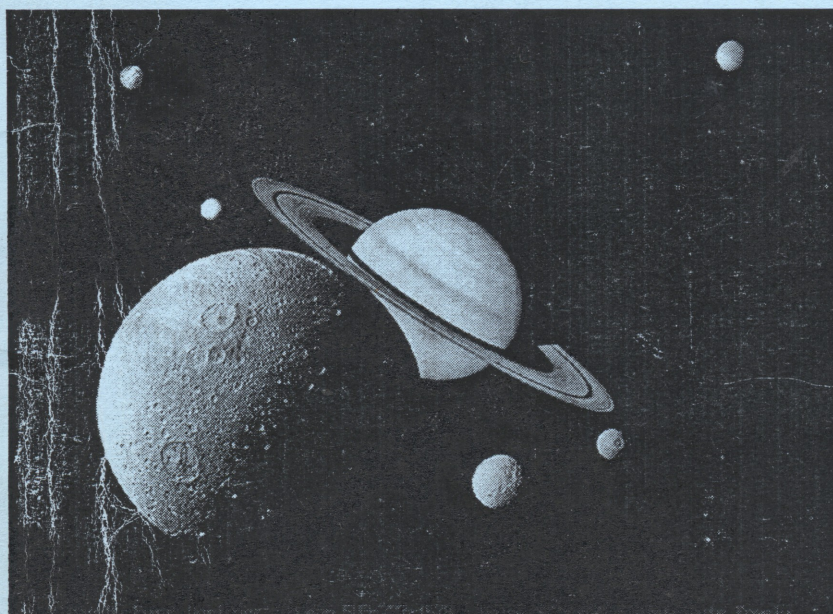


Міністерство освіти і науки України
Миколаївська астрономічна обсерваторія



**ЗАСТОСУВАННЯ ПЗЗ-МЕТОДІВ
ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТІЛ
СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ**

the natural hazards exceed US \$50 million out of which the major part is accounted from this region. The death toll could be significantly reduced by introduction of better warning and predict systems based on space geodetic techniques

Organization:

The APSG organization has been structured to facilitate personnel.

Excute commission consists of China, Japan, USA, Australia, Russia and Indonesia and after selection prof. Ye is the chairman of commission. Secretariat is set up at Shanghai Observatory.

Techniques working group:

Tech	Convener	Country
GPS	R.Neilan	JPL, USA
SLR	J.Manning	Australia
VLBI	T.Yoshino	CRL, Japan
Gravity	H.Hsu	China
SAR	M.Baltuck	NASA, USA

Scientific programm:

* SRG 1 Crustal motion and dynamics of the Tibetan plateau (Convener Z. Ma China)

* SRG 2 Crustal tectonic motion of western pacific volcanic-seismic belt (Convener: Yehuda Bock, SIO)

* SRG 3 The impact of sea level variation on the Asia-Pacific region (Convener: T.S. Murty, National Tidal facility, the Flinders University of South Australia)

* * *

Игнатъев М.Б. Государственный университет аэрокосмического приборостроения

Пинигин Г.И. Николаевская астрономическая обсерватория

АСТРОНОМИЯ С ЛУННОЙ БАЗЫ

Возрождение интереса к Луне связано с развитием космонавтики и необходимостью освоения лунной поверхности для решения различных проблем земной цивилизации (истощение запаса жизненно необходимых природных ресурсов на Земле, загрязнение Земли экологически опасными производствами, поиск альтернативных источников сырья и энергии), наконец, стремлением астрономов вынести телескопы за атмосферу на устойчивую поверхность Луны.

Крупнейшие космические агентства последние 10–15 лет ведут активные исследования в этой области. Так NASA – Национальное космическое агентство США в рамках провозглашенной президентом Дж. Бушем Космической исследовательской программы (Space Exploration Initiative) начало с 1989 года разработку проекта освоения Луны путем создания обитаемой лунной обсерватории; подготовлена и обсуждается первоочередная серия из пяти крупных астрономических проектов телескопов для

Луны [1,2]; высказывается целесообразность международной кооперации в лунной программе. ESA – Европейское космическое агентство в 1990-е годы разрабатывает многоэтапную программу освоения Луны. В частности, по программе “Еurocoop 2000” планируется экспедиция на южный полюс Луны с посадкой в кратере Кеплера [3,4,5]. NASDA – Национальное космическое агентство Японии планирует, начиная с 2003 года несколько экспедиций по программе освоения Луны – SELENE, PILOT и др. [6].

