

спостережень на поверхні Місяця. Низькочастотні дослідження різноманітних типів сонячного радіовипромінювання (сплески II, III, IV типів, файбер-сплески, дрейфуючі пари) дозволяють проводити дослідження плазми на висотах, недосяжних для інших методів ($4 \dots 6 R_S$) та дозволяють вивчати такі джерела випромінювання, як промені високоенергетичних частинок, ударні хвилі та корональні викиди мас (КВМ). Наприклад, з'являється можливість спостереження корональних арок, що досягають цих висот. Температура плазми у таких арках була знайдена шляхом аналізу часової затримки у радіовипромінюванні першої та другої гармонік U-сплеску (на частотах 25 та 50 МГц відповідно) при спостереженнях на радіотелескопі ГУРТ [2]. Актуальним науковим питанням залишається джерело сплесків IV типу. Зараз розглядаються дві можливі версії: КВМ, які можуть викликати перебої у глобальних мережах живлення та комунікацій на Землі, або високі корональні арки, що не становлять загрози для людства. У останньому випадку очікується, що тонка структура сплесків IV типу буде подібною до U- або J-сплесків. Через великі розміри цих арок випромінювання відбувається на низькій частоті та з малою інтенсивністю, що робить неможливим спостереження цих U- та J-сплесків за допомогою наземних радіотелескопів через іоносферну межу та/або сильні низькочастотні радіозавади. Таким чином, тільки місячний радіотелескоп може допомогти знайти відповідь на питання про джерело випромінювання. Якщо обидва вищезгадані механізми є можливими, радіотелескоп на поверхні Місяця може дозволити відрізнити КВМ від інших проявів сплесків IV типу.

Юпітер та Сатурн. Юпітеріанське низькочастотне випромінювання містить у собі ознаки, притаманні різноманітним фізичним об'єктам та умовам генерації. Найцікавіші події — шторми коротких S-сплесків — пов'язані зі складною взаємодією магнітного поля Юпітера зі струмами між супутниками та полюсами планети. Протягом довгого часу науковці пов'язували короткі S-сплески виключно із супутником Іо. Зовсім недавно у записах довготривалих спостережень, що проводилися наземними радіо-

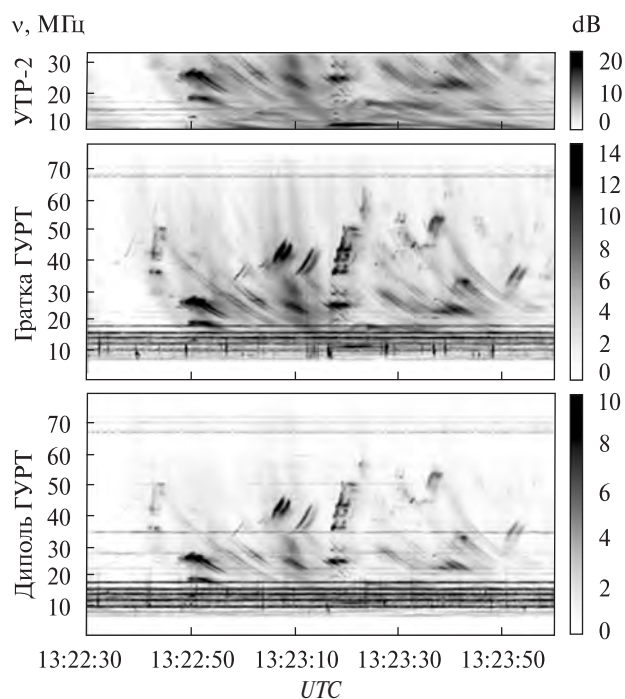


Рис. 6. Динамічні спектри послідовності сонячних сплесків типу «дрейфуючі пари», отримані 12 липня 2017 р. за допомогою північного плеча УТР-2 (720 диполів), субгратки ГУРТ (25 активних диполів) та одним диполем ГУРТ

телескопами та космічними місіями, було знайдено також декаметрове радіовипромінювання, спричинене Європою та Ганімедом [64]. Це відкриття суттєво змінює модель генерації радіовипромінювання, тому що тепер у моделі потрібно враховувати ефекти розповсюдження та взаємодії струмових трубок від різних супутників Юпітера. У зв'язку з цим ми бачимо нові спроби пояснити різні швидкості дрейфу S-сплесків [84], так звані «сплески поглинання» [62], та інші модуляційні ефекти. Варто зазначити, що відкриття нових типів юпітеріанського радіовипромінювання було здійснено не завдяки унікальним технічним характеристикам радіотелескопів, а дякуючи довготривалим спостереженням, які допомогли встановити взаємозалежність між повторюваністю сплесків та орбітальними періодами обертання планетарних супутників. Подальший розвиток цього підходу ідеально збігається з можливостями малорозмірного радіотелескопа на Місяці.

Блискавки в атмосфері Сатурна були відкриті космічним апаратом «Вояджер» у 1980 р. Тільки в 2006 р. на УТР-2 були надійно зафіксовані сигнали, подібні до радіовипромінювання сатурніанських блискавок. Доказ того, що отримані наземним радіотелескопом сигнали породжуються блискавками в атмосфері Сатурна, було отримано завдяки синхронним спостереженням радіотелескопа УТР-2 та місії «Кассіні/RPWS» [116, 117]. Відкриття тонкої часової структури блискавок [4, 5] дозволило знайти щільність потоків найпотужніших сплесків тривалістю 30...300 мкс з інтенсивністю 4000...5000 Ян ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$) та дослідити спектр блискавок. До того ж на низьких частотах (6 МГц) інтенсивність випромінювання блискавок підвищується. Це дозволяє досліджувати сплески навіть з однієї субрешітки ГУРТ, а значить і з місячного радіотелескопа, який пропонується.

Пульсари. Мала просторова роздільна здатність малої антенної решітки не є перешкодою для детектування радіовипромінювання пульсарів. Уточнені оцінки міри дисперсії для найближчих пульсарів [119] дозволяють виявити десятки пульсарів за допомогою субрешітки ГУРТ [58, 115] або запропонованого місячного радіотелескопа. Як мінімум декілька задач для низькочастотних досліджень таким радіотелескопом можна сформулювати вже зараз. Перш за все це оцінки середньої спектральної щільності та довготривалі флуктуації пульсуючого компонента у всьому робочому діапазоні частот радіотелескопа. Так само, як для аномально інтенсивних поодиноких імпульсів на низьких частотах [106], зміни у спектрі та інтенсивності радіовипромінювання пульсарів на часових масштабах від хвилин до років є дуже цікавими [11]. Ще одна актуальна проблема — це аналіз довгострокових флуктуацій дисперсії для вивчення мерехтінь у міжзоряному просторі. У роботі [3] показано, що роздільна здатність по часу 1 мкс забезпечує точність визначення міри дисперсії у $10^{-5} \dots 10^{-6} \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$ у діапазоні частот 10...40 МГц, яка є достатньою для досліджень не тільки міжзоряної, але й міжпланетної плазми. Такі значення часової роздільної здатності є прийнятними, тому що вони забезпечують до-

слідження розсіювання у низькочастотному діапазоні для найближчих пульсарів [105].

