состояния включали в себя высокую каменистость на и под поверхностью, лунный каньон и переход от лунного континента к лунному морю – начало заполненного лавой кратера. Геометрия этой модели приведена на рисунке 3.7, где римскими цифрами обозначены соответствующие состояния.

Получившиеся при моделировании результаты рассмотрены в следующей главе.

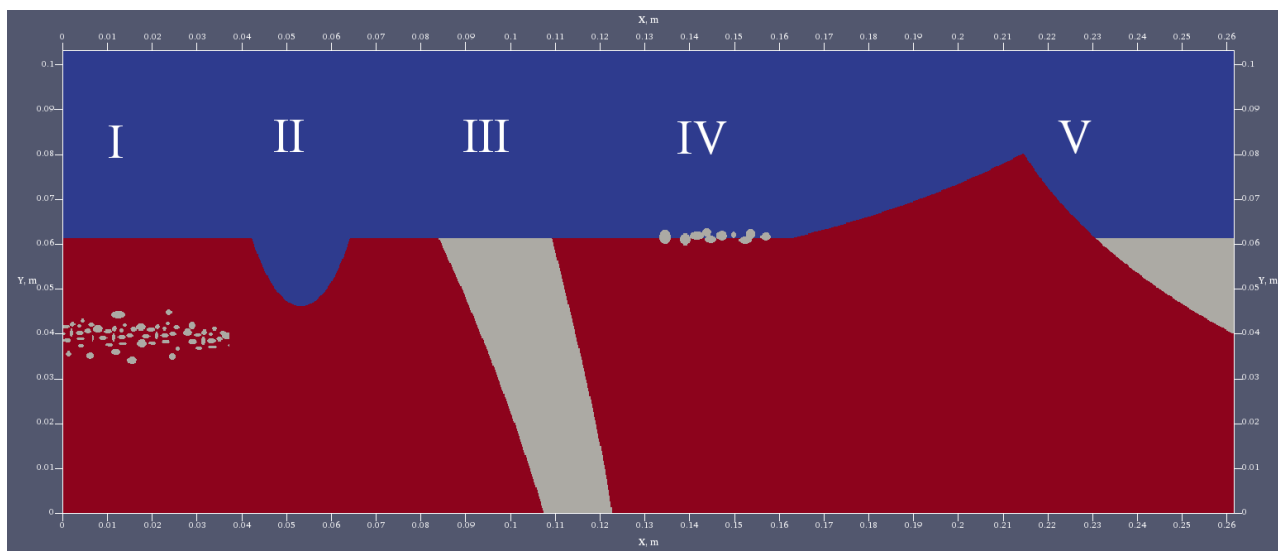


Рисунок 3.7. Геометрия модели для орбитального радара. Красному цвету соответствует материал импактной брекчии, серому – базальт, синему – вакуум. Слева направо: I – высокая каменистость под поверхностью, II – лунный каньон, III – лавовый канал, IV – высокая каменистость на поверхности, V – переход от лунного континента к лунному морю

Глава 4. Результаты моделирования

В данной главе приводятся ожидаемые результаты, а также рассматриваются результаты расчёта моделей, описанных в предыдущей главе.

Об ожидаемых результатах

Абсолютное значение коэффициента отражения больше 0.1 в большинстве случаев обеспечит достоверное выделение отражающей границы (Annan, 2003). Все материалы, используемые в моделях и описанные в разделе «Выбор свойств материалов» предыдущей главы, весьма контрастны по относительным диэлектрическим проницаемостям. В таблице 3.2 собраны рассчитанные для них коэффициенты отражения, минимальный из которых составляет 0.11. Это позволяет ожидать чётких отражений на всех границах.

В модели для наземного радара (см. рисунок 3.6) присутствует относительно маломощный слой реголита, коэффициенты отражения в котором на кровле (граница реголит – вакуум) и подошве (граница реголит – базальт) равны -0.24. Такие большие коэффициенты отражения позволяют ожидать возникновение кратной отражённой волны, амплитуда которой из-за малой мощности слоя будет весьма значительна.

Кривизна края кратера может вызвать «потерю» отражённой волны в самой его крутой части, а также изменение формы в целом на всей протяжённости, вызванное сносом.

В местах прилегания базальтовых лав и слоя реголита к краю кратера присутствуют «острые» контакты между материалами, на которых могут образовываться дифракции. Также дифракция может образоваться на вершине края кратера.