Анализируя предложения указанных космических агентств, а также другие разработки, можно выделить несколько первоочередных и перспективных проектов телескопов для выполнения астрономических исследований с Луны в разных областях астрономии: 1) оптическая астрономия (LLT, LTT), 2) лунная оптическая интерферометрия (LOI, LOVLA, LSI), 3) радиоастрономия, включая радиоинтерферометрию со сверхдлинными базами (VLBI, VLF) [1-8].

При разработке и выборе известных лунных астрономических проектов принимались за основу следующие критерии (например, в ESA):

- действительно ли реализация данного проекта даст уникальные результаты?
- нет ли у данного проекта других альтернатив?
- может ли данный проект быть реализованным при существующих технологиях или в ближайшем будущем?

1. Особенности астрономических наблюдений на Луне

Луна является весьма подходящим местом для проведения астрономических исследований:

- отсутствие атмосферы и ионосферы позволяет вести наблюдения по всей ширине спектра излучения небесных объектов; можно достичь высокого качества изображений, определяемого дифракционным пределом; в наблюдениях полностью отсутствует влияние рефракции;
- при малом ускорении силы тяжести (в 6 раз меньше земного) и низкой сейсмической активности Луны на ее поверхности можно устанавливать телескопы значительных размеров при их минимальных механических деформациях;
- медленное вращение Луны вокруг своей оси (звездные сутки на Луне составляют 27.3 земных суток) обеспечивает длительные наблюдения объектов (до 14-ти суток);
- возможность экранирования телескопа от солнечного излучения обеспечивает минимальные термические деформации (кратеры в полярных областях обеспечивают постоянную затененность);
- экранирование от земных помех (в радиодиапазоне) при расположении телескопа на обратной стороне Луны создает благоприятные условия для радиоастрономических исследований;
- положение Луны в пространстве по двум координатам может быть известно с высокой точностью на любой заданный момент времени;

Однако следует учитывать и особенности Луны, создающие трудности при проведении наблюдений:

- возможность пылевого загрязнения естественного (падение метеоритов) и искусственного (прилунение КА, транспорт, человеческая деятельность) происхождения;

- влияние микрометеоритов (возможно появление около 100 кратеров диаметром не менее 0.05 мм на площади 1 кв. метр за год);

- большой температурный перепад на поверхности Луны (от +160°C днем до -170°C ночью), исключая полярные области;

- по сравнению с космическими аппаратами из одного пункта на Луне невозможен обзор всей небесной сферы (необходимо иметь минимум две обсерватории);

- высокая стоимость проведения астрономических исследований с Луны по сравнению с космическими аппаратами на околоземных орбитах.

2. Оптическая астрономия

Малое ускорение силы тяжести на Луне позволяет создавать и использовать телескопы гораздо больших размеров, чем на Земле. Учитывая возможность получения на Луне высокого качества изображений, определяемых дифракционным пределом, представляется реальной установка на Луне полноапертурного телескопа с зеркалом диаметром 16 метров, работающего в диапазоне длин волн 0.1–10 микрон (мкм). Проект телескопа LLT (Lunar Large optical Telescope) предложен NASA и включает первичное зеркало, составленное из отдельных элементов с активным контролем их положения (адаптивная оптика). Первоначально телескоп может быть собран и использован на околоземной орбите с диаметром зеркала 4–5 метров. Сборка зеркала на Луне из отдельных фрагментов может выполняться поэтапно – от 8 метров, с последующим увеличением в диаметре до 16 метров. Задачи телескопа LLT аналогичны задачам, сформулированным для космического телескопа Хаббла (HST): исследование структуры нашей и других галактик; изучение масс и эволюции звезд и их скоплений; изучение Солнечной системы, а также обнаружение и изучение новых планетных систем; изучение квазизвездных объектов и ядер галактик; уточнение шкалы расстояний и пространственной системы координат и др. [1,7].

На начальных этапах освоения Луны предлагается установить на лунной обсерватории относительно простые и меньших размеров инструменты, работающие в автоматическом режиме с удаленным доступом. Лунный пассажный телескоп (Lunar Transit Telescope) с зеркалом диаметром 1-2 метра и полем зрения в один квадратный градус устанавливается неподвижно на зенитную область небесной сферы [1,8]. За счет вращения Луны посредством ЛТТ можно наблюдать объекты в полосе с шириной, равной диаметру поля зрения телескопа. ЛТТ работает в диапазоне длин волн 0.1–10 мкм, угловым разрешением до 0.3 миллисекунды и с регистрацией посредством мозаики ПЗС-матриц. Из-за высокой устойчивости такого телескопа его предлагают использовать для глубокого обзора избранных участ-

ков небесной сферы. В частности, для изучения эффектов гравитационного смещения лучей света звезд при прохождении около объектов с большой массой — отсюда возможность обнаружения темной материи вокруг скопленных галактик.