Радіорекомбінаційні лінії. Радіорекомбінаційні лінії високозбуджених атомів вуглецю у міжзоряному середовищі, які були відкриті 40 років тому за допомогою радіотелескопа УТР-2 у декаметровому діапазоні хвиль, дали новий метод дослідження холодної частково іонізованої космічної плазми. Це стало можливим завдяки точному визначенню фундаментальних характеристик середовища: температури, щільності, тиску, променевої швидкості, ступеня іонізації, механізмів іонізації та рекомбінації та іншим [56, 57]. Детектування дуже високих рівнів рідбергівських атомів до головного квантового числа 1030 у діапазоні 12...30 МГц дуже важливе як для астрофізики, так і для фізики в цілому [36, 99, 110]. У роботі [3] було оцінено інтенсивність радіорекомбінаційних ліній вуглецю для джерела Кассіопея А з використанням радіотелескопів УТР-2 та субрешіток ГУРТ. У діапазоні 8...40 МГц лежить більш ніж 300 ліній з головними квантовими числами у діапазоні від 550 до 900. Велика кількість ліній, що одночасно спостерігаються, дає можливість досягти унікальної чутливості вимірювань. Таким чином, запропонований місячний радіотелескоп дозволяє виконати пошуки ліній вуглецю та водню у різноманітних регіонах нашої Галактики.

Космологічні радіолінії. Також є космологічний аспект радіоастрономії зі зворотного боку Місяця. Матерія на ранніх стадіях Всесвіту складалася з високоіонізованих атомів водню (протонів). Це був газ, який охолоджувався завдяки розширенню Всесвіту, що призводило до рекомбінації протонів та електронів і утворення нейтрального водню. Водень має заборонену лінію, спричинену взаємодією магнітних моментів електрона і протона в атомі водню. Коли відбувається спонтанна зміна орієнтації моменту електрона, атом випромінює квант електромагнітної енергії з довжиною хвилі 21.1 см (частота близько 1420 МГц). Паралельно з випромінюванням відбувається й процес збудження атомів водню, наприклад оптичними фотонами або у результаті зіткнень. Водень залишався нейтральним протягом темних віків до форму-

вання перших іонізуючих астрономічних джерел: масивних зір, галактик, квазарів, а також надщільних регіонів за рахунок гравітаційного колапсу. На даний час вважається, що ці віки тривали між 380 тис. та 150 млн років після Великого вибуху [33, 79]. Ця епоха відповідає високим значенням швидкості розширення Всесвіту v , яку можна оцінити за допомогою рівняння $v = c [(1 + z)^2 - 1] / [(1 + z)^2 + 1]$, де $z = (\lambda_0 - \lambda) / \lambda$, λ_0 та λ — це довжини хвиль з червоним зміщенням та без нього відповідно. Параметр червоного зміщення z реліктового випромінювання має значення близько 1000, тоді коли для лінії H I він оцінюється у $z > 100$. На ранніх стадіях існування Всесвіту процес нагрівання та іонізації первинної речовини (переважно водню) може проходити повторно, викликаючи появу ліній поглинання нейтрального водню для різних z . Теоретичні дослідження [33] показують, що можливо є як мінімум три лінії поглинання H I, зміщені на частоти 20, 50 та 150 МГц. Незважаючи на те що інтенсивності цих ліній очікуються дуже малими, їхнє виявлення буде дуже важливим з наукової точки зору [3].

Левітація пилу. Астронавти місії «Аполлон» та посадкові апарати, що перебували у цій місії, спостерігали свічення на горизонті біля областей термінатора [35, 68, 81]. Цей ефект викликано левітацією часток пилу над термінатором. Левітація викликана електростатичними зарядами на поверхні Місяця. Цей процес викликає появу середовища літаючих частинок з щільністю, яка у 10^7 разів більша, ніж щільність середовища при метеоритному бомбардуванні [32]. Неочікувано яскраве нічне небо спостерігалось з радянського апарата «Луноход-2» [87]. Свічення на горизонті спостерігалось також камерою системи орієнтації по зірках КА «Клементина» [123].

Тіло, занурене у плазму сонячного вітру, отримує негативний заряд завдяки більшим електронним швидкостям: що більша швидкість, то більша частота зіткнень електронів з тілом. Поверхня Місяця піддається різним ефектам заряджання, зв'язаним з сонячним випромінюванням та зарядженими частинками у сонячному вітрі. Зокрема вважається, що пил набуває заря-

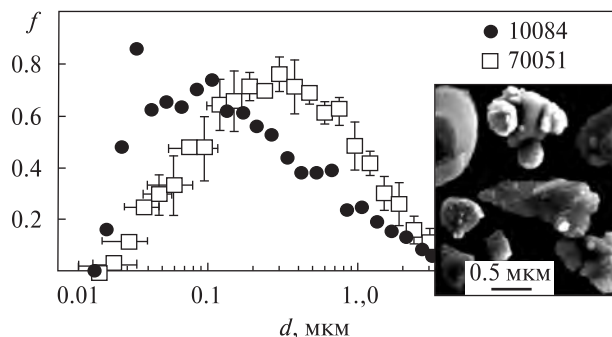


Рис. 7. Мікрофотографії часток та функція розподілу $f(d)$ частинок надтонких фракцій з місячних зразків 10084 («Аполлон-11») та 70051 («Аполлон-17») за даними [63, 73]

ду завдяки ефекту фотоемісії, що продукується сонячним випромінюванням в ультрафіолетовому та рентгенівському діапазонах протягом місячного дня. Фотоелектрони покидають поверхню Місяця, що викликає позитивний заряд на денній стороні до декількох вольт. Так, випромінювання спричиняє позитивний електричний заряд пилових частинок реголіту діаметром декілька десятків мікронів.

На рис. 7 наведено мікрофотографії таких частинок та розподіл частинок за розміром найдрібніших фракцій місячних зразків 10084 та 70051 [63, 73] місій «Аполлон-11» та «Аполлон-17» відповідно. Обидва ці зразки не більші за 0.3 мкм. Частинки місячного пилу мають різну форму, та опис розсіювання світла на таких частинках потребує більш складних підходів, ніж теорія Мі [74, 75, 124–126]. Частинки пилу можуть відігравати значну роль у виникненні альбедних структур місячних вихорів (свірлів) [34], подібних утворенню Reiner Gamma [78, 98].