Можно также оценить ожидаемые времена прихода отражённых волн от присутствующих в модели границ. На рисунке 4.1 приведена такая оценка – мощности слоёв для двух пикетов были пересчитаны по известным скоростям в двойные времена пробега. На этом же рисунке непосредственно на границах курсивом подписаны соответствующие коэффициенты отражения.

В модели для орбитального радара (см. рисунок 3.7) для каждой из пяти зон ожидалось различные конфигурации волнового поля на радарограмме.

В зоне I, отображающей повышенную каменистость под поверхностью, ожидалось множество дифракций, поскольку все камни по размерам соизмеримы с длиной волны моделируемого радара.

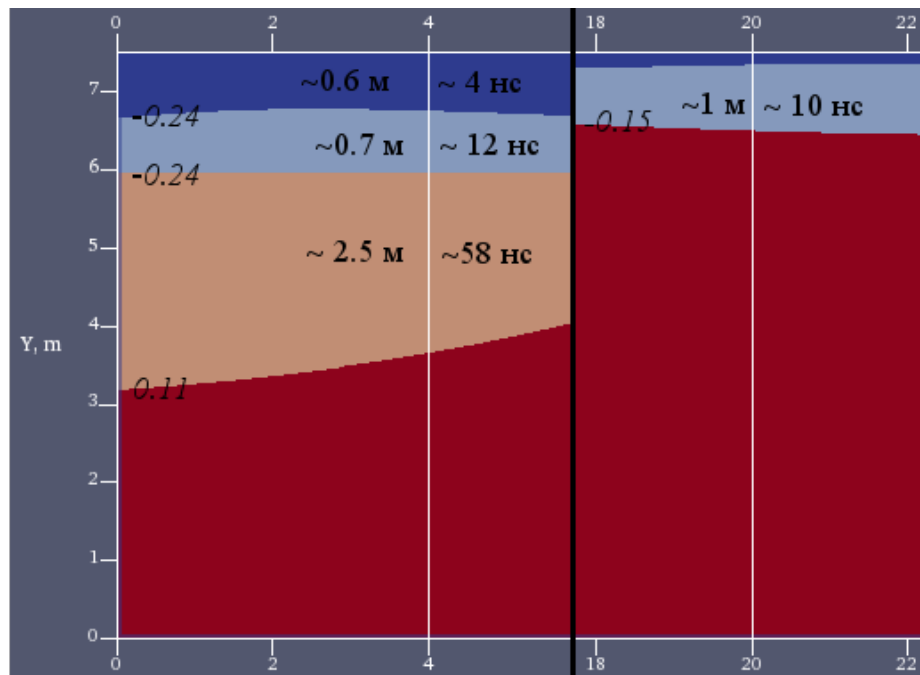


Рисунок 4.1. Оценки ожидаемых времён прихода отражённых волн на пикетах 4 м и 20 м на фрагменте модели края кратера. Указанные времена относятся к границам, лежащим под ними. На самих границах курсивом указаны значения коэффициентов отражения при распространении волны сверху вниз

Зона II, отображающая каньон на поверхности Луны, представляет собой синклинальную структуру, в ней ожидалось увидеть «петлю» оси синфазности.

Зона III, соответствующая подходящему к поверхности лавовому каналу, содержит почти вертикальную границу между брекчией и базальтом, коэффициент отражения на которой составляет 0.11. «Остроты» контакта двух материалов в этом месте может быть недостаточно для образования дифракции, а её амплитуда в случае образования будет значительно меньше остальных отражений.

В зоне IV, соответствующей повышенной каменистости на поверхности, ожидалось увидеть множество дифракций, возможно, немного искажающих ось синфазности, соответствующую отражению от поверхности.

Зона V отображает переход к лунному морю. В ней ожидалось поднятие оси синфазности, соответствующей поверхности, и дифракция, соответствующая острой вершине. Также ожидалась частичная «потеря» отражённой волны, связанная с кривизной границы, и дифракция в месте прилегания лавы к границе кратера.

Синтетические радарограммы

Получившееся в процессе расчёта в grgMax файлы формата .hdf5 при помощи специально написанного модуля на языке Python были переведены в формат .sgy, а за-

тем просматривались и анализировались с применением программ RadExPro Professional и Prism2.

