

Обработка результатов георадиолокационного профилирования лунного грунта с помощью программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ

Введение

В настоящей публикации представлены результаты обработки данных, полученных в ходе исследования лунного грунта с помощью геофизического прибора электромагнитного подповерхностного зондирования Lunar Penetrating Radar (LPR). LPR входит в состав комплекса научной аппаратуры лунохода Юйту-2, выполняющего исследовательские задачи на поверхности обратной стороны Луны с января 2019 года в рамках китайской космической миссии Чанъэ-4.

Обработка данных LPR производилась в программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ (<https://www.georadar-expert.ru/>) двумя способами. Один из них заключался в применении к сигналам LPR амплитудно-частотных преобразований для минимизации маскирующего влияния помех на отражения от границ слоёв лунного грунта. Другим способом, с помощью автоматизированного анализа поля обратного рассеяния BSEF (подробнее об анализе BSEF см. [здесь](#)), осуществлялся переход от представления информации о подповерхностной среде в виде радарограммы, к представлению информации об этой среде и отражённом от неё волновом поле в виде разреза атрибута. По результатам анализа BSEF были получены разрезы действительной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости, центральной частоты и Q-factor, которые позволили выявить особенности строения лунного грунта и этапов его формирования в исследуемом диапазоне глубин.

На рис. 1 показан снимок главного окна программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ в режиме работы с результатами анализа BSEF. В левой части главного окна расположены элементы визуализации результатов анализа BSEF и настройки построения разреза атрибута. В правой части находится область визуализации разреза и элементы управления визуализацией радарограммы, которая расположена на соседней вкладке и в данный момент скрыта.

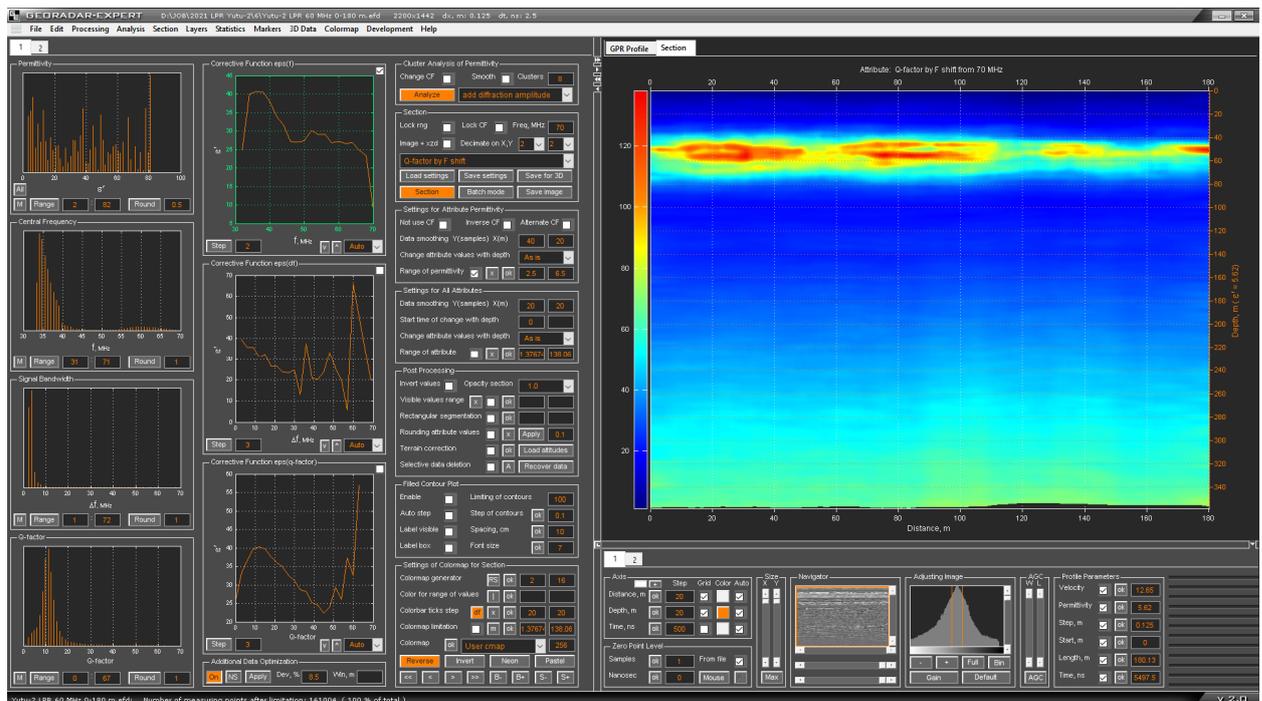


Рис. 1

Принцип действия LPR

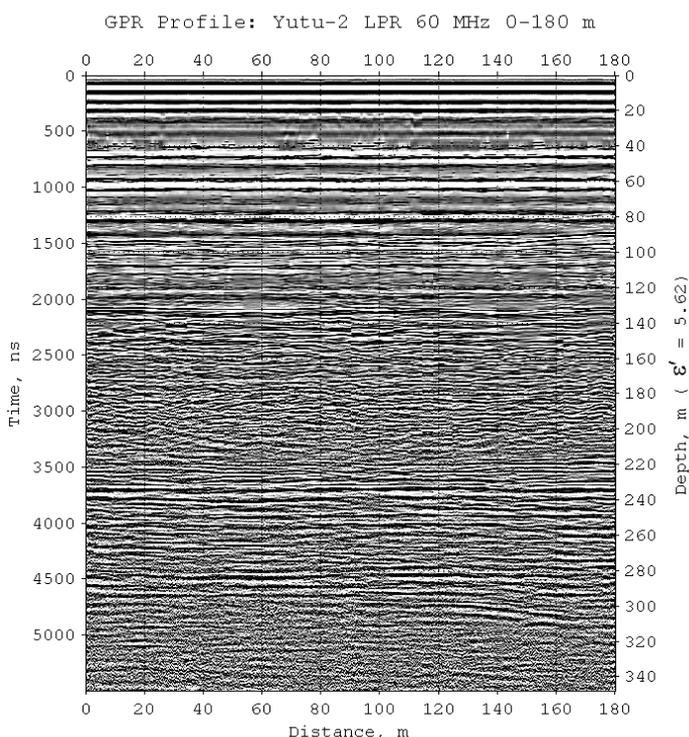
LPR является георадаром, предназначенным для работы на поверхности Луны. Принцип действия георадара основан на излучении коротких электромагнитных импульсов в толщу исследуемой среды и регистрации отражений от неоднородностей этой толщи. В грунте такими неоднородностями являются слои с различными электрофизическими характеристиками и локальные объекты, линейные размеры которых сопоставимы с длиной волны зондирующего импульса.

LPR исследование лунного грунта осуществляется методом радиолокационного профилирования (англ. common offset profiling). Суть метода состоит в зондировании подповерхностной среды в процессе перемещения антенн георадара по заданному маршруту с сохранением постоянного расстояния между передающей и приёмной антеннами. Происходит это следующим образом: в некоторой точке лунной поверхности, расположенной на пути следования лунохода, LPR излучает электромагнитный импульс в толщу лунного грунта, после чего, через равные промежутки времени, принимает отражения этого импульса и записывает их амплитуды в память. Таким образом, формируется георадиолокационная трасса – функция амплитуды принятого георадаром сигнала от времени его прихода в приёмную антенну.

В ходе профилирования, LPR получает георадиолокационные трассы для различных точек лунной поверхности по ходу следования лунохода. Из георадиолокационных трасс формируется двумерная матрица отражённых сигналов, в которой георадиолокационные трассы расположены по вертикали, а порядок расположения трасс по горизонтали определён очередностью их получения. Изображение такой матрицы называется радарограммой или георадиолокационным профилем.

Чаще всего, матрица отражённых сигналов визуализируется в виде точечного изображения, где яркость точек зависит от величины амплитуды. Матрица сигналов содержит как полезные сигналы, которыми являются отражения от реальных неоднородностей исследуемой среды, так и различного рода помехи. Помехи могут быть порождены объектами на дневной поверхности, многократными отражениями от подповерхностного объекта и влиянием электронных приборов, генерирующих сигналы в рабочей полосе частот георадара.

При наличии помех, для минимизации влияния этих помех на полезные отражения, матрице сигналов необходима обработка.



На рис. 2 показан результат первых 180 метров LPR профилирования лунного грунта. Вертикальная шкала на радарограмме слева показывает время двойного пробега электромагнитного импульса LPR в наносекундах, вертикальная шкала справа показывает глубину в метрах, рассчитанную на основании указанного в скобках среднего значения действительной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости. Горизонтальные шкалы показывают пройденное луноходом расстояние в метрах.

Рис. 2

Особенности LPR

Глубина георадиолокационного исследования зависит от центральной частоты антенн георадара. Чем ниже частота, тем медленнее затухает зондирующий импульс, и тем глубже он проникает в исследуемую среду. Однако использование низкочастотной антенны для увеличения глубины исследования приводит к ухудшению разрешения сигналов георадиолокационного профиля.

Чтобы обеспечить приемлемое разрешение георадарных сигналов и глубину исследования, LPR оснащён двумя антеннами, отличающимися по конструкции и настроенными на различные частоты. Таким образом, LPR лунохода Юйту-2 является двухканальным радаром.

Первый канал работает на центральной частоте 60 МГц, второй канал настроен на центральную частоту 500 МГц. В данной публикации представлены результаты обработки данных первого канала LPR. Вибраторы антенн первого канала установлены в задней части лунохода, на рис. 3 они указаны стрелками. Расстояние между вибраторами и поверхностью луны составляет около 60 см.