Якщо такі неправильні частинки подолають адгезію та гравітаційні сили, вони можуть злітати на певну висоту. Протягом місячної ночі значущим іонізаційним фактором є тільки плазма сонячного вітру, що забезпечує негативний заряд до 100 В [43, 68, 100]. У окремих місцях негативний та позитивний поверхневий заряд може сягати кількох кіловольт. Ці механізми роблять свій внесок до руху частинок пилу, що постійно підіймаються та падають на місячну поверхню, динамічно створюючи розріджену пилову атмосферу або пилову плазму [80].

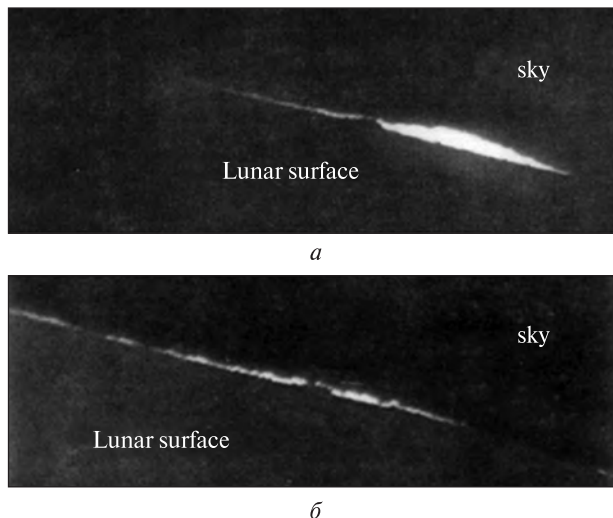


Рис. 8. Свічення пилу на західному горизонті, зареєстроване камерою «Сервейор-7»: а, б — відповідно через 15 і 90 хв після заходу Сонця (дані [72])

На місячному термінаторі повинні спостерігатися значні горизонтальні електричні поля, які могли б призводити до горизонтального переносу місячного пилу. Полюси Місяця представляють найбільший інтерес, адже вони постійно знаходяться в зоні термінатора. У постійно затінених районах частинки пилу можуть накопичуватися, формуючи гладкі поверхні з незвичними характеристиками. Така поверхня скоріш за все має більше, ніж навколишні області, лідарне альbedo завдяки меншому розміру пилових частинок. Матеріал таких пилових частинок під максимальною дією протонів сонячного вітру також може генерувати коливальну ІЧ-смугу сполук $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ [97].

Місячне середовище з пилу та плазми досліджене дуже слабо. Посадковий модуль може бути споряджено панорамною камерою для спостережень горизонту під час сходу та заходу Сонця, як це було зроблено на КА «Сервейор-5...-7» півстоліття тому [35]. На рис. 8 показано фотографії свічення на горизонті, отримані за допомогою камер апарата «Сервейор-7» 23 січня 1968 р. Добре видно сонячну підсвітку пилових шарів уздовж західного горизонту після заходу Сонця. Це свідчить про те, що буде дуже корисним обладнати посадковий модуль відповідною

панорамною камерою. Дослідження свічень на горизонті біля південного полюса Місяця відкриває унікальні можливості для оцінки характеристик частинок, що левітують, та плазми сонячного вітру. Цей експеримент стане значно досконалішим, якщо обладнати камеру поляризаційними та кольірними фільтрами. Зокрема, це може дозволити більш надійно оцінювати середній розмір частинок пилу, що левітують.

ОРБИТАЛЬНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ

Супутниковий модуль призначено для вивчення місячної поверхні з еліптичної орбіти і забезпечення зв'язку посадкового модуля з Землею. Розглянемо три основні експерименти, які можуть бути виконані за допомогою обладнання на борту супутника, який також розглядається в якості ретранслятора для посадкового модуля на зворотному боці Місяця. Відповідне корисне навантаження складається із 3-мм радара, ІЧ-спектрометра для діапазону довжин хвиль від 1 до 5 $\mu\text{м}$ і камери HiRes для вивчення молодих місячних ділянок поверхні з використанням методу фазових відношень.

3-мм радар. За допомогою методів оптичного та близького інфрачервоного дистанційного зондування з використанням космічних апаратів отримано величезну кількість даних з високим просторовим розділенням. Однак ці дані містять інформацію лише про верхній шар реголіту товщиною приблизно 100 $\mu\text{м}$. Завдяки відсутності води у місячному ґрунті в рідкому або газоподібному стані глибина проникнення радіохвиль може становити кілька десятків довжин хвиль, як і для оптичного діапазону. Проведені радарні дослідження в сантиметровому-декаметровому діапазоні довжин хвиль показали, що вони дозволяють оцінити склад та структуру поверхневого шару до глибини декількох кілометрів [72, 112]. Є приклади використання радарів, які працюють з використанням дециметрових хвиль в режимі синтезованої діаграми спрямованості [18, 109]. При дослідженнях космічних апаратів за допомогою апертурного синтезу [86] можна забезпечити просторову роздільну здатність приблизно 100 м з

орбітальної відстані 100 км від поверхні Місяця, використовуючи реалістичні технічні параметри радарів.

Більшість місячних радарних досліджень проводилися на відносно низьких частотах для забезпечення дистанційного зондування досить товстих шарів місячної поверхні. Місяць ніколи не вивчався у міліметровому діапазоні спектру. Навіть спостереження з Землі обмежувалися довжиною хвилі 8.6 мм [28, 66], оскільки коротші міліметрові хвилі сильно поглинаються атмосферою Землі. Для заповнення проміжку між радіо- та оптичними вимірюваннями необхідні космічні радіолокаційні дослідження на міліметрових довжинах хвиль. Застосування супутникового бортового радара цього діапазону дало б змогу зробити наступне: 1) оцінити параметри та структуру верхнього шару місячного реголіту на глибину до декількох сантиметрів і 2) побудувати тривимірні топографічні моделі місячної поверхні, використовуючи методи радіолокації синтезованої діаграми бокового огляду, описані в роботах [16, 18, 113, 121]. Тут ми розглянемо можливі задачі, які можна вирішити за допомогою 3-мм радара, та оцінимо необхідні характеристики радара.

Схоже, доцільно використовувати 3-мм радар у трьох робочих режимах: а) активне моностатичне зондування місячної поверхні, б) радіолокаційне спостереження синтезованою діаграмою бокового огляду, в) пасивний (радіометричний) режим. Це дозволить: а) оцінити електрофізичні та структурні параметри верхнього шару товщиною до декількох сантиметрів з відносно грубим просторовим розділенням (~1 км); б) визначити відбивальні властивості місячної поверхні та реконструювати її тривимірну топографію з високою роздільною здатністю (кілька десятків метрів); в) вивчити просторовий розподіл та аномалії полів теплового випромінювання з метою виявлення глобальних та локальних неоднорідностей у місячній корі та мантиї. В останньому режимі радіолокаційний передавач вимикається, а приймач реєструє випромінювання місячної поверхні. Як і у випадку активної моностатичної локації, просторова роздільна здатність визначається конструкцією радарної антени.