На рисунке 4.2 приведена радарограмма, полученная при расчёте модели края кратера для наземного радара (см. рисунок 3.6). На рисунке 4.3 приведена та же радарограмма с пропикированными границами. Зелёная пикировка соответствует отражению от кровли реголита. Синяя – от подошвы реголита, то есть кровли базальтов слева и кровли брекчий, слагающих кратер, справа. Жёлтым цветом пропикировано кратное отражение от подошвы реголита. При увеличении усиления проявляется ещё одна ось синфазности, соответствующая трёхкратному отражению. Фиолетовая пикировка соответствует отражению от крутого склона кратера.

Как и ожидалось, в вершине поднятия и в местах прилегания реголита и лав к стенке кратера присутствуют дифракции. К дифракции в вершине в программе Prism2 была приложена теоретическая гипербола, определяемая по которой скорость составляет 30 см/нс (см. рисунок 4.4).

Как и ожидалось, из-за значительной кривизны границы склона кратера в левой части модели, не на всём её протяжении существует соответствующая ей ось синфазности. Времена прихода отражений примерно соответствуют ожидаемым, за исключением того же отражения от склона кратера, где за счёт сноса это время меньше ожидаемого.

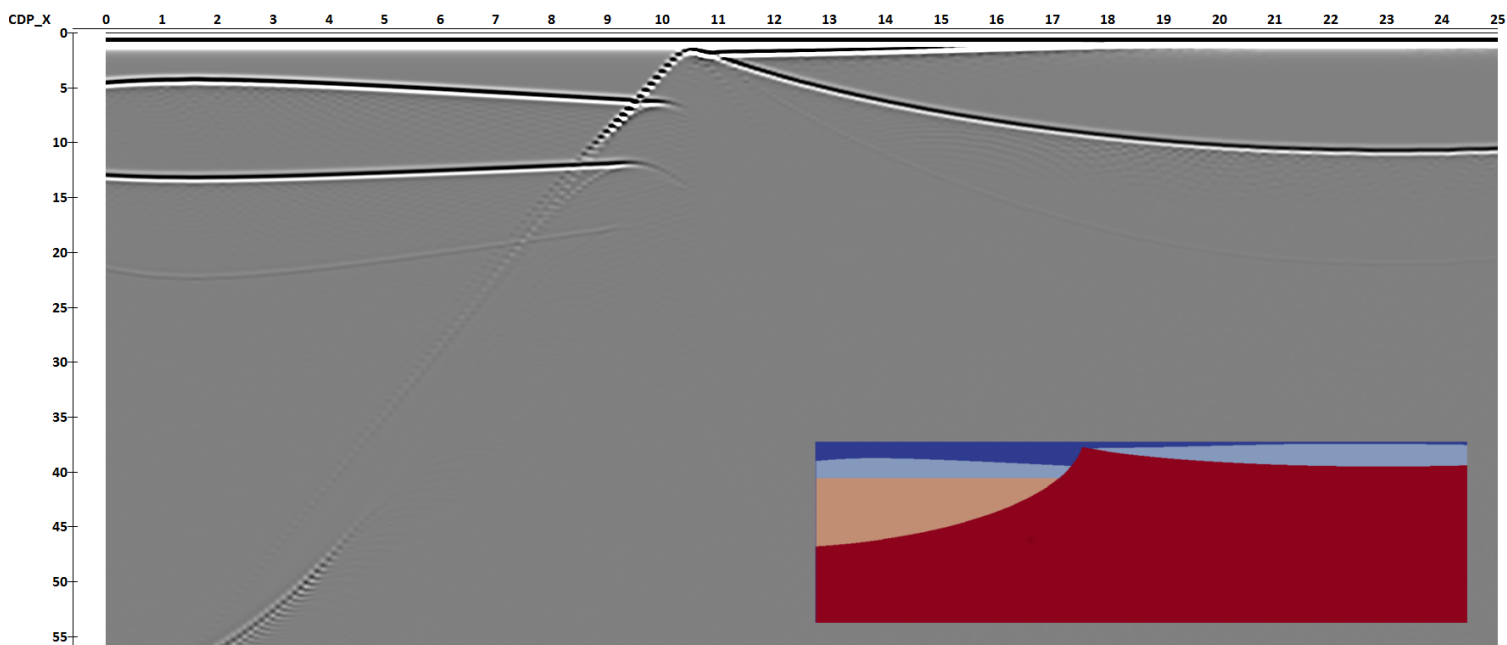


Рисунок 4.2. Синтетическая радарограмма для модели края кратера в окне программы RadExPro без какой-либо обработки. В правом нижнем углу – изображение модели (рисунок 3.6)