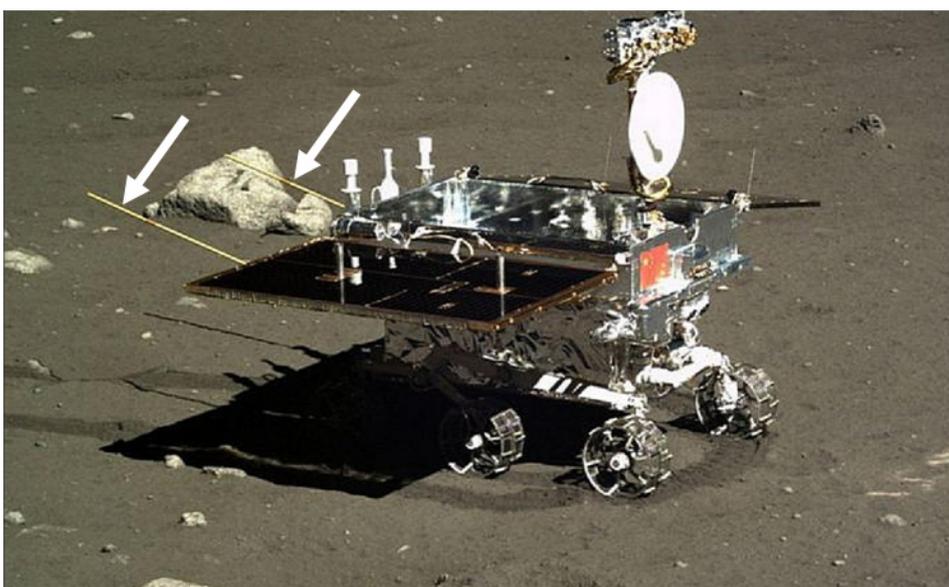
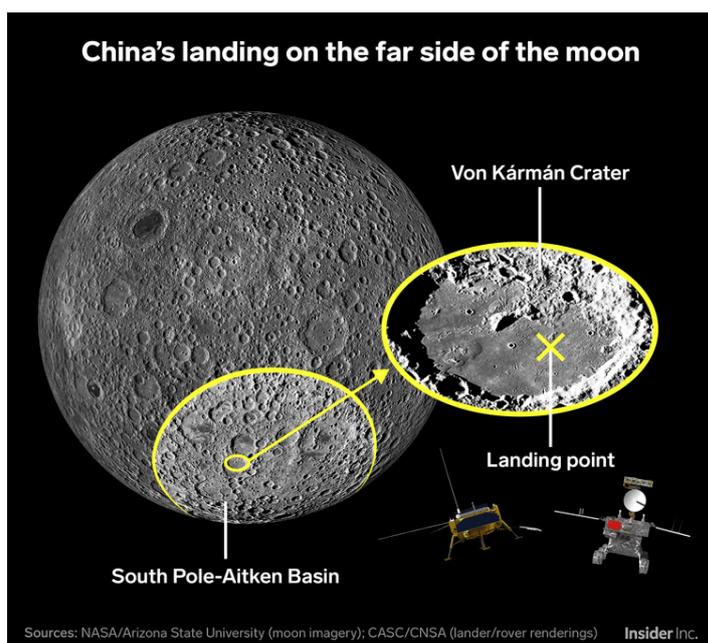


Рис. 3 CASC/China Ministry of Defense

Место проведения исследования



В январе 2019 года посадочный модуль космической миссии Чанъэ-4 совершил мягкую посадку в кратере Фон Карман, который находится на территории бассейна Южный Полюс — Эйткен (рис. 4). Этот бассейн представляет собой глубочайшую и старейшую ударную структуру Луны, а размер 2400×2050 км делает его одним из крупнейших кратеров Солнечной системы. Кратер Фон Карман имеет относительно ровное дно, затопленное базальтовой лавой, поверхность которой покрыта слоем реголита.

На рис. 5 показана схема перемещения лунохода Юйту-2 во время первого девятимесячного этапа исследования Луны. Путь точки маршрута показаны круглыми маркерами желтого цвета и пронумерованы. Путь точки №1 находится рядом с посадочным модулем Чанъэ-4, положение которого обозначено точкой CE4. Нумерация путей

точек произведена в порядке увеличения пройденной дистанции. Данная схема перемещения лунохода опубликована в статье *Lai, J., Xu, Y., Bugiolacchi, R. et al. First look by the Yutu-2 rover at the deep subsurface structure at the lunar farside. Nat Commun 11, 3426 (2020).*

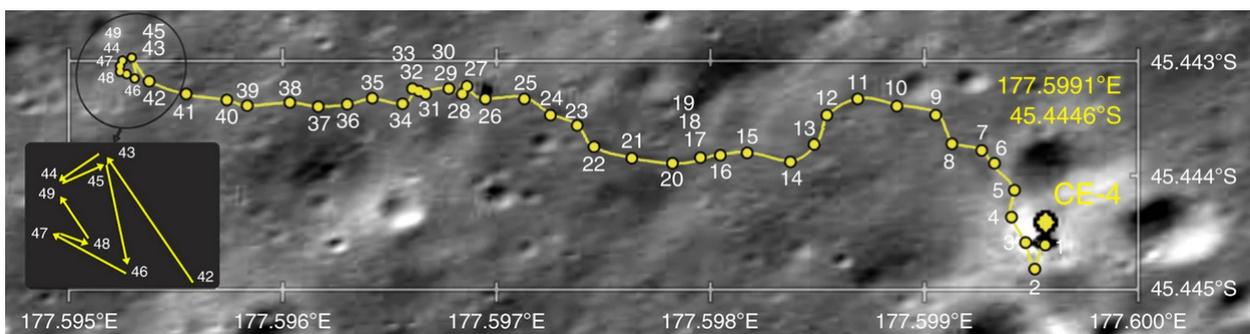


Рис. 5

Далее рассматривается обработка результата радиолокационного профилирования первых 180 метров маршрута лунохода. Начало радиолокационного профиля соответствует положению путевой точки №1, конец профиля примерно соответствует положению путевой точки №31.

Обработка данных LPR

В настоящей публикации представлены результаты обработки данных LPR двумя способами. Один способ - это обработка сигналов георадарного профиля с целью подавления помех и выделения границ слоёв лунного грунта на радарограмме. Второй способ - это автоматизированный анализ поля обратного рассеяния BSEF для определения электрофизических характеристик слоёв лунного грунта.

Особенности лунной радарограммы обусловлены конструкцией антенн LPR 60 МГц и свойствами лунного грунта. Антенные вибраторы 60 МГц не являются экранированными. По этой причине полезные отражения на радарограмме перекрываются помехами в виде отражений от объектов, расположенных на поверхности луны – камней, бортов кратеров и деталей лунохода.

Наибольший маскирующий эффект на LPR сигналы, отражённые от неоднородностей лунного грунта, оказывают многократные отражения от металлических элементов конструкции лунохода. Так как металл является хорошим отражателем радиоволн, отражения от металлических элементов конструкции лунохода, расположенные в непосредственной близости от LPR антенн, имеют наиболее высокие амплитуды. Эти отражения выглядят на радарограмме как горизонтально ориентированные полосы, присутствующие на всём протяжении георадиолокационного профиля и проявляющиеся во всём диапазоне времени регистрации отражений. Такая стабильность этих помех вызвана тем, что расстояние между антенными вибраторами и луноходом является величиной постоянной и не меняется со временем. Кроме того, отражения от различных частей лунохода взаимодействуют между собой, взаимно усиливаясь или подавляясь, в зависимости от их фазовых соотношений.

По сравнению с отражениями от лунохода, амплитуды отражений от камней, расположенных на поверхности Луны, и бортов кратеров заметно ниже. Это происходит потому, что эти объекты не обладают такой хорошей отражательной способностью, как металлические элементы лунохода. Часть энергии зондирующих импульсов LPR поглощается веществом, из которых состоят объекты на поверхности, а часть рассеивается этими объектами в пространстве и не попадает в приёмную антенну LPR.

По мере прохождения зондирующего электромагнитного импульса через подповерхностную среду, меняется частотный состав этого импульса. Слои грунта, близкие по своим характеристикам, похожим образом искажают зондирующий импульс георадара. В силу того, что электрофизические характеристики лунного грунта и сильно разреженной атмосферы Луны существенно различаются, то и частотный состав отражённых LPR импульсов от подповерхностных объектов и объектов на поверхности Луны также будет иметь заметные отличия. Рассмотрим

спектр сигналов LPR профиля. На рис. 6 слева показана исходная, необработанная, радарограмма LPR 60 МГц, справа представлен амплитудный спектр сигналов этой радарограммы.

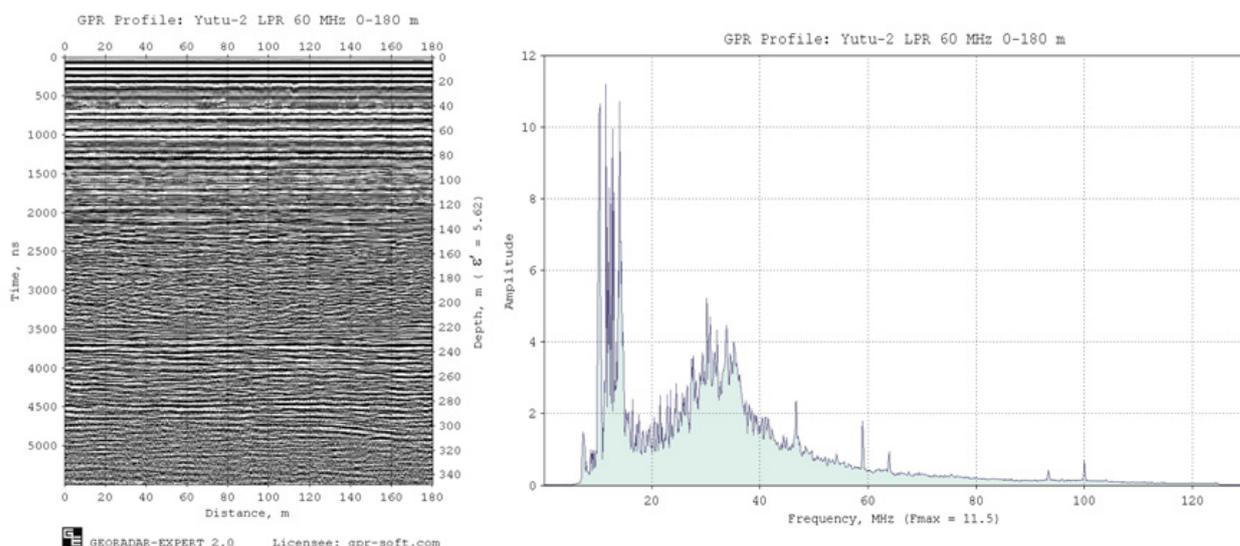


Рис. 6

Спектр можно разделить на два частотных диапазона, внутри каждого из которых линия спектра имеет гауссоподобную форму. Граничат эти диапазоны в районе 20 МГц. Такой вид спектра свидетельствуют о том, что на георадарном профиле имеются две группы сигналов, хорошо разнесённые по частотам. В одном из частотных диапазонов могут быть сосредоточены полезные сигналы, а в другом – помехи.