Відбитий радарний сигнал суттєво залежить від топографії Місяця при масштабах більше 1 см, мікротопографії умовно на масштабах менше 1 см і ефективних значень діелектричних констант поверхневого матеріалу. Відгук діелектричних матеріалів, прикладом яких є місячний поверхневий реголіт, на падаючу електромагнітну хвилю визначається зрушеннями зв'язаних зарядів. Це можуть бути електрони в атомах, іони в кристалах і диполі у молекулах. У міліметровому діапазоні для природних діелектриків немає характерних смуг поглинання. Він розташовується між довгохвильовими крилами електронних і іонних смуг та короткохвильовим крилом смуг, пов'язаних з стрибковим механізмом поляризації діелектриків. Діелектричні константи місячного реголіту — це ефективні значення; тобто вони визначаються не тільки властивостями матеріалу, але також щільністю місячного реголіту у масштабі, значно меншому за 1 мм. Слід нагадати, що середній розмір частинок місячної поверхні близький до 60 мкм [68]. Поверхневі неоднорідності порядку масштабу 1 мм створюють дифузну складову діаграми радарного розсіювання. Дзеркальні та дифузні компоненти можна описати, використовуючи теоретичну модель або евристичну, яка апроксимується відповідною функцією. Для ілюстративних цілей ми використовуємо тут однопараметричну фазову функцію Хенї — Грінштейна $\chi(\alpha) = (1 - g^2)(1 + g^2 + 2g\cos\alpha)^{-3/2}$ [42], де α — кут розсіювання, g — параметр для характеристики переважного напрямку розсіювання.

На рис. 9 представлено результати нашого комп'ютерного моделювання розсіювання на шорстких поверхнях з параметром шорсткості, який характеризується середньоквадратичним розкидом нахилів поверхні. Ми застосовуємо спрощену 2-масштабну модель [10], яка розраховує дифузну складову радарного розсіювання за допомогою функції Хенї — Грінштейна [42] зі значеннями параметра $g = 0, 0.5$ і 0.95 . Перше значення відповідає ізотропному розсіюванню, останнє — квазідзеркальному. Для масштабів, набагато більших, ніж 1 мм, може бути корисним підхід, що ґрунтується на наближенні геометричної оптики [10]. Відстеження променів

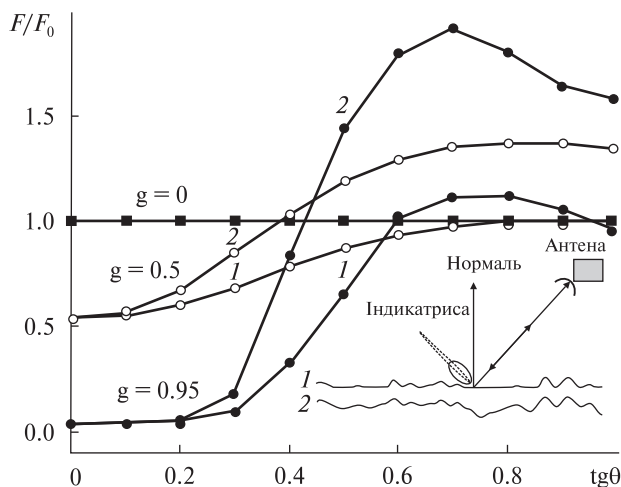


Рис. 9. Нормалізований радарний сигнал як функція параметра $\langle \text{tg}\theta \rangle$, що характеризує шорсткість різних типів поверхонь (моделі 1 і 2), та для різних значень параметра g у функції Хенні — Грінштейна

виконується за методикою, розробленою Д. Г. Станкевичем, Ю. Г. Шкуратовим та ін. [94, 96]. Ми розглядаємо два типи моделі шорстких випадкових поверхонь. Перша з них описується гаусовою статистикою висот і схилів. Друга модель дуже схожа, однак передбачає заміну ділянок з негативними висотами плоскими поверхнями з нульовими висотами (див. вставку на рис. 9). Залежність нормалізованого сигналу від характерного нахилу поверхні $\langle \text{tg}\theta \rangle$, яка була розрахована для цих двох моделей, представлена на рис. 9. Наші оцінки показують, що основним фактором, що впливає на радарний відгук, є шорсткість поверхні, тобто варіації локальних поверхневих нахилів.

Таким чином, 3-мм радіолокаційне картографування може виявити ділянки з високою шорсткістю на масштабах кілька сантиметрів та більше, що може відповідати полям каменів і скель. Такі карти важливі для вибору безпечних місць для посадок на Місяць.

Інфрачервоний спектрометр. У видимому, близькому УФ- та близькому ІЧ-діапазонах (0.3...2.3 мкм) місячні спектри відбиття бідні на деталі. В УФ- та видимому діапазоні альbedo зменшується зі зменшенням довжини хвилі. Ця особливість пов'язана з ефектом поглинання в

силікатах в УФ-частині спектру, де смуги поглинання пов'язані із перенесенням заряду типу кисень — метал та метал — метал [17], а також завдяки субмікроскопічному металевому залізу в реголітних частинках [40]. У мінералах серій плагіоклазу, піроксену та олівіну біля 1 і 2 мкм є слабкі кристалічні смуги d-d-типу, пов'язані з іонами Fe^{2+} [17].

Виявлення смуги місячної води біля 3 мкм було несподіваним відкриттям величезної ваги [21, 23, 76, 102]. На жаль, це відкриття зроблено не без значних недоліків. МЗ-спектрометр, що використовувався у роботі [76], працював у діапазоні 0.4...3.0 мкм, і вимірювання при $\lambda > 2.7$ мкм не були надійними. Спектральні дані, отримані в роботах [21, 102], мають дуже низьке просторове розділення. Крім того, всі ці вимірювання водяного льоду потребують ретельного видалення емісійної складової, внесок якої в загальний потік дуже різко збільшується з довжиною хвилі, починаючи від 2.5 мкм. Це видалення є складною проблемою, оскільки величина емісії залежить від температури поверхні, яка в свою чергу залежить від топографії поверхні, тобто локальної геометрії освітлення/спостереження [91].

Хоча спектральна деталь на 3 мкм приписується водяному льоду, фактично її походження не є повністю зрозумілим. Зокрема, ця смуга може виникати через моду О-Н-розтягування сполук $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$, а не обов'язково чистого водяного льоду. Є три джерела сполук $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$: ендегенна вода, вода, що походить від ядер комет і примітивних вуглецевих хондритних метеоритів, а також водень (протони) від сонячного вітру [9]. Насипні місячні силікати значно менш нестійкі, ніж за попередніми оцінками [41]; тим не менш схоже, що первинним джерелом не може бути H_2O , оскільки на зрілий місячний реголіт багато разів мали термічний вплив метеоритні удари різних масштабів. Найбільш вірогідним джерелом сполук $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ можуть бути протони сонячного вітру, імплантовані на силікатну матрицю [24, 25, 67, 97].