Если же телескоп типа ЛТТ снабдить вращением хотя бы вокруг одной оси и смещать его поле зрения по высоте, то в режиме прохождения можно выполнять дифференциальные астрометрические обзоры больших участков небесной сферы с уровнем точности, порядка 0.1 миллисекунды [9].

3. Лунная интерферометрия

Значительные преимущества обещает использование на Луне интерферометров, работающих в ультрафиолетовом (0.1–0.35 мкм), видимом, оптическом (0.4–1.0 мкм), инфракрасном (1.0–10 мкм) и субмиллиметровом (30–300 мкм) диапазонах длин волн. Дело в том, что в наземных условиях интерферометрия в этих участках спектра чрезвычайно затруднена влиянием поглощения атмосферы, а также ее турбулентцией. Последнее не позволяет получать дифракционные изображения небесных объектов, поскольку нарушается атмосферная фазовая стабильность и таким образом не соблюдаются условия когерентности света. Техника адаптивной оптики и спекл-интерферометрия в наземных условиях отчасти устраняют влияние атмосферы, но лишь до определенных пределов точности, порядка 0.01 при использовании сплошных зеркал диаметром 8–10 метров, или до 0.1 м/сек при базе интерферометра 1 км (ожидаемая предельная точность). При отсутствии атмосферы на Луне все указанные препятствия отсутствуют и исследования в участках спектра от ультрафиолета до субмиллиметрового признаны первоочередными для лунной астрономии.

На первом этапе большие шансы на осуществление имеет оптический интерферометр (LOI - Lunar optical interferometer): спектральный диапазон 0.1–10 мкм, диаметр зеркал около одного метра [1,2]. Схема интерферометра включает минимум три телескопа, расположенных на концах Y-образной базы, протяженностью от одного до нескольких километров. Посредством такого инструмента можно наблюдать отдельные объекты до 20-й звездной величины с недостижимой на Земле точностью, около одной угловой микросекунды ($0.000001 = \text{мксек}$). Телескоп LOI предназначен для решения задач астрометрии малых полей — определение собственных движений звезд относительно внегалактических опорных объектов — квазаров, уточнение внегалактической шкалы расстояний, изучение динамики и структуры двойных и кратных звездных систем, ближайших галактик, поиск и изучение планетоподобных (типа Юпитера) объектов, проверку общей теории относительности и др.

Для решения астрофизических задач в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах предназначен интерферометр LOVLA — Lunar Optical Very Large Array [10,11]. В его конструкцию входит более 30 отдельных телескопов-зеркал, диаметром 1.5 метра, расположенных по эллиптическому кольцу диаметром более 100 метров и являющимся горизонтальным сече-

нием сплошного зеркала в форме параболоида вращения. Такого рода аналогичные телескопы переменного профиля уже реализованы на Земле – пулковский БПР (диаметр 120 метров), РАТАН-600 (диаметр 600 метров). При наведении LOVLA на разные объекты, а также из-за вращения Луны размеры эллипса изменяются, поэтому отдельные телескопы снабжены системой индивидуального перемещения с лазерным контролем положения, до 1 мкм. В фокусе всей оптической системы расположен центральный зеркальный телескоп-коллектор. В отличие от LOI-интерферометра астрометрического профиля где требуется максимально высокое угловое разрешение, интерферометр LOVLA предназначен для решения задач, где требуются изображения наблюдаемых объектов. В этом случае используется система апертурного синтеза, когда путем комбинации сигналов от каждого отдельного мобильного телескопа получается заполненная апертура эквивалентного параболоида вращения с диаметром, равным базе интерферометра.

Возможности LOVLA как интерферометра изображений (яркость наблюдаемых объектов 17–20 звездных величин, угловое разрешение 1–0.001 mas) обеспечивают прямые наблюдения тел Солнечной и других планетных систем, изучение вопросов происхождения и формирования планетных систем, изучение поверхности и оболочек звезд (уровень углового разрешения грануляции пятен 5–10 мсек, протяженных объектов около 1 mas), структуры пульсаров и эффекта аккреции вокруг отдельных объектов (достаточно разрешения в несколько мсек), структуры активных галактик с разрешением их ядер, квазаров (уровень разрешения 0.1–30 мсек), наконец, поиск темной материи путем изучения дифракционных эффектов от гравитационного линзирования, открытие гравитационных волн (величина эффекта от одной мсек до одной мсек) – что позволит понять распределение массы и структуры ранней Вселенной [3].