Факт наличия высоких спектральных амплитуд в диапазоне частот до 20 МГц позволяет предположить, что этот диапазон занимают помехи от элементов конструкции лунохода. Чтобы проверить истинность этого предположения, необходимо выделить эти помехи и получить их спектральный образ. На рис. 7 показан результат выделения горизонтально ориентированных помех при помощи сингулярного разложения матрицы сигналов георадиолокационного профиля, реализованного в программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ и спектр этих помех.

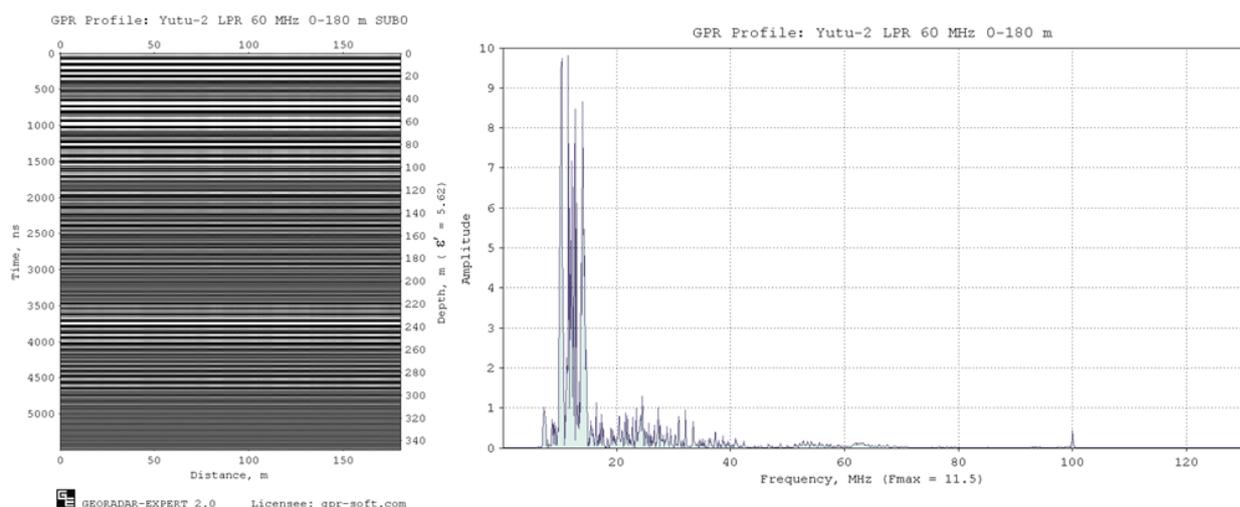


Рис. 7

Спектр даёт подтверждение, что основная энергия помех от корпуса лунохода действительно сосредоточена в диапазоне частот до 20 МГц. На рис. 8 представлена радарограмма и её спектр после процедуры подавления диапазона частот до 20 МГц для минимизации влияния помех от корпуса лунохода. Подавление производилось при помощи полосовой фильтрации, реализованной на основе преобразований Фурье.

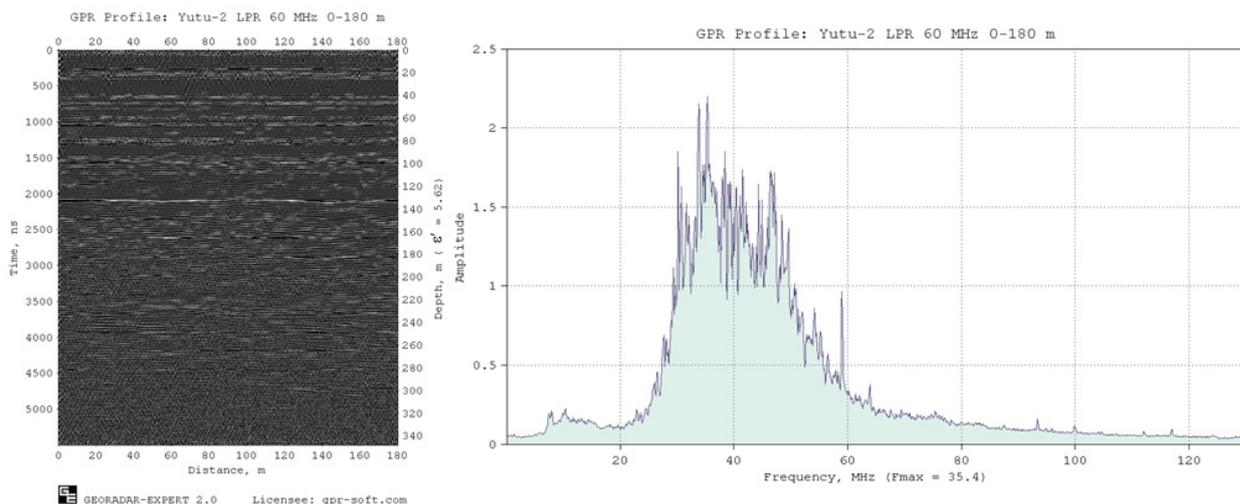


Рис. 8

В результате фильтрации, помехи от лунохода подавлены, но помехи, порождённые другими объектами на поверхности Луны и случайными шумами, во многих местах ещё перекрывают отражения от границ слоёв лунного грунта, из-за чего на радарограмме эти границы выглядят излишне фрагментарно. Помехи занимают близкие к полезным сигналам частоты, лежащие в высокочастотной области амплитудного спектра.

Для улучшения визуализации отражений от границ слоёв, можно понизить центральную частоту этих отражений на радарограмме и увеличить их амплитуду. В результате этих действий помехи будут перекрыты более интенсивными низкочастотными полезными отражениями. Для подобных задач в программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ реализован модуль B-Detector (Boundaries Detector).

С помощью B-Detector пользователь меняет амплитуду, частоту и длительность отражений на радарограмме. В результате радарограмма выглядит так, как если бы её запись осуществлялась с применением антенны, отличающейся по своим частотным характеристикам от реально использованной антенны георадара. На рис. 9 представлена радарограмма и спектр её сигналов после применения модуля B-Detector для понижения частоты полезных сигналов.

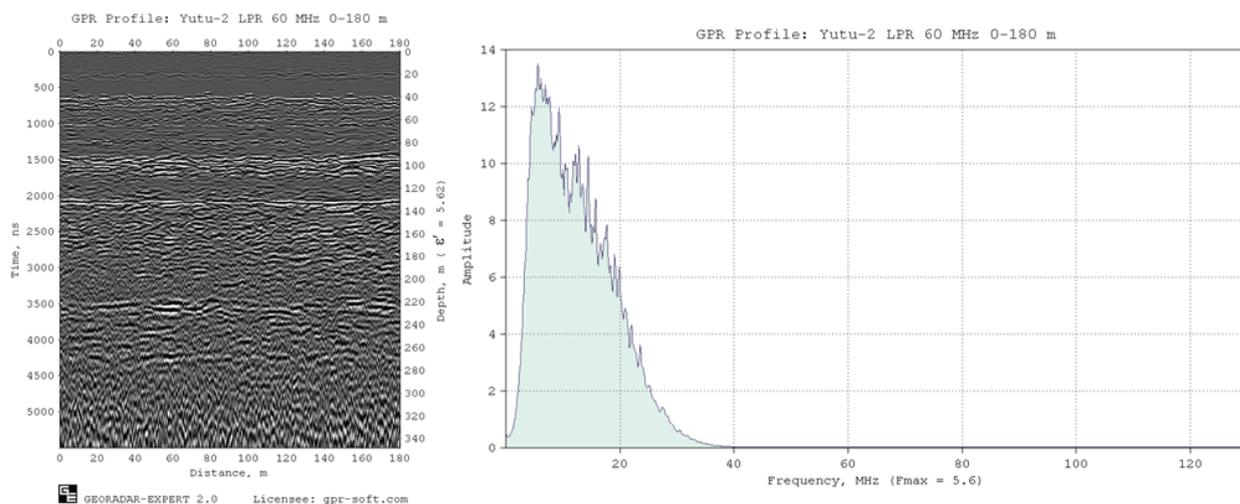


Рис. 9

В результате применения модуля B-Detector, отражения от границ слоёв лунного грунта стали более целостными, проявились отражения от границ слоёв во временном диапазоне 3500 – 4500 нс. На рис. 10 показана георадиолокационная трасса до и после обработки в модуле B-Detector. На графиках вертикальная шкала показывает амплитуды, горизонтальная шкала – номера отсчётов георадиолокационной трассы.