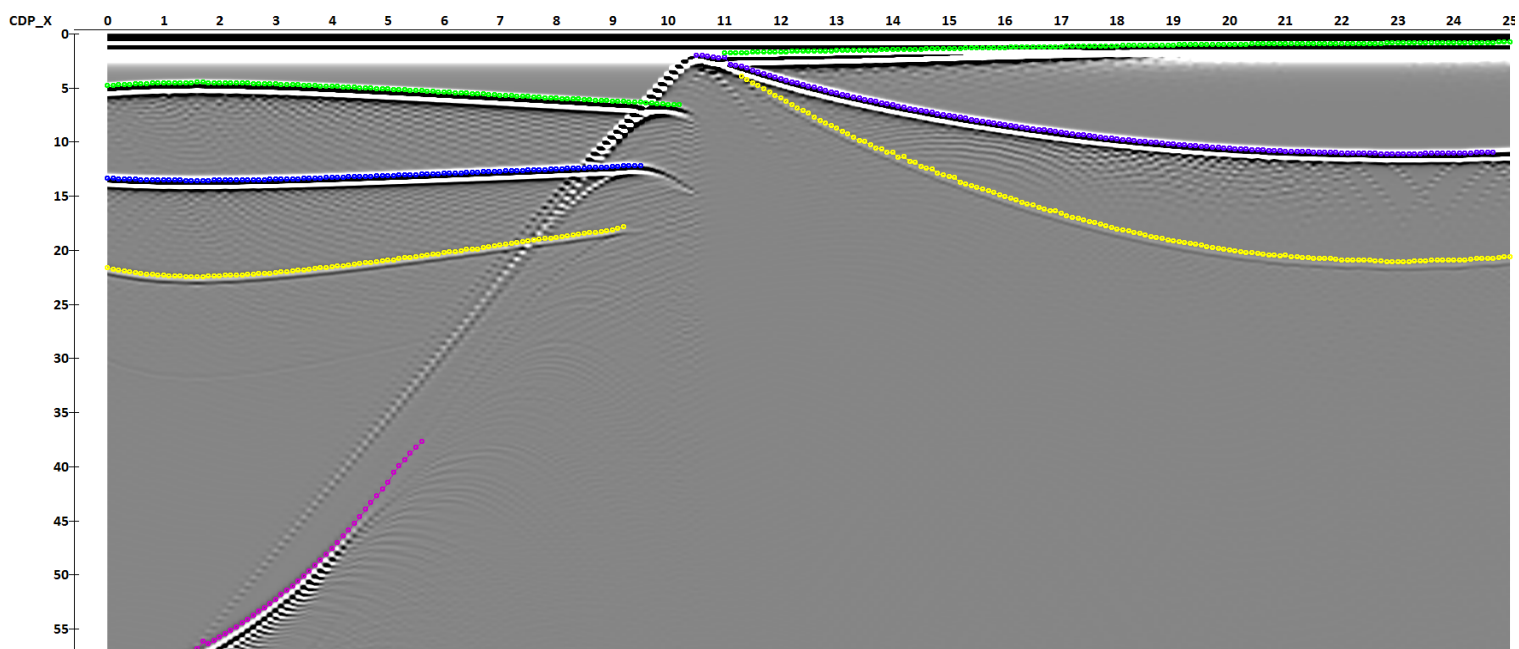


Рисунок 4.3. Синтетическая радарограмма для модели края кратера в окне программы RadExPro с чуть большим усилением, чем на рисунке 4.2 и пропикированными границами. Зелёная граница соответствует кровле реголита, синяя – подошве реголита, жёлтая – кратному отражению от подошвы реголита, фиолетовая – крутому склону кратера