Интерферометр в субмиллиметровом диапазоне (LSI - Lunar Submillimeter Interferometer) отличается принципиально от LOI лишь диапазоном длин волн, но используемая регистрирующая техника существенно отличается от аналогичной для оптического диапазона [1,2]. Интерферометр LSI включает 12 телескопов-антенн диаметром 4–5 метров, расположенных на Y-образной километровой базе (в перспективе несколько десятков км). Угловое разрешение такой системы должно быть 1–10 mas, что требует использования гетеродинов самого высокого качества.

Основными задачами субмиллиметровой лунной астрономии является изучение распределения молекул в атмосферах тел Солнечной системы (достаточно углового разрешения на уровне 1"), изучение структуры молекулярных облаков и звездоформирующих областей в межзвездном пространстве нашей галактики, исследования в области внегалактической астрономии (появление молодых галактик, происхождение протогалактик и пр.)

4. Радиоастрономия, включая VLBI

В области радиоастрономии с Луны открываются возможности иссле-

дования очень низкочастотных излучений (VLF - Very Low Frequency) космических объектов, не проходящих через земную атмосферу (декаметровый и километровый диапазоны – от 10 метров до 3 км) из-за поглощения ионосферой Земли [1,2,3]. Представляет большой интерес исследование излучения магнитосферы Земли и планет-гигантов (Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна); галактического фона, спиральных рукавов нашей и других галактик; солнечных вспышек и их проявлений в межпланетной среде. По проекту NASA предлагается разместить радиointерферометр VLF на обратной стороне Луны в кратере Циолковского с расположением 19 антенн вдоль 70 км базы (впоследствии, около 100 антенн вдоль 200 км базы) T-образной конфигурации и расположением коррелятора сигналов на центральном пике кратера. Угловое разрешение такого инструмента лимитируется межпланетным и межзвездным рассеиванием и должно быть на уровне от нескольких градусов до десятков минут при длине базы от одного до сотен километров.

Весьма привлекательна Луна и для размещения на ней радиотелескопа, работающего совместно с наземным по схеме радиointерферометра со сверхдлинной базой (VLBI) [12]. В этом случае реализуется база рекордной длины, до 400 тысяч километров. Поскольку длина базы Земля-Луна может быть определена с точностью до 2–3 миллиметров, возможны координатные определения положений радиосточников, например, для международной опорной системы координат (ICRF) с микросекундной точностью, что на три порядка выше существующей наземной точности; уточнение собственных движений галактик и квазаров, параллакс отдельных радиозвезд. Более того, посредством радиointерферометра Земля-Луна можно построить трехмерную структуру достаточно ярких радиосточников на расстоянии до 100 килопарсек.

На более отдаленную перспективу рассчитан проект создания радиотелескопа со сплошным зеркалом диаметром 1 км, расположенным неподвижно в лунном кратере правильной формы, на обратной стороне Луны конструкции, подобной наземному, неподвижному (с электронной сканирующей диаграммой) радиотелескопу Аресибо в Пуэрто-Рико (диаметр 300м) [3].

5. Расположение астрономических обсерваторий на Луне

Выбор места расположения лунной обсерватории (ЛО) для астрономических наблюдений и других научных исследований определяется рядом факторов [7].

Прежде всего ЛО должна располагаться достаточно близко к лунной базе, чтобы использовать ее инфраструктуру, в которую входят: энергопитание, транспортировка грузов с Земли на Луну и их перевозка по поверхности Луны, связь, оборудование, жизнеобеспечение и пр. Потребности ЛО должны быть сопоставимы с возможностями лунной базы [13]. Для выполнения астрономических наблюдений критерии выбора места расположения ЛО достаточно жесткие и зачастую противоположные для разных областей астрономии.

Для наблюдения как можно большей части небесной сферы ЛО необходимо располагать по широте на лунном экваторе. А ее размещение в зоне 5-10 градусов по долготе рядом с лимбом, когда изображение Земли находится близко к лунному горизонту, существенно ослабляет влияние излучения около 300°K на телескоп. ЛО должна находиться на удалении по крайней мере нескольких километров от лунной базы для избежания влияния пыли, освещения и вибраций на астрономические наблюдения. Необходимо также размещать ЛО на ровной площадке для осуществления взаимного визирования телескопов в случае использования схемы интерферометра с базой – в оптическом диапазоне до нескольких километров, в радиодиапазоне до 100-200 километров. Реально для больших расстояний необходимо использовать плоские поверхности кратеров.