Коливальна мода О-Н-сполук $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ спостерігається для водяного льоду та кристалічної води і гідроксилу в силікатах на різних довжинах хвилі, що можна побачити на рис. 10, запозиче-

ного з роботи [21]. Отже, нове картування повного профілю 3-мкм смуги з роздільною здатністю порядку 100 м необхідне, зокрема, щоб розрізнити випадки, показані на рис. 10. Для цього необхідно буде охопити спектральний діапазон приблизно від 2.2 до 5.0 мкм з досить високою спектральною роздільною здатністю. Більш складна методика розрізнення відбитої та випроміненої (теплової) складових має вирішальне значення для подальшого аналізу [91].

3-мкм спектральне картування тісно пов'язане з можливим накопиченням пилових частинок поблизу місячних полюсів через їхню левітацію. Цей пил повинен бути насиченим протонами сонячного вітру, і отже, з'єднаннями $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$. Час такого насичення дуже короткий — близько 100 років. Більше того, характерна глибина проникнення протонів сонячного вітру близька до середнього розміру частинок пилу, які беруть участь у електростатичній левітації (0.2 мкм) [97]. Таким чином, пил, накопичений біля полюса, насправді є силікатним зі значною кількістю (до 10 %) сполук $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$.

Ще однією метою картування профілю 3-мкм смуги є вивчення часових варіацій глибини смуги, виявлених у попередніх спостереженнях [76, 102]. Ці варіації, ймовірно, пов'язані з сонячним теплом, яке може забезпечити випаровування водню як із внутрішньої поверхні великих пор, так і з внутрішньої поверхні закритих пухирців і порожнин, які виникають внаслідок утворення пухирів при протонному опроміненні реголітних частинок. Випаровування зменшує кількість О-Н-зв'язків, призводячи до ослаблення смуги 3 мкм. При охолодженні сполуки внутрішній водень знову конденсується на внутрішній поверхні реголітових частинок, що призводить до посилення смуги 3 мкм.

Водень може накопичуватися всередині реголітових частинок від сонячного вітру та/або завдяки дифузії летких речовин, що спочатку містилися у місячній речовині. Дифузія різко збільшується при локальному нагріванні, спричиненому впливом мікрометеороїдного удару. Ці процеси можуть продукувати помітний тиск у атмосфері пухирців/пор. Маса такої внутрішньої водневої атмосфери може бути величезною, оскільки внутрішня поверхня

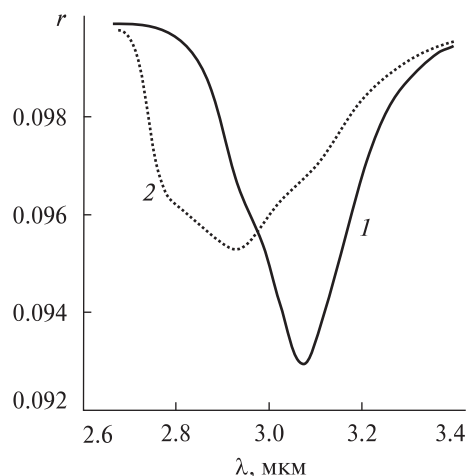


Рис. 10. Коливальні смуги О-Н від H_2O та OH : 1 — для водяного льоду, 2 — для гідроксилу в силікаті (дані [27])

частинок реголіту набагато більша, ніж поверхня сфери Місяця.

Камера HiRes з двома спектральними смугами. Є велика кількість зображень LROC NAC з високим просторовим розділенням порядку 0.5...1.0 м, які були отримані за допомогою вузькокутової камери LRO NAC [82]. Ці зображення охоплюють всю місячну поверхню, причому для багатьох місць картування зроблено кілька разів. Проте ці зображення були отримані в інтегральному світлі. Ми розглядаємо таке HiRes- картування вибраних місячних ділянок як мінімум у двох спектральних діапазонах як високо пріоритетну задачу. Спектральні смуги камери HiRes можуть бути центровані поблизу $\lambda = 0.75$ і 0.95 мкм. Це відповідає короткохвильовому краю та мінімуму асиметричної спектральної депресії, утвореної смугами піроксенів та олівінів біля 1 мкм, що перекриваються [17]. Ці дані можуть бути використані для картування величини FeO та параметра ступеня зрілості, що характеризує експозиційний вік поверхні [14, 65, 77].

На рис. 11 наведено приклад застосування такої методики до ділянки, що включає частину великого кратера Альфонс. Для цієї ілюстрації ми використовуємо дані камери «Клементіна UVVIS». Як можна побачити, розподіли вмісту FeO та ступеня зрілості дуже різні, що свідчить про незалежність спектральних смуг, центрованих у довжинах хвиль $\lambda = 0.75$ і 0.95 мкм. Ступінь

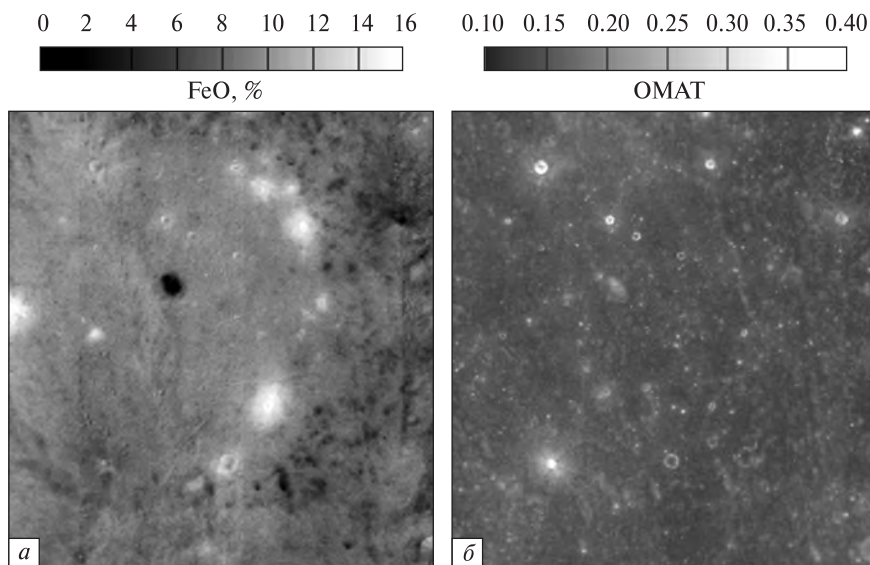


Рис. 11. Розподіли вмісту FeO та ступеня зрілості OMAT у кратері Альфонс

зрілості пов'язана з параметром оптичної зрілості OMAT [14, 65]. Рис. 11, а показує, що у кратері є дуже яскраві плями, які відповідають високому вмісту FeO; ці плями — це класичні приклади місячних темних мантій, які розглядаються як пізні вулканічні утворення. У той же час цих утворень не видно на карті параметра OMAT (рис. 11, б), що свідчить про не надто малий вік утворення.