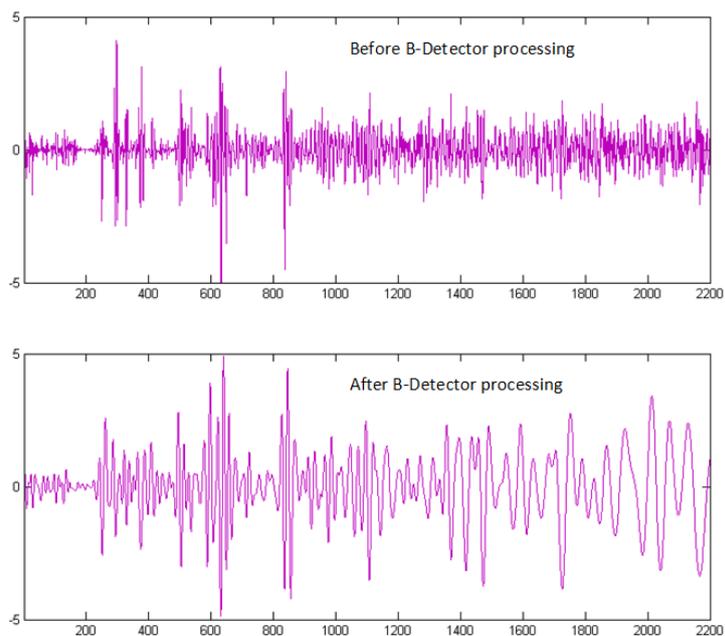


Рис. 10

На рис. 11 показан результат обработки данных LPR в более крупном масштабе изображения.

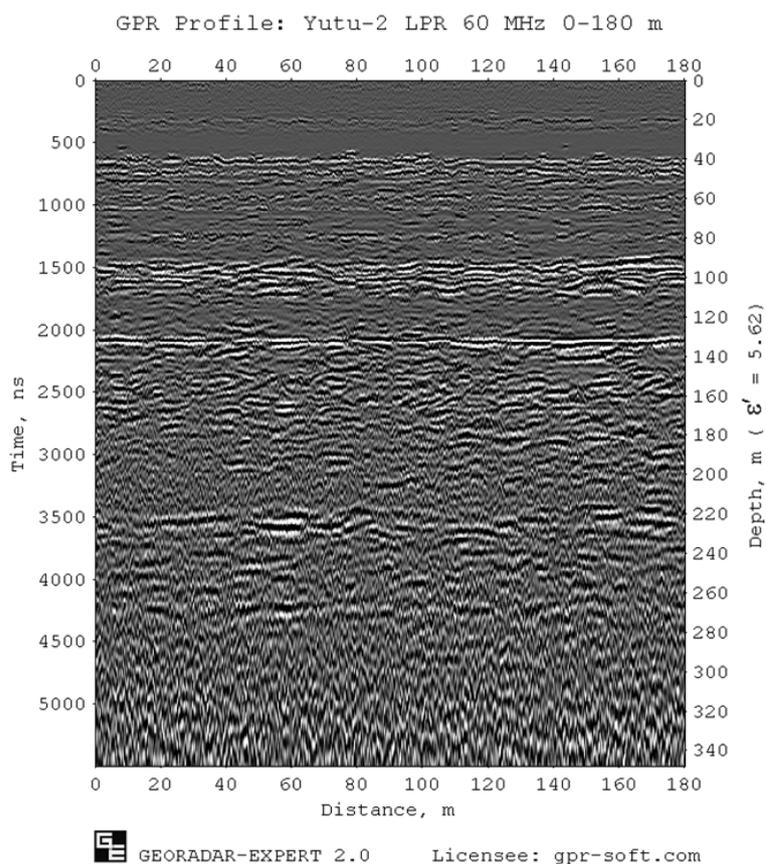


Рис. 11

Таким образом, в процессе обработки данных LPR был подавлен диапазон частот до 20 МГц, занимаемый помехами от корпуса лунохода, и в это диапазон были перемещены полезные отражения. В результате, на радарограмме наблюдаются очищенные от помех отражения от границ слоёв лунной толщи. Эти отражения дают представление о положении слоёв на разрезе, но не дают, в достаточной степени, представление о свойствах слоёв и изменении этих свойств

внутри слоя. Решить такую задачу можно при помощи автоматизированного анализа поля обратного рассеяния BSEF.

Изучение строения лунного грунта с помощью автоматизированного анализа BSEF

В георадиолокации, отражение зондирующего импульса от границы между слоями формируется только при условии достаточной разницы значений диэлектрической проницаемости в области контакта этих слоёв. Если контакт слоёв имеет диффузный характер, при котором диэлектрическая проницаемость изменяется плавно, а не скачкообразно, то отражение от такой границы на радарограмме будет отсутствовать. В случае плавного изменения электрофизических характеристик подповерхностной среды на всём протяжении георадиолокационного профиля и во всём диапазоне глубин георадиолокационного исследования, радарограмма не будет содержать отражений от границ слоёв.

Получить информацию о диэлектрической проницаемости участков подповерхностной среды можно с помощью дифрагированных отражений. Дифрагированные отражения порождают локальные объекты, размеры которых сопоставимы с длиной волны зондирующего импульса георадара. Геометрия дифрагированного отражения на радарограмме зависит от средней скорости распространения зондирующего импульса от антенны георадара до локального объекта. На основе значения средней скорости, полученной из измерения геометрии дифрагированного отражения, рассчитывается среднее значение диэлектрической проницаемости для толщи, ограниченной антенной георадара и глубиной залегания локального объекта.

Чем больше дифрагированных отражений от подповерхностных локальных объектов содержит радарограмма, тем более детальную информацию о строении подповерхностной среды можно получить. Однако количество дифрагированных отражений на радарограмме, пригодных для подобных измерений, часто бывает недостаточным для получения подробной картины строения разреза, отображающей все его особенности. Не редки случаи, когда дифрагированные отражения на радарограмме исчисляются единицами, а иногда и отсутствуют полностью.

Преодолеть упомянутые выше затруднения можно с помощью автоматизированного анализа поля обратного рассеяния BSEF (Back-Scattering Electromagnetic Field), специально разработанного для программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ. Использование результатов этого анализа позволяет осуществить переход от визуализации информации о подповерхностной среде в виде радарограммы, к визуализации характеристик этой среды и отражённого волнового поля в виде разреза атрибута.

Для решения широкого спектра задач георадиолокации, в программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ насчитывается более двух десятков атрибутов. Атрибутами являются параметры волнового поля, отображённого на радарограмме, и их производные, полученные в результате различных преобразований. Представление георадиолокационной информации в виде разреза атрибута заметно повышает информативность георадиолокационного исследования и делает результат этого исследования более понятным, а использование модуля статистического анализа, также реализованного в ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ, помогает выявить взаимосвязи атрибутов между собой и физико-механическими характеристиками исследуемого грунта.

Разрез атрибута 'Действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости'

На рис. 12 показан разрез действительной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости (далее в тексте - диэлектрической проницаемости), полученный по результатам автоматизированного анализа BSEF данных лунного георадара.

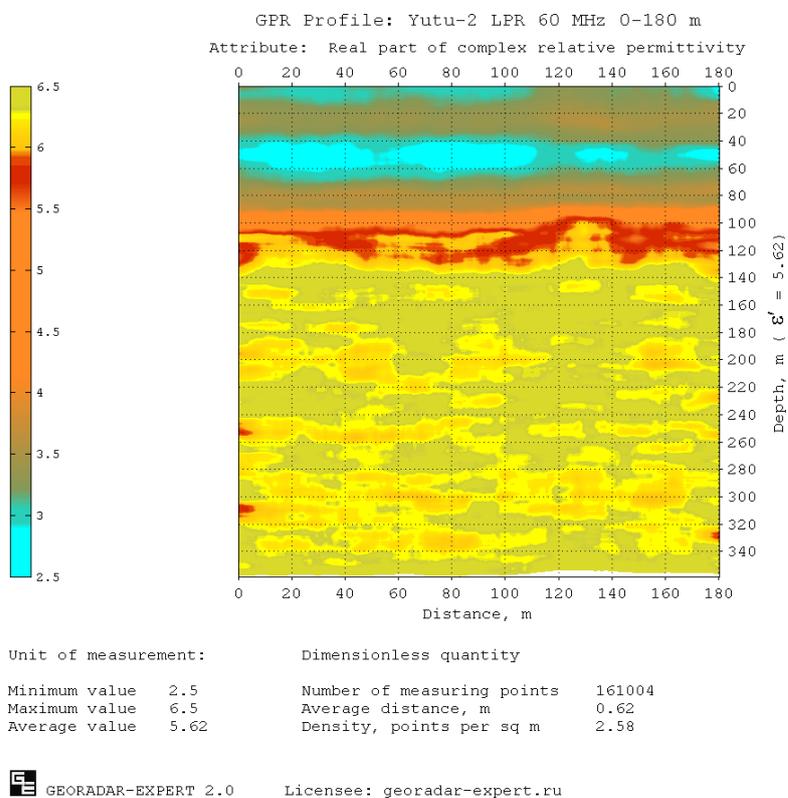
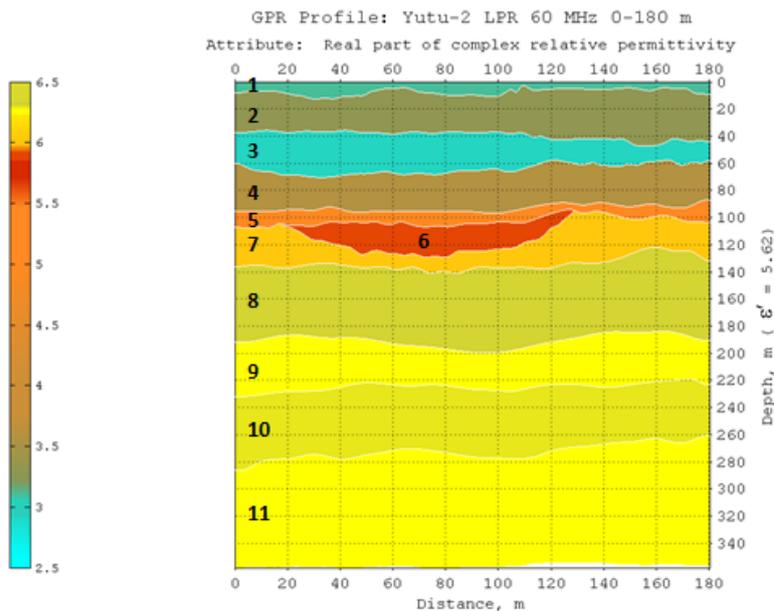


Рис. 12

Шкала соответствия цветовой гаммы разреза значениям диэлектрической проницаемости показана слева от изображения разреза. В нижней части изображения размещены статистические показатели разреза. Это минимальное, максимальное и среднее значения атрибута разреза (Minimum value, Maximum value и Average value), количество точек автоматизированного анализа, по которым рассчитан разрез (Number of measuring points), среднее расстояние между точками анализа BSEF в метрах (Average distance) и среднее количество точек анализа BSEF на квадратный метр площади разреза (Density).