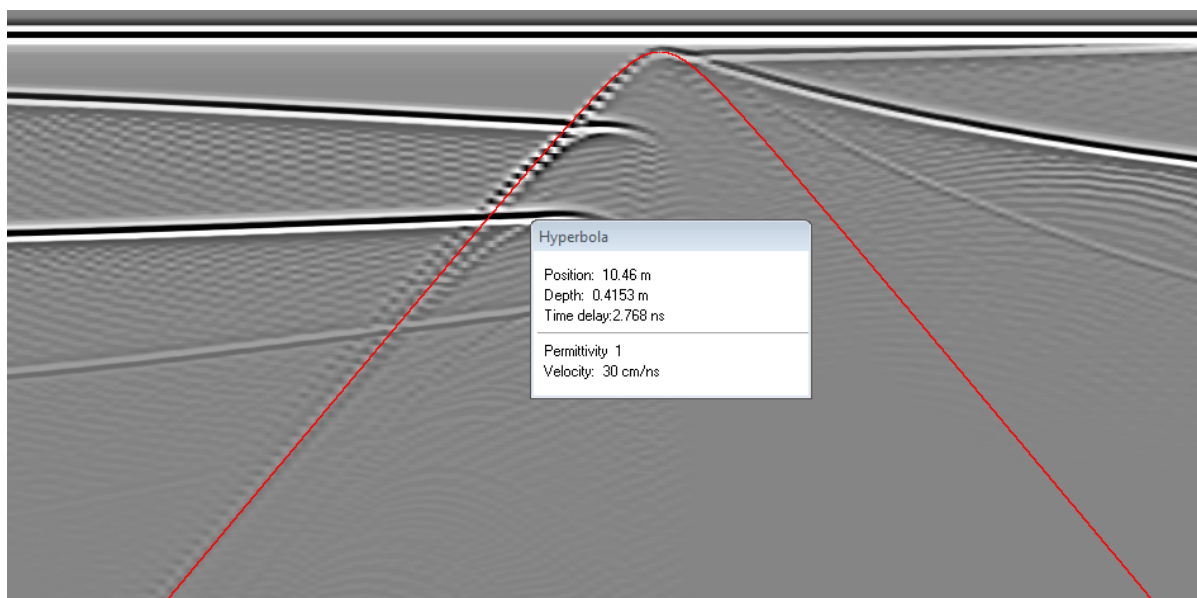


Рисунок 4.4. Теоретическая гипербола, приложенная к дифракции на вершине поднятия в модели для поверхностного радара и её описание в окне программы Prism2

Радарограмма, полученная при расчёте модели для орбитального радара приведена на рисунке 4.5. За счёт того, что источник опущен, а сама модель сжата, амплитуды на получившейся радарограмме очень велики и «усы дифракций» от разных частей модели перекрывают друг друга.