Важливу додаткову інформацію про місячну поверхню можна отримати з просторовим розділенням близько 1 м, використовуючи так звану методику фазових відношень, запропоновану Ю. Г. Шкуратовим та ін. [6]. Суть цієї методики була докладно описана Кайдашем та ін. [51]: світло, що розсіюється, можна описати функцією $A(\alpha) = A_0 f(\alpha)$, де A_0 — альbedo, виміряне при нульовому фазовому куті $\alpha = 0$, $f(\alpha)$ — нормована фазова функція [39, 91]. Фазова функція визначається складністю структури поверхні. Для різних точок місячної поверхні фазові функції трохи різні. Зображення параметра нахилу функції містить інформацію про шорсткість поверхні у масштабах менше розміру піксела, яка впливає на фазову функцію. Найпростішим підходом до вивчення варіацій нахилу є картування фазового відношення $A(\alpha_1)/A(\alpha_2)$, тобто побудова відношення сумі-

щених зображень, отриманих при різних фазових кутах α . Зображення фазового відношення пригнічує вплив варіацій альbedo по поверхні на вихідному зображенні. Значення кутів α_1 та α_2 визначають масштаби шорсткості, що впливають на відношення $A(\alpha_1)/A(\alpha_2)$. Наприклад, при малих α важливим параметром є щільність упаковки частинок на поверхні, але коли α достатньо велике, це може бути характерний нахил поверхні.

Картування фазового відношення є перспективним інструментом дистанційного зондування Місяця. Використовуючи цей метод з даними, отриманими LRO NAC, ми знайшли аномалії фазового відношення навколо місць посадки всіх модулів КА «Аполлон» [50]. Ці аномалії охоплюють ділянки в розмірі декількох сотень метрів, маючи меншу шорсткість поверхні, що пов'язано з видуванням ґрунтів з дуже дрібними частинками газовими струменями з двигунів. Також були отримані зображення фазових відношень місць посадки радянських «Луна-16», «Луна-20», «Луна-23» і «Луна-24». Як і у випадку КА «Аполлон», вони показують дифузні особливості, пов'язані з місцями посадки. На відміну від усіх інших космічних апаратів з м'якою посадкою, місце посадки «Луна-24» несподівано не проявляється на зображеннях фазового відно-

шення. Це свідчить про те, що посадковий майданчик «Луна-24», можливо, було невірно ідентифіковано, та насправді він був місцем аварійної посадки «Луна-23» — відстань між посадковими майданчиками становить лише 1 км [52, 92].

Таким чином, схоже, що техніка фазових відношень допомогла розв'язати стару загадку, пов'язану з радянськими зондами, які доставили місячні зразки на Землю.

Також були отримані нові результати щодо схилової рухомості реголіту на внутрішніх сторонах кратера Джордано Бруно [93]. Зображення фазового відношення для регіонів показують багато нових деталей, деякі з яких практично не видимі на відповідних зображеннях альbedo. Ці дослідження дозволяють зробити висновки про вік

кратера, який оцінюється приблизно в 10 мільйонів років, тобто, кратер Джордано Бруно дуже молодий. Це додатковий приклад ефективності методу фазових відношень та його придатності до місячної місії, що презентується у цій роботі.

Рис. 12 ілюструє ефективність методу фазових відношень. На ньому показано молодий яскравий кратер Чаплигін Б, розміщений на краю кратера Чаплигін. Кратер діаметром 1.5 км з широтою центра -4.1° та довготою центра 151.7° . Його видно поблизу центра контекстного зображення мозаїки LRO WAC на рис. 12, *а*. Використовуючи дані LRO NAC, ми наводимо яскравіше зображення частини кратера при $\alpha = 8^\circ$ (рис. 12, *б*) та зображення фазового відношення $A(52^\circ)/A(8^\circ)$ (рис. 12, *в*) з поверхневим розділен-

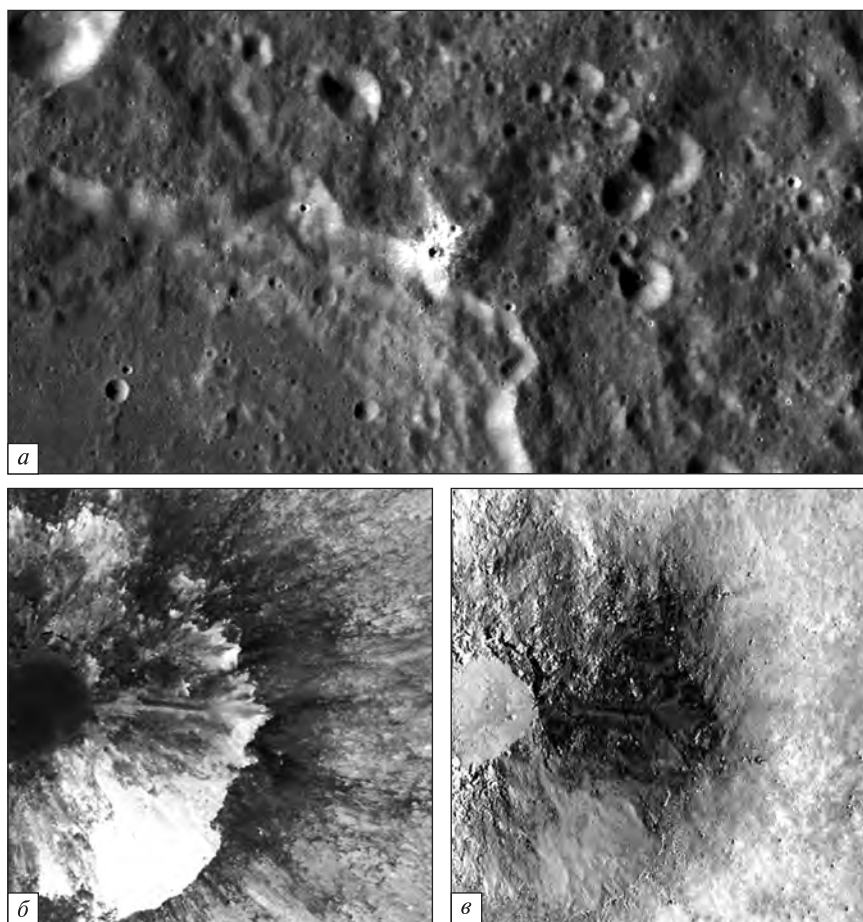


Рис. 12. Околиці кратера Чаплигін Б в центрі кадру (*а*), яскраве зображення частини кратера при $\alpha = 8^\circ$ (*б*) та зображення фазового відношення $A(52^\circ)/A(8^\circ)$ (*в*). Для обчислення фазового відношення використано дані LRO NAC

ням 1 м. Кратер має променеву систему, яка включає яскраві та темні промені. Якщо доступне лише одне зображення, отримане при великому α , неможливо відрізнити причини невідповідності яскравості — вона може бути викликана або відмінностями хімічного складу матеріалу, або відмінностями структури поверхні [53]. Фазове відношення $A(52^\circ)/A(8^\circ)$, показане на рис. 12, в, не відображає різницю між двома типами променів. Цей приклад недвозначно вказує на те, що у випадку кратера Чаплигін Б ми маємо справу з різним хімічним складом викинутих матеріалів. Камера HiRes з поверхневою роздільною здатністю 1 м у спектральних каналах $\lambda = 0.75$ і 0.95 мкм забезпечить адекватну характеристику молодих формувань місячної поверхні, що важливо для місячної геології. Для цього будуть побудовані зображення різних фазових відношень надзвичайно молодих кратерів та районів з великими схиленими зсувами.