Примечание: термин 'точка анализа BSEF' означает точку на георадарном профиле, в окрестности которой, в процессе автоматизированного анализа BSEF, измеряются параметры волнового поля. В результате, точке анализа присваивается набор атрибутов - амплитуда, частота, ширина спектра, диэлектрическая проницаемость и др.

На разрезе близкие значения атрибута формируют слои, дающие представление о строении исследуемой толщи. На рис. 13 показан вариант визуализации разреза, где значения диэлектрической проницаемости внутри слоя одинаковы по всей площади слоя и равняются среднему значению диэлектрической проницаемости в этом слое.



Unit of measurement: Dimensionless quantity

Minimum value 2.5 Number of measuring points 161004
 Maximum value 6.5 Average distance, m 0.62
 Average value 5.62 Density, points per sq m 2.58

GEORADAR-EXPERT 2.0 Licensee: gpr-soft.com

Рис. 13

Слоям на разрезе присвоены номера в порядке возрастания средней глубины залегания слоя. Статистические показатели для разреза диэлектрической проницаемости по слоям представлены в таб. 1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Statistics file name: Yutu-2 LPR 60 MHz 0-180 m Re(permittivity), layers.gestat											
2	Source file name: Yutu-2 LPR 60 MHz 0-180 m.efd											
3	Attribute: Re(permittivity)											
4	Layer name	Minimum	Maximum	Mean	Range	Standard Deviation	Coefficient of Variation	Variance	Median	MAD	IQR	PAR
5	Full area	2.5	6.5	5.439523982	4	1.325250023	0.243633455	1.756287624	6.237954205	1.157918377	2.535463115	1.194957504
6	1	2.841433463	3.318019209	3.108085218	0.476585746	0.078820976	0.025359979	0.006212746	3.094105214	0.061761221	0.100731844	0.025359979
7	2	3.079721223	3.605413576	3.307520487	0.525692353	0.101966332	0.030828632	0.010397133	3.310801016	0.081166399	0.131674723	0.030828632
8	3	2.5	3.184800291	2.919034391	0.684800291	0.133419942	0.045706876	0.017800881	2.934552375	0.113108434	0.21120415	0.045706876
9	4	3.056330955	4.739491447	3.565458133	1.683160493	0.298792292	0.083801935	0.089276834	3.560732358	0.209467509	0.284646533	0.083801935
10	5	3.824513791	5.921080817	5.122316227	2.096567025	0.332105348	0.064834995	0.110293962	5.208470415	0.277482396	0.507250489	0.064834995
11	6	5.426342988	6.131802408	5.862555641	0.705459421	0.125209641	0.021357519	0.015677454	5.874047936	0.102652388	0.182482675	0.021357519
12	7	5.363669927	6.473264641	6.016147851	1.109594714	0.209861767	0.03488308	0.044041961	6.01664983	0.166851055	0.267835843	0.03488308
13	8	5.880636339	6.5	6.329236959	0.619363661	0.071261123	0.011259039	0.005078148	6.338293291	0.052478516	0.080367351	0.011259039
14	9	5.952659753	6.470887298	6.278579813	0.518227544	0.081578162	0.012993091	0.006654997	6.297391951	0.067595639	0.122926254	0.012993091
15	10	5.813573514	6.461465849	6.295538956	0.647892336	0.072063499	0.011446757	0.005193148	6.306429054	0.054247584	0.084771714	0.011446757
16	11	5.679405394	6.475323295	6.275909481	0.7959179	0.081384236	0.01296772	0.006623394	6.28012669	0.061989102	0.099818399	0.01296772
17	Note:											
18	MAD means the mean absolute deviation											
19	IQR means the interquartile range											
20	PAR means the peak to average ratio											

Таб. 1

Значения диэлектрической проницаемости разреза лежат в диапазоне 2.5 – 6.5. На разрезе наибольший интерес вызывают слои 3 и 6.

Слой 3

Слой 3 обладает наименьшим средним значением диэлектрической проницаемости, большая часть площади этого слоя имеет диэлектрическую проницаемость ниже 3. Толщина слоя 3 варьируется от 11.6 м до 33.7 м, средняя составляет 24.8 м. Глубина залегания кровли слоя 3 меняется в пределах от 36.1 до 47.8 м, а подошвы слоя – от 58 до 70.8 м.

В качестве гипотезы образования слоя 3 рассматривается предположение, что данный слой является лавовой трубкой, т.е. туннелем, образованным потоком вулканического извержения. Лавовая трубка формируется следующим образом: в процессе извержения, поверхностный поток лавы быстро остывает, образуя корку. Корка выступает в роли теплоизолятора для внутреннего

потока раскалённой лавы. По окончании извержения, ещё неостывшая лава стекает под уклон, оставляя за собой протяжённые пустоты, именуемые лавовыми трубками. Факт того, что значения диэлектрической проницаемости слоя 3 лежат в диапазоне от 2.5 до 3.2, позволяет выдвинуть предположение, что слой 3 является лавовой трубкой, частично или полностью заполненной водным льдом.

Слой 6

В отличие от остальных слоёв разреза, Слой 6, расположенный внутри слоя 7, имеет чашеобразную форму, напоминающую углубление, которое возникает от ударного воздействия при столкновении небесного тела с поверхностью Луны. Средняя глубина залегания верхней границы слоя 6 составляет 104 м, максимальная толщина слоя 6 равна 24.4 м. Протяжённость слоя 6 около 111 м.

Над слоями 6 и 7 располагается слой 5, средняя толщина которого составляет 9.4 метра. Этот слой отличается от слоёв 6 и 7 более низким средним значением диэлектрической проницаемости 5.1. У слоёв 6 и 7 эти значения составляют 5.9 и 6 соответственно. Если слой 6 является ударным кратером, погребённым под почти стометровым слоем лунного грунта, то на основании этого факта можно сделать вывод, что кровля слоёв 6 и 7 достаточно долгое время являлась лунной поверхностью. И этот период времени был настолько продолжительным, что на поверхности успел сформироваться почти десятиметровый осадочно-пылевой слой реголита. Потом произошло вулканическое извержение или серия извержений, в результате чего лунная поверхность покрылась магматической породой толщиной около 100 метров. В пользу этой гипотезы свидетельствует распределение значений диэлектрической проницаемости по глубине разреза.

Изменение диэлектрической проницаемости по глубине

На рис. 14 показана зависимость диэлектрической проницаемости от номера слоя. Чем больше номер слоя, тем глубже слой залегает. На горизонтальной оси графика располагаются номера слоёв, на вертикальной оси – средние значения диэлектрической проницаемости в слое.

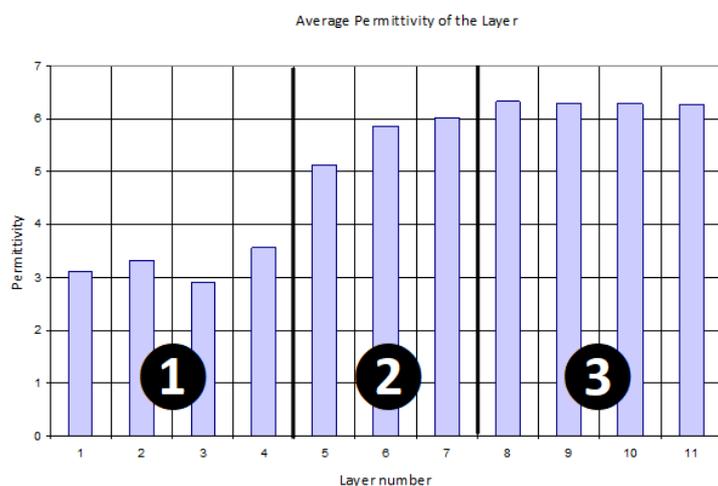


Рис. 14

С помощью графика можно проследить процесс формирования слоёв лунного грунта в пределах исследуемого диапазона глубин. График можно разделить на три части, соответствующие трём эпохам формирования лунного грунта в пределах диапазона глубин LPR исследования. На графике указаны номера частей и границы между ними. В пределах каждой части значения диэлектрической проницаемости в слоях имеют свои общие особенности.

К части 3 относятся слои наиболее старые слои глубокого залегания с номерами 8 – 11. Эти слои обладают самыми высокими значениями диэлектрической проницаемости, лежащими в пределах от 5.8 до 6.5. Разница между самым высоким и самым низким средним значением

диэлектрической проницаемости для слоёв части 3 составляет 0.05 единиц. По сравнению с частями 1 и 2 это наименьшая разница.

Далее следуют слои 5 - 7 части 2. В пределах этой части заметна тенденция к увеличению значений диэлектрической проницаемости по мере возрастания глубины залегания слоёв. Предполагается, что кровля слоёв 6 и 7 долгое время являлась поверхностью луны, бомбардируемая твёрдыми частицами из космоса, и на этой поверхности, со временем, образовался слой реголита, которому на разрезе соответствует слой 5. Разница между самым высоким и самым низким средним значением диэлектрической проницаемости для слоёв части 2 составляет 0.89 единиц.