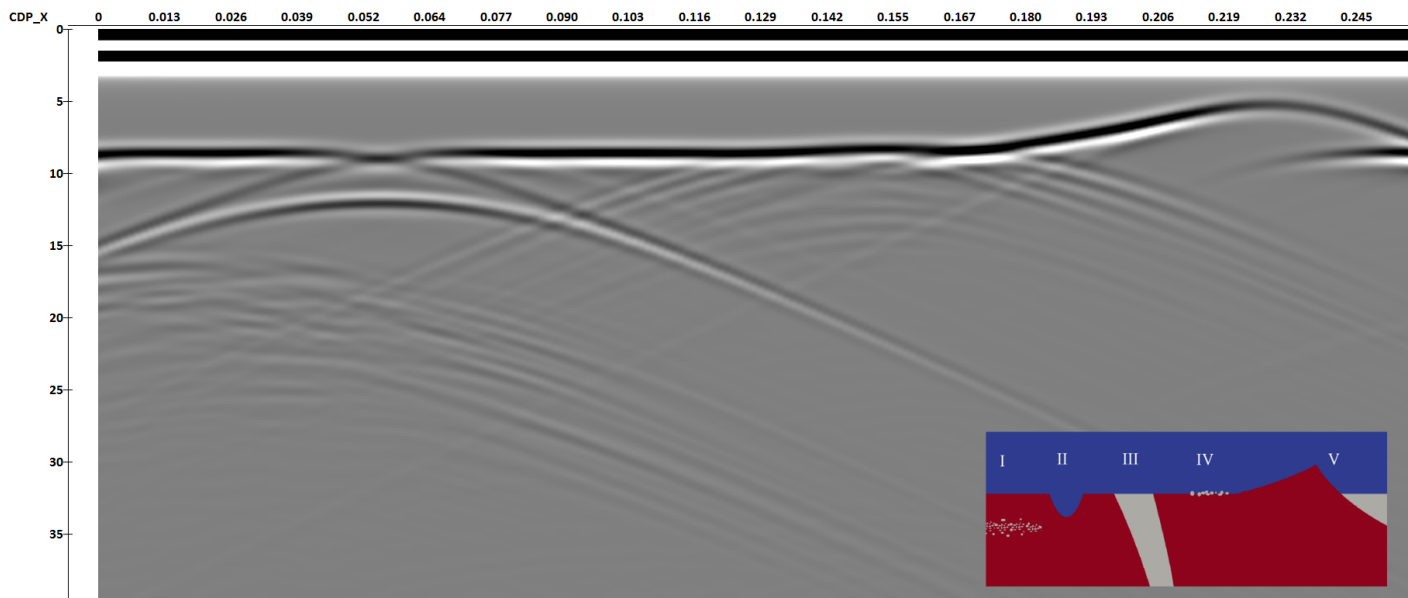


Рисунок 4.5. Синтетическая радарограмма для модели для орбитального радара в окне программы RadExPro без какой-либо обработки. В правом нижнем углу – изображение (рисунок 3.7)

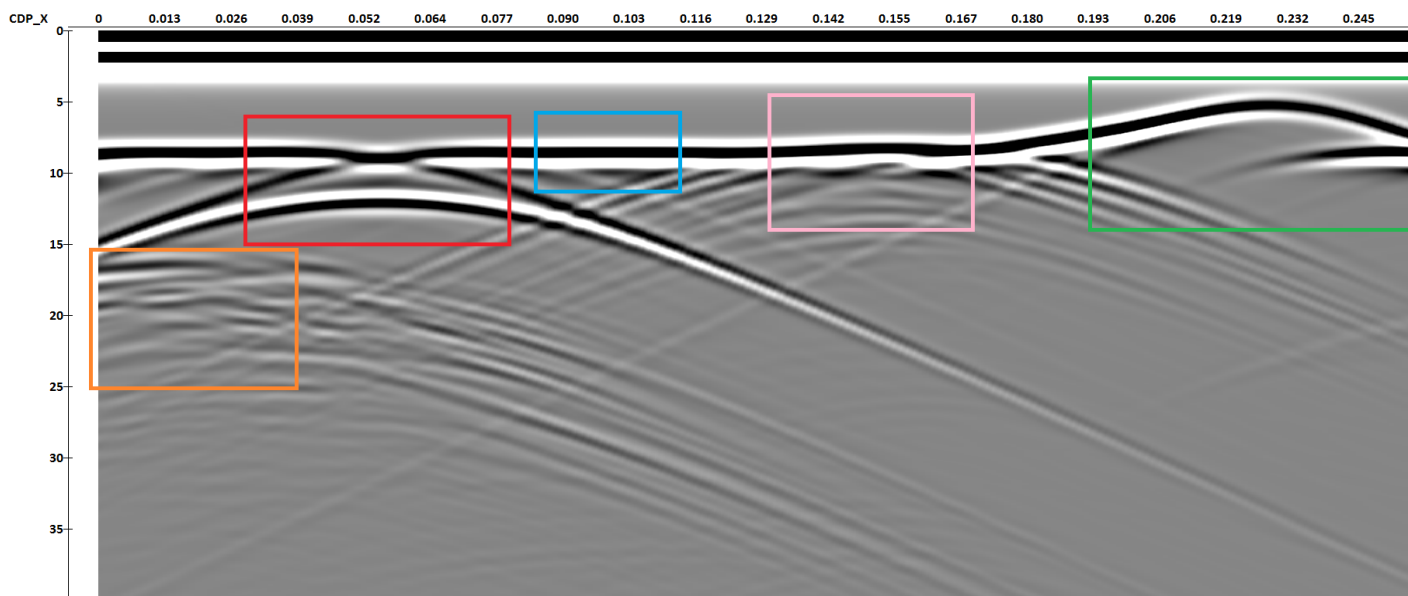


Рисунок 4.6. Синтетическая радарограмма для модели для орбитального радара в окне программы RadExPro с большим усилением, чем на рисунке 4.5, и выделенными областями, соответствующие пяти зонам модели

Результаты для каждой из зон модели почти совпадают с ожидаемыми, описанными в предыдущем разделе. На рисунке 4.6 приведена та же радарограмма с выделенными зонами.

В зоне I, обозначенной на рисунке оранжевым прямоугольником, как и ожидалось наблюдаются множественные дифракции, настолько тесно прилегающие друг к другу что выделить отдельные не представляется возможным.