ВИСНОВКИ

1. У даній роботі ми описуємо подвійну за призначенням місячну місію, яка включає розміщення радіоастрономічного посадкового модуля на зворотному боці Місяця в околицях кратера Брауде поблизу південного полюса та навколomisячного супутника-ретранслятора з науковим навантаженням на витягнутій орбіті з перицентром над північним полюсом (100 км над поверхнею) та апоцентром над південним полюсом (висота близько 3000 км). Посадковий модуль буде бачити ретрансляційний супутник на частині його орбіти, що прилягає до апоцентра. Цей модуль містить п'ять дипольних антен, призначених для радіоастрономічних досліджень. Орбітальний модуль буде обладнано засобами дистанційного зондування, які раніше не використовувалися в космічних дослідженнях Місяця, і прототипи яких вже використовуються науковими організаціями України.

2. Незважаючи на низьку ефективну площу радіоастрономічної антени, можна буде проводити важливі дослідження астрофізичних об'єктів на наддовгих хвилях. Наприклад, в режимі радіоспектрометра (від сотень кГц до 40 МГц) можуть бути вивчені сонячні спалахи різних типів, вики-

ди корональної маси, радіовипромінювання Юпітера (сплески L і S) і Сатурна (кілометрові радіовимірювання). Дослідження мерехтінь на просторових неоднорідностях електронів у міжпланетній та міжзоряній плазмі, а також на навколomisячній плазмі можуть бути метою місячного радіотелескопа. Перекриття частот в діапазоні 10...40 МГц дозволить працювати разом з наземними радіотелескопами (УТР-2, ГУРТ) Радіоастрономічного інституту НАН України, діяльність яких нижче частоти 10 МГц обмежена земною іоносферою. Спільні спостереження астрофізичних об'єктів за допомогою місячних і земних антен, які координуються через супутник-ретранслятор, можливі на дуже довгій базі (відстань Земля — Місяць). Відсутність земного шуму дозволить вирішувати задачі пошуку космологічних ефектів, пов'язаних з лінією нейтрального водню при $z = 50...100$.

3. Посадковий апарат також може бути обладнаний панорамною камерою з кольорними та поляризаційними фільтрами для вивчення саява горизонту поблизу полюсу, спричиненого пилом, що левітує. Пилові частинки злітають над районами місячного термінатора за рахунок електростатичних сил, що створюються плазмою сонячного вітру і ефектом електронної фотомісії, викликані випромінюванням сонячного УФ- і рентгенівського випромінювання.

4. Орбітальний модуль включає в себе інфрачервоний спектрометр, який дозволяє відрізнити коливальні моди О-Н від H_2O та ОН у місячному ґрунті (див. рис. 10). Додатковою важливою метою вимірювань є часові варіації смуги 3 мкм. Ці зміни можуть бути викликані процесом випаровування/конденсації всередині реголітових частинок при нагріванні/охолодженні, пов'язаним з внутрішнім воднем, який накопичується у порах і пухирцях частинок реголіту. ІЧ-спектрометр повинен охоплювати спектральний діапазон приблизно від 1 до 5 мкм. Картування великої площі поблизу північного полюса Місяця буде забезпечуватися з просторовим розділенням 100 м.

5. Корисне навантаження цього модуля також включає в себе камеру HiRes для отримання зображень фазового відношення обраних областей для того, щоб охарактеризувати струк-

турні і мінералогічні параметри молодих місячних поверхневих утворень з розділенням 1 м.

6. Використання 3-мм радара з режимом бокового огляду (Радіоастрономічний інститут НАН України), що працює у двох поляризаціях, дозволить отримувати не тільки карти радіояскравості поверхні, яка тісно пов'язана з його шорсткістю, але й поліпшити топографічну модель Місяця з просторовим розділенням порядку 100 м. Такі вимірювання забезпечують оцінку електрофізичних та структурних параметрів верхнього шару реголіту до декількох сантиметрів, і роблять доступним просторовий розподіл поля теплового випромінювання з метою пошуку глобальних та локальних неоднорідностей у структурі місячної кори та мантії.

На думку авторів, запропонована місія для проведення досліджень на зворотній стороні супутника Землі Місяця з використанням посадкового модуля та спеціального місячного орбітального модуля дозволить досягти значних успіхів у вивченні Місяця та інших об'єктів Всесвіту.

Автори вдячні командам космічних місій «Кассіні», STEREO, GOES, SOHO, SDO за можливість роботи з даними вимірювань цих КА. Роботу виконано за підтримки цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень (Державний реєстраційний номер 0117U002396).