Самые молодые слои лунного грунта принадлежат части 1, это слои с номерами 1 – 4. Слои 2 – 4 сформировались в результате вулканического извержения, продукты которого покрыли почти стометровым слоем старую поверхность луны. Верхний слой 1 состоит из мелкозернистого реголита, слой 3 представляет собой лавовую трубку, содержащую водный лёд. Разница между самым высоким и самым низким средним значением диэлектрической проницаемости для слоёв части 1 составляет 0.67 единиц.

Разница между средними значениями диэлектрической проницаемости слоёв 4 и 5, граница между которыми является границей между частями 1 и 2, составляет 1.56 единиц, а между слоями 7 и 8, которые разграничивают части 2 и 3, составляет 0.31 единиц. Это свидетельствует о том, что слои части 2 по своим свойствам ближе к слоям части 3, чем к слоям части 1.

Разрез атрибута 'Центральная частота'

На рис. 15 показан разрез центральной частоты спектра отражённых сигналов, полученный по результатам автоматизированного анализа BSEF данных лунного георадара. Визуализация разреза представлена в двух вариантах: без разделения на слои (слева) и с разделением (справа). Значения частоты внутри слоя одинаковы по всей площади слоя и равняются среднему значению центральной частоты в этом слое.

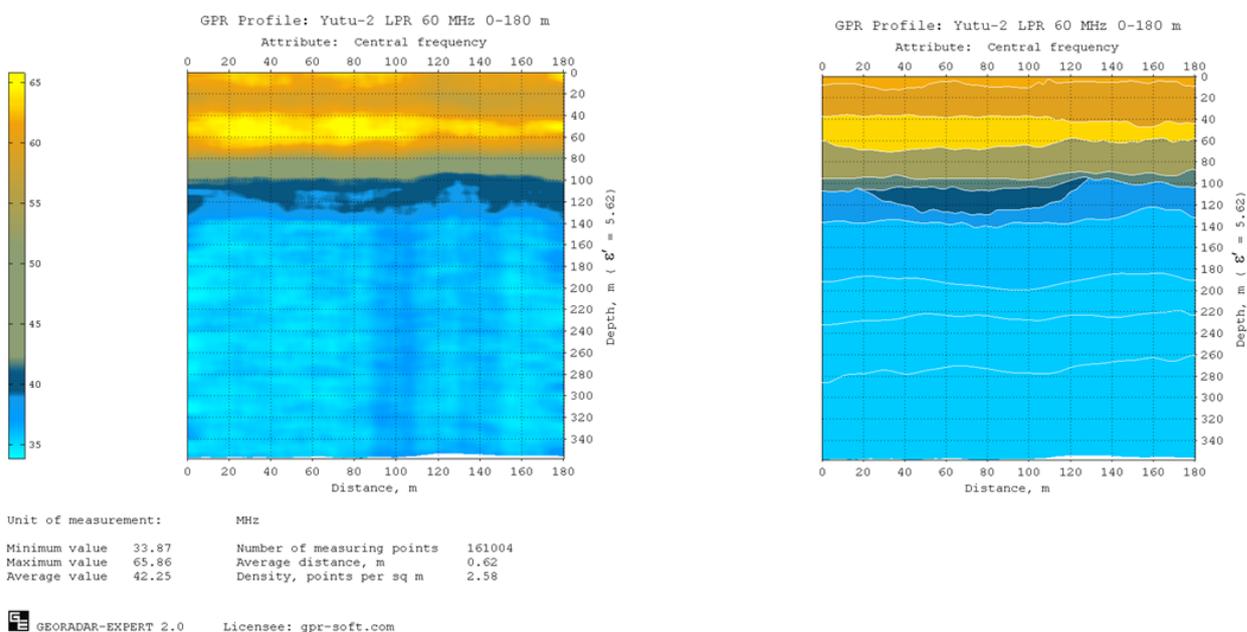


Рис. 15

С точки зрения георадиолокации, подповерхностную слоистую среду можно рассматривать как набор частотных фильтров, в котором каждый слой представляется фильтром со своими собственными частотами пропускания. По разрезу центральной частоты можно составить представление о частотных характеристиках слоёв исследуемого грунта и интерпретировать

области разреза, имеющие близкие значения частот, как слои со схожими характеристиками физико-механических свойств.

Строение разреза центральной частоты похоже на разрез диэлектрической проницаемости, из чего следует, что изменение значений диэлектрической проницаемости в лунном грунте имеет выраженный частотно зависимый характер. На рис. 16 показаны графики зависимости диэлектрической проницаемости (слева) и центральной частоты (справа) от номера слоя.

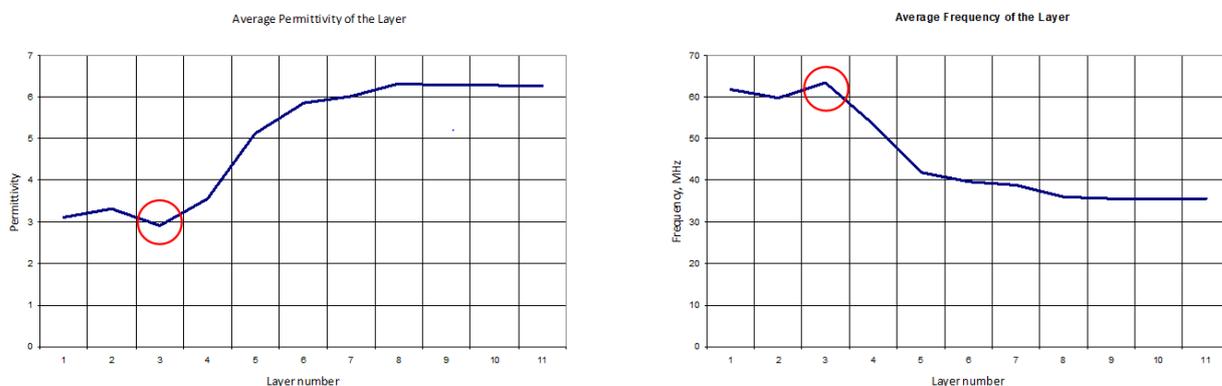


Рис. 16

Для рассматриваемого георадиолокационного профиля графики дают возможность сформулировать закон изменения значений атрибута с возрастанием номера слоя, а значит и глубины. Если пренебречь небольшими, на уровне погрешности, колебаниями значений атрибутов в слоях 8 – 11, этот закон можно сформулировать так: по мере увеличения глубины, диэлектрическая проницаемость лунного грунта возрастает, а центральная частота отражённых сигналов уменьшается.

Единственный слой, для которого этот закон нарушается - это слой 3. На графиках нарушение выделено красным цветом. Факт такого нарушения характеризует слой 3 как аномалию, не похожую по составу на другие слои лунного грунта. Это свидетельствует в пользу гипотезы, согласно которой слой 3 является лавовой трубкой.

Статистические показатели для разреза центральной частоты по слоям представлены в таб. 2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Statistics file name: Yutu-2 LPR 60 MHz 0-180 m Frequency, layers.gestat											
2	Source file name: Yutu-2 LPR 60 MHz 0-180 m.efd											
3	Attribute: Central frequency											
4	Layer name	Minimum	Maximum	Mean	Range	Standard Deviation	Coefficient of Variation	Variance	Median	MAD	IQR	PAR
5	Full area	33.87303195	65.85930228	42.2528548	31.98627033	10.45256571	0.24738129	109.2561299	36.14475623	8.818870873	11.12502244	1.558694734
6	1	58.80402012	64.3302095	61.89633026	5.526189379	1.086135622	0.017547658	1.17969059	62.24318994	0.873709053	1.284278112	0.017547658
7	2	56.50567939	62.58934649	59.78893745	6.0836671	1.229401692	0.020562361	1.511428521	59.74377526	0.998425447	1.703863388	0.020562361
8	3	60.72113504	65.85930228	63.49359252	5.138167241	0.963336963	0.015172192	0.928018105	63.52465337	0.811118536	1.500669138	0.015172192
9	4	42.76874336	62.60045132	53.59863656	19.83170797	5.789809342	0.108021579	33.52189222	53.90446596	5.127192116	10.75887247	0.108021579
10	5	39.4446761	46.15617703	41.82784862	6.711500933	0.911368978	0.021788569	0.830593414	41.59512342	0.742539839	1.305174077	0.021788569
11	6	38.79087408	41.04196476	39.61858665	2.251090677	0.454342548	0.011467914	0.206427151	39.57847607	0.378041937	0.692082614	0.011467914
12	7	37.77005833	41.19472878	39.22641386	3.424670447	0.607439947	0.015485483	0.36898329	39.13876712	0.486463896	0.806244322	0.015485483
13	8	34.24104752	38.59463809	35.94779997	4.353590573	0.724893238	0.020165163	0.525470206	35.81317561	0.556549283	0.843326891	0.020165163
14	9	33.93610732	37.23242181	35.48505463	3.296314491	0.571268839	0.016098858	0.326348086	35.39735521	0.458122042	0.766636579	0.016098858
15	10	33.87303195	37.24722301	35.49025744	3.374191059	0.547462305	0.015425707	0.299714976	35.38790599	0.425574966	0.655928535	0.015425707
16	11	33.93143569	37.95654505	35.61569723	4.025109357	0.579935435	0.016283141	0.336325109	35.48496465	0.466456009	0.752754551	0.016283141
17	Note:											
18	MAD means the mean absolute deviation											
19	IQR means the interquartile range											
20	PAR means the peak to average ratio											

Таб. 2

Как и для разреза диэлектрической проницаемости, разница между средними значениями частоты для слоёв 4 и 5 больше, чем для слоёв 7 и 8. Эти значения составляют 11.8 и 3 МГц соответственно. Таким образом, подтверждается вывод, сделанный на основе анализа разреза диэлектрической проницаемости о том, что слои части 2 по своим свойствам ближе к слоям части 3, чем к слоям части 1 (см. рис. 14).

Разрез атрибута Q-factor

Наиболее ярко отличие слоя 3 от других слоёв проявляется на разрезе атрибута Q-factor, значения которого вычисляются по формуле, приведённой в статье *John H. Bradford, Boise State University, 'Frequency-dependent attenuation analysis of ground-penetrating radar data', GEOPHYSICS, VOL. 72, NO. 3 MAY-JUNE 2007; P.J7-J16*. На рис. 17 показаны разрез атрибута Q-factor и график средних значений Q-factor по слоям.