В зоне II, выделенной красным прямоугольником, наблюдается чётко выраженная петля оси синфазности, соответствующая синклинальной структуре.

В зоне III, которой соответствует синий прямоугольник, на левой границе лав с брекчиями присутствует дифракция, значительно уступающая по амплитуде окружающим отражениям, как и ожидалось. Правая, более крутая граница, вообще никак не проявляется в волновом поле.

В зоне IV, обозначенной розовым прямоугольником, так же наблюдаются множественные тесно расположенные дифракции. За счёт того, что их вершины расположены немного выше, в этом месте соответствующая поверхности ось синфазности как будто слегка приподнимается вверх.

В зоне V, выделенной зелёным прямоугольником, как и ожидалось, сначала соответствующая поверхности ось синфазности поднимается вверх, затем на вершине образуется дифракция. Отражение от крутой части склона отсутствует, а в месте прилегания лавы к краю кратера образуется дифракция.

Выводы о результатах моделирования

В случае с наземным радаром, можно весьма уверенно восстановить геометрию исходной модели по получившейся радарограмме.

В случае с орбитальным, не во всех зонах можно сделать однозначный вывод о структурах, порождающих соответствующие волновые картины. Так, например, в зоне, обозначенной зелёным прямоугольником, без дополнительной информации представить переход к лунному морю почти невозможно. В зоне синего прямоугольника, лавовый канал практически никак не проявляется в волновом поле, по крайней мере при таких параметрах модели, когда рядом расположено множество различных объектов.

И всё же почти полное совпадение ожидаемых результатов с рассчитанными говорит о том, что применение георадиолокации для решения задач определения характеристик поверхности Луны и строения верхней части её разреза может быть весьма успешно.

Заключение

Для подведения итогов работы, хотелось бы ещё раз обратиться к сформулированным во введении задачам.

О выполнении поставленных задач

Первой задачей являлся анализ литературных данных с целью сбора сведений о физических свойствах Луны и верхней части лунного разреза. В ходе разбора множественных источников, были собраны сведения о геологии и геологической истории Луны, типах и свойствах её пород и поверхности. Итогом сбора этих сведений стал вывод о применимости метода георадиолокации в условиях Луны: низкие сопротивления и диэлектрические потери лунных пород делают их почти идеальной средой для применения электромагнитных методов. Опыт применения георадиолокации на Земле позволяет оценить ожидаемые глубинности метода георадиолокационного профилирования вплоть до сотен метров.

Второй задачей являлось составление моделей верхней части разреза Луны. Под составлением моделей подразумевались выбор и описание свойств моделируемых материалов, выбор шага пространственной дискретизации, составление геометрии моделей. Всего рассматривалось 4 материала: вакуум, реголит и два типа пород – импактные брекчии и базальты лунных морей. Свойства для них были выбраны при помощи полученных при решении предыдущей задачи результатов. Геометрия моделей составлялась при помощи упрощённых геологических разрезов и схем лунной поверхности.

Третьей задачей была оценка ожидаемых от моделирования результатов, основанная на собранных сведениях об электрофизических свойствах лунных материалов. На этом этапе были высказаны предположения о том, как будут выглядеть волновые картины для различных моделируемых объектов. Была произведён расчёт коэффициентов отражения и оценка влияния изменений проводимости, связанных с изменением температуры, на форму зондирующего импульса. Минимальный коэффициент отражения для всех комбинаций выбранных материалов составил 0.11, что, согласно литературным данным, в большинстве случаев обеспечивает надёжное выделение отражающей границы. Было показано, что вариации проводимости, вызванные колебаниями температуры на поверхности, никак не влияют на форму импульса и значения коэффициентов отражения.

Последней задачей являлось моделирование откликов наземного и поверхностного радаров и сравнение получившихся результатов с ожидаемыми. Были посчи-

таны две тщательно составленные модели – для наземного и для орбитального радаров, и получившиеся радарограммы сравнивались с описанными на предыдущем этапе ожидаемыми результатами. Модельные результаты почти полностью совпали с ожидаемыми, что позволяет сделать вывод о том, что рассмотренные структуры можно довольно однозначно восстанавливать по особенностям волновых картин.

О благодарностях и планах

Заканчивая работу, автор хочет выразить благодарность своему научному руководителю – Светлане Сергеевне Бричёвой, которая помогла найти такую необычную и интересную тему для бакалаврской. А также рассказать о том, что ещё предстоит сделать.