Большой интерес, особенно для диапазона VLF и в целом для радиоастрономии представляет расположение ЛО на обратной стороне Луны. В этом случае телескопы полностью экранированы от разного вида электромагнитных излучений Земли. В этом смысле обратная сторона Луны является уникальным местом во всей внутренней Солнечной системе для радиоастрономических исследований. При использовании схемы радиоинтерферометра с базой до 200 км рационально использовать поверхности лунных кратеров.

Имеет существенное преимущество и расположение ЛО в полярных областях [14]. В этом случае размещение телескопов в постоянной тени кратеров создает стабильный температурный режим пассивного охлаждения, порядка 40°K. Это особенно важно для исследований в области инфракрасной/субмиллиметровой астрономии. Кроме того, по последним данным в полярных областях обнаружены запасы водяного льда, что представляет дополнительный интерес для создания там лунной базы. В качестве подходящих кратеров могут быть: кратер Амундсена, диаметром около 100 км на расстоянии 150 км от южного полюса, кратер Кеплера и др.

Особое значение имеет Луна для размещения на ней телескопов, предназначенных для раннего обнаружения и сопровождения астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Наземные оптические средства дают возможность регистрировать АСЗ с диаметром более 1 км, что позволяет их обнаружить на расстояниях менее 1 а.е. как объекты 20-й звездной величины. Представляющие опасность АСЗ размером 100 м – 1 км можно обнаружить заранее, на расстояниях до нескольких а.е. посредством телескопов, расположенных на поверхности Луны. Каталогизация таких малоразмерных АСЗ численностью до 300 тысяч объектов представляет большое значение, поскольку столкновение любого из них с Землей – это реальная угроза человечеству. Раннее обнаружение АСЗ с Луны позволит осуществить необходимые мероприятия (мобилизационные планы) по предотвращению возможной астероидной опасности. В программах космических агентств, например, японской NASDA присутствуют проекты размещения на Луне телескопов с целью проведения регулярных наблюдений и изучения движения известных астероидов для уточнения их орбит и условий сближения

их с Землей, также для поиска других АСЗ и изучения эволюции их орбит [15].

В общем, для астрономического мониторинга всей небесной сферы с поверхности Луны необходимо иметь две ЛО, расположенные в северной и южной полярных областях, либо одну ЛО на экваторе. Оба варианта имеют свои преимущества, но если учесть дополнительные требования еще и для осуществления мониторинга Солнца, Земли, решения задач планетной (астероидной) астрономии и других научных проблем, приходим к варианту нескольких ЛО, расположенных в полярных областях, на экваторе, видимой и обратной сторонах Луны.

Заключение

В целом Луну можно считать идеальным местом для решения многих современных и будущих астрономических программ. Реализация этих программ связана с созданием на Луне долговременной базы, обеспечивающей работу обсерватории, оснащенной астрономическими инструментами.

С общих позиций, Луна является закономерным, неизбежным этапом освоения человечеством космического пространства. Динамика этого процесса определяется уровнем развития земной цивилизации, ее научного и технологического уровня. Прогнозы показывают, что начальная стадия освоения Луны автоматическими устройствами-роботами может быть реализована в ближайшие 10–15 лет. Дальнейшее расширение работ на Луне и создание обитаемой лунной базы (или баз) по широкому диапазону исследования Луны, с Луны и на Луне (Science of the Moon, from the Moon, on the Moon – [3]) просматривается в перспективе ближайших 50–100 лет.

Литература.

1. *Stachnik, R.V., Kaplan, M.C.* // NASA'S Future Plans for Lunar Astronomy and Astrophysics, Adv. Space Res. – Vol.14. – No.6. – PP.245 – 251.
2. *Sounders, R.S., Pilcher, C.B., Kaplan, M.S. and McLaughlin, W.T.* // The Moon as an Observational Platform for Astronomy - Long Term Strategy for a Return to the Moon", IAF-95-Q.2.05, 46th International Astronautical Conference, Oslo, Norway.
3. Mission to the Moon. Europa's Priorities for the Scientific Exploration and Utilisation of the Moon, (1992), ESA SP-1150, European Space Agency, Noordwijk. – PP. 1–190.
4. *Sallaberger, C. and Kassing, D.* // Robotic Technology Assessment in Support of European Moon Mission Studies. – Adv. Space Res. – Vol.18. – No.11. – pp.131-137.
5. *Foing, B.H.* (1996), ESA Lunar Study: Precursor Astronomy Missions to the Moon", Adv. Space Res. – Vol.18ю – No.11. – PP.43-44.
6. *Kaifu, N.* (1997), "Steps toward the moon-based Astronomy Planning