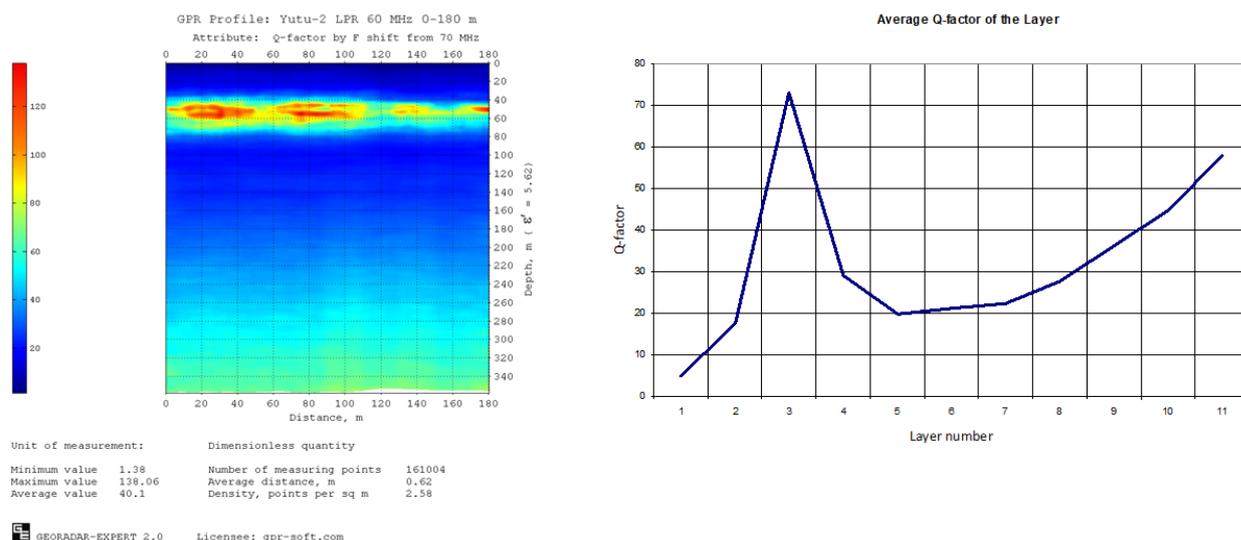


Рис. 17

Разрез Q-factor и график показывают, что на фоне плавного увеличения значений атрибута Q-factor по мере возрастания глубины, слой 3 резко выделяется на разрезе своими аномально высокими значениями атрибута. Это свидетельствует о значительном отличии свойств слоя 3 от свойств других слоёв разреза. Как и в случае с диэлектрической проницаемостью и центральной частотой, этот факт свидетельствует в пользу гипотезы образования слоя 3 в качестве лавовой трубки. Статистические показатели по слоям для разреза Q-factor показаны в таб. 3.

Layer name	Minimum	Maximum	Mean	Range	Standard Deviation	Coefficient of Variation	Variance	Median	MAD	IQR	FAR
Full area	1.376743974	138.0599675	40.09901289	136.6832235	19.49956493	0.48628541	380.2330324	37.96999974	15.83757718	29.34349061	3.442976712
1	1.376743974	13.30720888	4.858512963	11.93046491	2.796457372	0.575578864	7.820173832	4.032739779	2.320931193	4.15592997	0.575578864
2	3.213700351	49.64444378	17.66983185	46.43074343	8.251365225	0.466974745	68.08502807	15.01928835	6.680911238	11.11111016	0.466974745
3	34.79209606	138.0599675	72.98257215	103.2678715	19.65820224	0.269354747	386.4449153	70.40474128	16.27240693	28.75298888	0.269354747
4	19.66634924	51.31074425	29.06509434	31.64439501	7.311955436	0.251571708	53.4646923	26.94043371	6.125197371	11.33332698	0.251571708
5	18.08473405	21.97065361	19.67713304	3.885919556	0.544825222	0.027688242	0.296834523	19.6412405	0.416027849	0.669056748	0.027688242
6	17.99219003	24.55572072	21.07939771	6.563530695	1.356252682	0.064340201	1.839421336	20.73006016	1.169442003	2.042276576	0.064340201
7	17.98323936	25.43965542	22.32599516	7.456416067	1.672201335	0.074899297	2.796257305	22.69050151	1.388857009	2.577846099	0.074899297
8	21.82017728	36.77415533	27.73268751	14.95397805	3.327538924	0.119986169	11.07251529	27.51931369	2.840806198	5.462671536	0.119986169
9	30.64224918	43.75405479	36.32794097	13.11180561	2.54774404	0.070131804	6.490999691	36.28383295	2.120246546	3.87562286	0.070131804
10	37.36494261	54.21220251	44.67537555	16.8472599	3.235217089	0.072416114	10.46662961	44.55208777	2.647549394	4.596316566	0.072416114
11	45.80848771	74.60325575	57.98119616	28.79476804	5.473224079	0.094396536	29.95618182	57.68396216	4.641118999	8.965604764	0.094396536

Note:
18 MAD means the mean absolute deviation
19 IQR means the interquartile range
20 FAR means the peak to average ratio

Таб. 3

Как и для разрезов диэлектрической проницаемости и центральной частоты, разница между средними значениями Q-factor для слоёв 4 и 5 больше, чем для слоёв 7 и 8. Эти значения составляют 9.4 и 5.4 единиц соответственно. Таким образом, подтверждается вывод, сделанный на основе анализа разреза диэлектрической проницаемости и центральной частоты о том, что слои части 2 по своим свойствам ближе к слоям части 3, чем к слоям части 1 (см. Рис. 14). *Распределение значений атрибутов внутри слоя 3*

На рис. 18 показан график распределения средних значений атрибута Q-factor внутри слоя 3 по латерали.

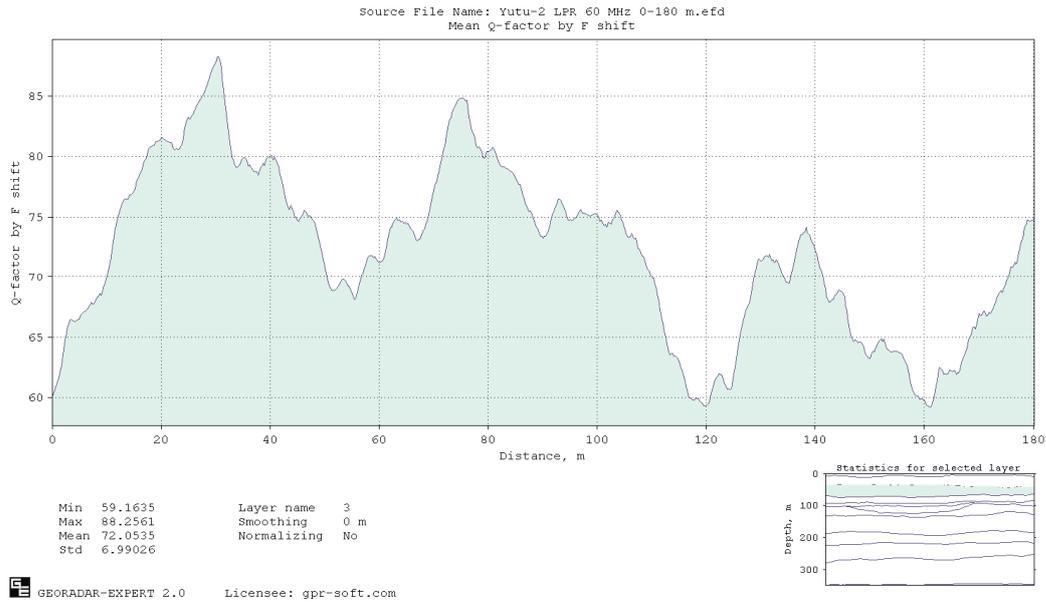


Рис. 18

График показывает волнообразный характер изменения атрибута Q-factor, наиболее высокие значения атрибута находятся на пикетах 30.8 и 75.3 м от начала профиля. На те же пикеты приходятся самые низкие значения диэлектрической проницаемости и самые высокие значения центральной частоты – см. представленные на рис. 19 и рис. 20 аналогичные графики для диэлектрической проницаемости и частоты.