Несмотря на то, что данная тема вряд ли перерастёт в дальнейшем в магистерский диплом, работа над ней будет продолжаться. В идеальном случае, из неё могла бы получиться небольшая статья. Для этого планируется добавить ещё несколько моделей, включающих типичные для верхней части лунного разреза структуры, подобрать более реалистичные аппроксимации для моделирования орбитального радара, а так же включить в анализ полученных данных обработку.

Список использованной литературы:

1. Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.
2. Соколова Т. Б., Булычев А. А., Лыгин И. В., Старовойтов А. В., Тевелев Ал. В., Шалаева Н. В. Интерпретация геофизических материалов. Тверь: Издательство ГЕРС. 2011. – 208 с.
3. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. Учебное пособие – М.: Издательство МГУ, 2008. – 187 с.
4. Судакова М. С., Владов М. Л. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие – М.: Издательство МГУ, 2016. – 276 с.
5. Annan A. P. Ground Penetrating Radar. Principles, Procedures & Applications. Sensors & Software Inc., 2003. – 278 p.
6. Dalton C. And Hoffman E. (1972) Conceptual Design of a Lunar Colony. NASA Grant Rpt. NGT 44–005–1, Washington, DC. 505 p.
7. Geiss J. Earth, Moon and Mars. ISSI, Spatium, No 5, June 2000. – 16 p.
8. Giannopoulos Antonios. The Investigation of Transmission-Line Matrix and Finite-Difference Time-Domain Methods for the Forward Problem of Ground Probing Radar. 1997 – 258 p.
9. Heiken Grant H., Vaniman David T., French Bevan M. Lunar Source Book. A user's guide to the Moon. Cambridge University Press, 1991 – 736 p.
10. Jol Harry M. Ground Penetrating Radar. Theory and Applications. Elsevier Science, 2009. – 524 p.
11. Kiefer W. S., Macke R. J., Britt D. T., Irving A. J., and Consolmagno G. J. (2012) The Density and Porosity of Lunar Rocks. *Geophysical Research Letters*
12. Langseth M. G. and Keihm S. J. (1977) In-situ measurements of lunar heat flow. In Soviet-American Conference on Geochemistry of the Moon and Planets, pp. 283–293. NASA SP-370.
13. Lunar Sample and Photo Catalog, URL:
<https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/samplecatalog/index.cfm>
14. Mitchell J. K., Houston W. N., Carrier W. D. III, and Costes N. C. (1974) Apollo Soil Mechanics Experiment S-200. Final report, Space Sciences Laboratory Series 15, Issue 7, Univ. of California, Berkeley.

15. Olhoeft G. R. and Strangway D. W. (1975) Dielectric properties of the first 100 meters of the Moon. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 24, 394–404.
16. Olhoeft G. R., Frisillo A. L., and Strangway D. W. (1974) Electrical properties of lunar soil sample 15301,38. *J. Geophys. Res.*, 79, pp. 1599–1604.
17. Olhoeft G. R., Strangway D. W., and Frisillo A. L. (1973) Lunar sample electrical properties. *Proc. Lunar Sci. Conf. 4Th*, pp. 3133–3149
18. Schwerer F. C., Huffman G. P., Fisher R. M., and Nagata T. (1974) Electrical conductivity of lunar surface rocks; laboratory measurements and implications for lunar interior temperatures. *Proc. Lunar Sci. Conf. 5th*, pp. 2673–2687.
19. Sen P. N., Scala C., and Cohen M. H. (1981) A self-similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric constant of fused glass beads. *Geophysics*, 46, 781–795.
20. Nozette S., Spudis P., Bussey B., Jensen R., Rane K., Winters H., Lichtenberg C. L., Marinelli W., Crusan J., Gates M., Robinson M. (2010) The Lunar Reconnaissance Orbiter Miniature RadioFrequency (Mini-RF) Technology Demonstration. *Space Sci.* pp. 285–302
21. Warren C., Giannopoulos A. and Giannakis I. (2016) gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar, *Computer Physics Communications*
22. Wilhelms Don. *Geologic History of the Moon*. 1987. – 302 p.
23. Yanghua Wang. (2015) Frequencies of the Ricker wavelet. *Geophysics*, vol. 80, no. 2 (March-April 2015), pp. A31–A37
24. Yee, K. S. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas Propag*, 14(3), pp. 302–307.