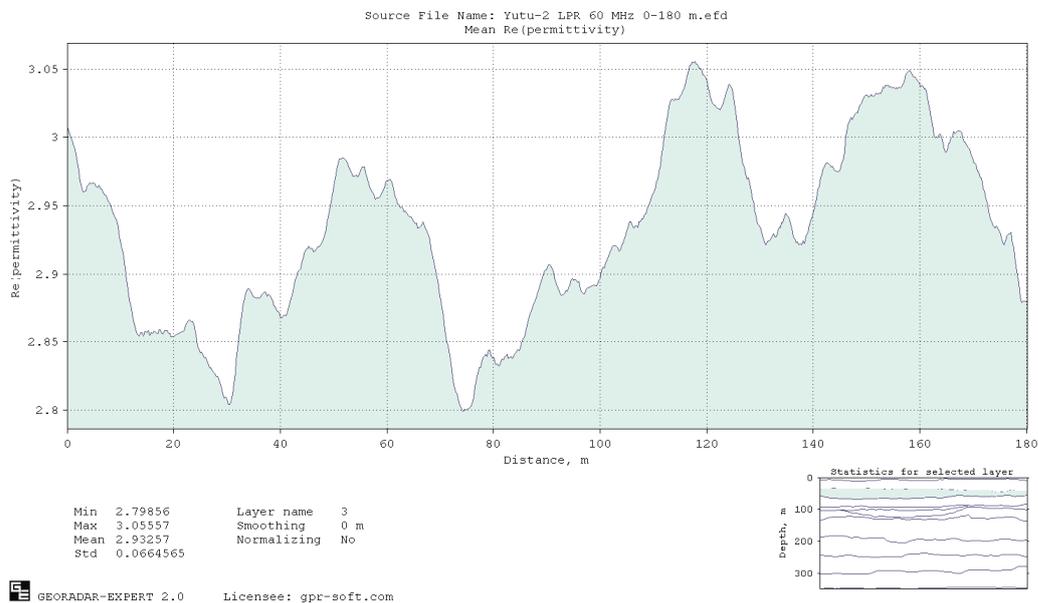


Рис. 19

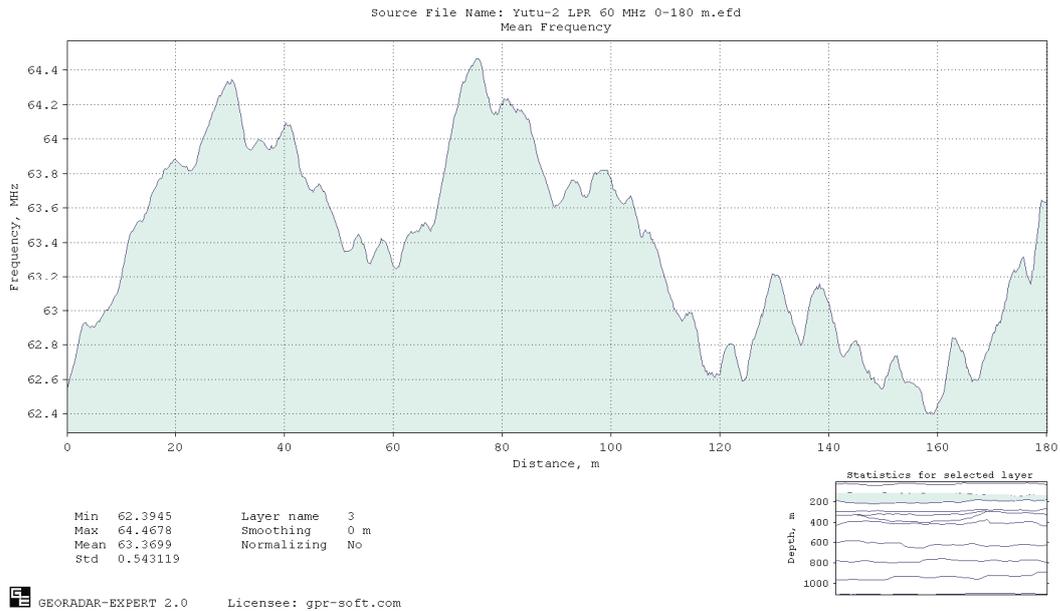


Рис. 20

Волнообразный характер изменения значений атрибутов в слое 3 обусловлен волнообразным характером изменений характеристик вещества, заполняющего слой 3. Причиной этому может быть пульсирующий характер вулканического извержения, в процессе которого сформировался слой 3. Если придерживаться предположения, что слой 3 является лавовой трубкой, заполненной водным льдом, то вышеприведённые графики могут отражать концентрацию чистого льда в лавовой трубке. Таким образом, чем ниже значение диэлектрической проницаемости и выше значения центральной частоты и Q-factor, тем больше льда без примесей содержится в лавовой трубке. Опираясь на это предположение, можно сказать, что на отметках 30.8 и 75.3 м от начала профиля концентрация чистого льда максимальна.

Выводы

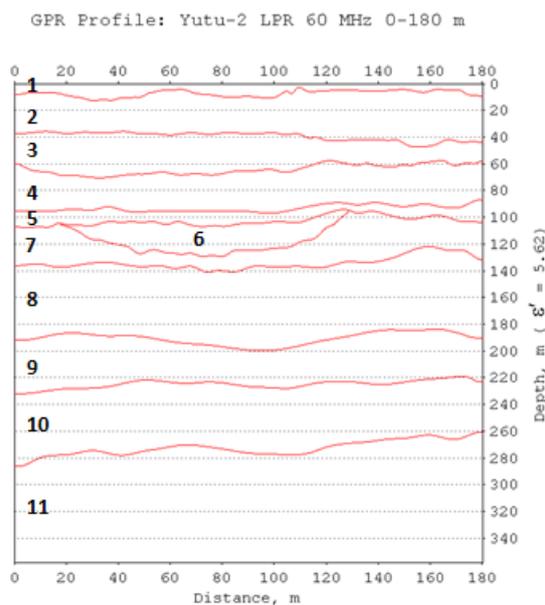


Рис. 21

В результате обработки данных LPR профилирования, представленных в настоящей публикации, были выявлены следующие особенности строения лунного разреза:

1. Лунный грунт в исследуемом диапазоне глубин состоит из 11 слоёв, каждый из которых в той или иной степени отличается по своим электрофизическим характеристикам от других слоёв. Чем больше разница в средних значениях атрибута слоя, тем сильнее эти отличия. Схема расположения слоёв с нумерацией в порядке возрастания глубины залегания слоёв представлена на рис. 21.

Средние значения положения границ слоёв лунного грунта, их толщина и площадь, занимаемая на разрезе показана в таб. 4.

	A	B	C	D	E
1	Summary Layers Table				
2	Profile name: Yutu-2 LPR 60 MHz 0-180 m - layers table				
3	Average values				
4	Layer Number	Top, m	Bottom, m	Thickness, m	Area, sq.m
5	1	0	7.75	7.75	1396.86
6	2	7.75	39.774	32.025	5772.46
7	3	39.774	64.577	24.802	4470.64
8	4	64.577	93.678	29.102	5245.59
9	5	93.678	103.118	9.439	1701.39
10	6	103.924	120.629	16.705	1854.27
11	7	113.405	134.587	21.182	3818.01
12	8	134.587	191.053	56.467	10178.16
13	9	191.053	225.184	34.131	6152.1
14	10	225.184	272.956	47.771	8610.79
15	11	272.956	357.027	84.072	15153.91

Таб. 4

2. Выявлены закономерности изменения значений атрибутов с увеличением глубины. Это возрастание значений диэлектрической проницаемости и Q-factor, и уменьшение значений центральной частоты. Эти закономерности не выполняются для слоя 3.

3. Разрез в пределах слоя 3 обладает наименьшими значениями диэлектрической проницаемости и наибольшими значениями частоты и Q-factor. В таб. 5 представлены минимальные, максимальные и средние значения положения кровли и подошвы слоя 3 по глубине в метрах, а также толщины слоя.

	A	B	C	D
1	Lay 3	Top, m	Bottom, m	Thickness, m
2	Min	36.085	57.964	11.633
3	Max	47.79	70.758	33.655
4	Mean	39.774	64.577	24.802

Таб. 5

Тот факт, что для слоя 3 не выполняются закономерности изменения значений атрибутов с возрастанием глубины свидетельствует о том, что данный слой по своему составу не относится к основным лунным грунтам – базальтам или реголиту. Принимая во внимание низкие значения диэлектрической проницаемости, предполагается, что этот слой является лавовой трубкой, заполненной водным льдом. Внутри такой лавовой трубки может быть помещена лунная база, которая будет надёжно укрыта от воздействия космического излучения, попадания твёрдых частиц из космоса и перепада температур. Наличие водного льда в лавовой трубке поможет решить проблему жизнеобеспечения лунной базы.

4. На глубине около 100 м обнаружен слой, имеющий чашеобразную форму, напоминающую углубление, возникшее от ударного воздействия при столкновении небесного тела с поверхностью Луны. На схеме слоёв этому слою присвоен номер 6. В таб. 6 представлены минимальные, максимальные и средние значения положения кровли и подошвы слоя 6 по глубине в метрах, а также толщины слоя.

	A	B	C	D
1	Lay 6	Top, m	Bottom, m	Thickness, m
2	Min	94.492	95.81	0.84
3	Max	107.23	129.505	24.431
4	Mean	103.924	120.629	16.705
5	Sectional area of layer: 1854.27 sq. m.			

Таб. 6

Слой 6 располагается в толще слоя 7, кровли слоёв 6 и 7 залегают на одном уровне. Если считать, что слой 6 сформировался в результате ударного воздействия небесного тела, то можно сделать вывод, что кровли слоёв 6 и 7 долгое время являлись поверхностью луны. Со временем, в результате бомбардировки этой поверхности твёрдыми частицами и воздействия космического излучения, на поверхности образовался слой реголита толщиной около 10 метров. На схеме слоёв этому слою присвоен номер 5. Далее, в результате извержения, эта поверхность была покрыта слоями вулканических выбросов толщиной около 100 метров.

Заключение

Применение метода георадиолокации для исследования строения лунного грунта позволило получить уникальные данные в хорошем разрешении. Важной задачей является выделение из этих данных как можно большего объёма полезной информации. Классический подход к обработке георадарных данных, заключающийся в очистке от помех полезных сигналов, выявлении границ слоёв и определение диэлектрической проницаемости по дифрагированным отражениям, не обеспечивает всей полноты информации о подповерхностной среде. На основании представленных в данной публикации результатов обработки LPR данных можно сделать вывод, что алгоритмы и методы, реализованные в программном комплексе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ, в достаточной степени справляются с задачей повышения информативности георадиолокационного исследования.

Возможность получения наглядного представления о строении подповерхностной среды и её особенностях в форме разрезов атрибутов, статистических таблиц и графиков, обуславливает дальнейшее применение программного комплекса ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ для обработки результатов георадиолокационного профилирования не только Луны, но и Марса, на поверхность которого в мае 2021 года доставлен китайский марсоход Чжужун, оборудованный георадаром.

...

Архив, содержащий изображения разрезов и электронные таблицы, использованные в данной публикации, а также результат экспорта обработанного LPR профиля в формат ASCII, можно скачать по следующей ссылке: https://gpr-soft.com/download/ge_lpr_original.zip

Автор статьи: Денисов Р.Р., руководитель проекта ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ

Электронная почта: georadar@mail.ru

Сайт: www.georadar-expert.ru