1. Абранін Е. П., Брук Ю. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А. Структура и параметры новой системы антенного усиления радиотелескопа УТР-2 // Радиофизика и радиоастрономия. — 1997. — 2, № 1. — С. 95—102.
2. Доровський В. В., Мельник В. М., Коноваленко О. О., Бубнов І. М., Грідін А. О., Шевчук М. В., Фалькович І. С., Коваль А. О., Руткевич Б. П., Резник О. П., Рукер Г. О., Панченко М., Белов О. С., Христенко О. Д., Квасов Г. В., Єрін С. М. Наблюдения Солнечного U-всплеска в полосе частот 10—70 МГц с использованием радиотелескопа ГУРТ // Радиофизика и радиоастрономия. — 2013. — 18, № 2. — С. 101—106.
3. Коноваленко А. А., Єрін С. Н., Бубнов І. Н., Токарський П. Л., Захаренко В. В., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Степкин С. В., Грідін А. А., Квасов Г. В., Колядин В. Л., Мельник В. Н., Доровський В. В., Калиниченко Н. Н., Литвиненко Г. В., Зарка Ф., Дени Л., Жирар Ж., Рукер Х. О., Панченко М., Станиславський А. А., Христенко А. Д., Муха Д. В., Резниченко А. М., Лисаченко В. М., Борцов В. В., Браженко А. И., Васильева Я. Ю., Скорик А. А., Шевцова А. И., Милостная К. Ю. Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения // Радиофизика и радиоастрономия. — 2016. — 21, № 2. — С. 83—131.
4. Милостна К. Ю., Захаренко В. В. Поиск и исследование грозовой активности на Сатурне и других планетах Солнечной системы // Радиофизика и радиоастрономия. — 2013. — 18, N 1. — С. 12—25.
5. Милостна К. Ю., Захаренко В. В., Коноваленко А. А., Фишер Г., Зарка Ф., Сидорчук М. А. Тонкая временная структура молний на Сатурне // Радиофизика и радиоастрономия. — 2014. — 19, N 1. — С. 10—19.
6. Шкуратов Ю. Г., Кислюк В. С., Литвиненко Л. Н., Яцкив Я. С. Модель Луны для проекта «Укрселена» // Космична наука і технологія. Додаток. — 2004. — 10, № 2. — С. 3—51.
7. Abranin E. P., Bruck Yu. M., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A. The new preamplification system for the UTR-2 radio telescope // Exp. Astron. — 2001. — 11, N 2. — P. 85—112.
8. Alexander J. K., Kaiser M. L., Novaco J. C., Grena F. R., Weber R. R. Scientific instrumentation of the Radio-Astronomy-Explorer-2 satellite // Astron. and Astrophys. — 1975. — 40. — P. 365—371.
9. Arnold J. R. Ice in the lunar polar regions // J. Geophys. Res. — 1979. — 84. — P. 5659—5668.
10. Bass F. G., Fuks I. M. Wave scattering from statistically rough surfaces. — Oxford, New York: Pergamon Press, 1979.
11. Bell M. E., Murphy Tara, Johnston S., Kaplan D. L., Croft S., Hancock P., Callingham J. R., Zic A., Dobie D., Swiggum J. K., Rowlinson A., Hurley-Walker N., Offringa A. R., Bernardi G., Bowman J. D., Briggs F., Cappallo R. J., Deshpande A. A., Gaensler B. M., Greenhill L. J., Hazelton B. J., Johnston-Hollitt M., Lonsdale C. J., McWhirter S. R., Mitchell D. A., Morale M. F. S., Morgan E., Oberoi D., Ord S. M., Prabu T., Shankar N. Udaya, Srivani K. S., Subrahmanyam R., Tingay S. J., Wayth R. B., Webster R. L., Williams A., Williams C. L. Time-domain and spectral properties of pulsars at 154 MHz // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 2016. — 461, N 1. — P. 908—921.
12. Bezvesilnyi O. O., Dukhopelnykova I. V., Vinogradov V. V., Vavriv D. M. Retrieving 3-D topography by using a single-antenna squint-mode airborne SAR // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. — 2007. — 45, N 11. — P. 3574—3582.
13. Bezvesilnyi O. O., Vynogradov V. V., Vavriv D. M. High-accuracy doppler measurements for airborne SAR applications // Proc. 5th European Radar Conf. October 2008. — Amsterdam, The Netherlands, 2008. — P. 29—32.
14. Blewett D. T., Lucey P. G., Hawke B. R., Jolliff B. L. Clementine images of the lunar sample-return stations: refinement of FeO and TiO₂ mapping techniques // J. Geophys. Res. — 1997. — 102, N 16. — P. 319—325.

15. Braude S. Ya., Megn A. V., Ryabov B. P., Sharykin N. K., Zhouck I. N. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. I. The UTR-2 Radio Telescope. Experimental techniques and data processing // *Astrophys. and Space Sci.* — 1978. — **54**, N 1. — P. 3—36.
16. Burns J. O., Duric N., Taylor G. J., Johnson S. W. Observatories on the Moon // *Sci. Amer.* — 1990. — **262**. — P. 18—25.
17. Burns R. Mineralogical applications of crystal field theory. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993. — 459 p.
18. Bussey D. B., Spudis P. D., Nozette S., Lichtenberg C. L., Raney R. K., Marinelli W., Winters H. L. Mini-RF: Imaging radars for exploring the lunar poles // *Lunar Planet. Sci. Conf. 39th.* — LPI Houston, 2008.
19. Cecconi B. Goniopolarimetric techniques for low-frequency radio astronomy in space // *Observing Photons in Space* / Eds M. C. E. Huber, A. Pauluhn, J. L. Culhane, J. G. Timothy, K. Wilhelm, A. Zehnder. — ISSI Scientific Reports Ser, Springer, 2010. — P. 263—277.
20. Chertok B. Rockets and people. The Moon Race. — Washington, DC., 2011. — IV. — NASA SP-2011-4110.
21. Clark R. N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon // *Science.* — 2009. — **326**. — P. 562—564.
22. Condoleo E., Cinelli M., Ortore E., Circi C. Stable orbits for lunar landing assistance // *Adv. Space Res.* — 2017. — **60**, N 7. — P. 1404—1412.
23. Crawford I., Joy K. Lunar exploration: opening a window into the history and evolution of the inner Solar System // *Phil. Trans. Roy. Soc. London A.* — 2014. — **372**. — id. 20130315.
24. Crawford I. A., Zarnecki J. Astronomy from the Moon // *Astron. Geophys.* — 2008. — **49**. — P. 2.17—2.19.
25. Crider D. H., Vondrak R. R. The solar wind as a possible source of lunar polar hydrogen deposits // *J. Geophys. Res.* — 2000. — **105**. — P. 26773—26782.
26. Dessler A. J. Jupiter's magnetic field and magnetosphere // *Physics of the Jovian magnetosphere* / Ed. A. J. Dessler. — Cambridge: Cambridge University Press, 1983. — P. 1—50.
27. Dyar M. D., Hibbitts C. A., Orlando T. M. Mechanisms for incorporation of hydrogen in and on terrestrial planetary surfaces // *Icarus.* — 2010. — **208**. — P. 425—437.
28. Evans J. V., Pettengill G. H. The radar cross-section of the Moon // *J. Geophys. Res.* — 1963. — **68**, N 17. — P. 5098—5099.
29. Falkovich I. S., Konovalenko A. A., Gridin A. A., Sodin L. G., Bubnov I. N., Kalinichenko N. N., Rashkovskii S. L., Mukha D. V., Tokarsky P. L. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy // *Exp. Astron.* — 2011. — **32**, N 2. — P. 127—145.
30. Fischman M. A. Sensitivity of a 1.4 GHz Direct-Sampling Digital Radiometer // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* — 1999. — **37**, N 5. — P. 2172—2180.
31. Fisher G., Kurth W. S., Gurnett D. A., Zarka P., Dyudina U. A., Ingersoll A. P., Ewald S. P., Porco C. C., Wesley A., Go C., Delcroix M. A giant thunderstorm on Saturn // *Nature.* — 2011. — **475**, N 7354. — P. 75—77.
32. Freeman J. W., Ibrahim B. Lunar electric fields, surface potential and associated plasma sheets // *The Moon.* — 1975. — **14**. — P. 103—114.
33. Furlanetto S. R., Peng O. S., Briggs F. H. Cosmology at low frequencies: The 21 cm transition and the high-redshift Universe // *Phys. Repts.* — 2006. — **433**, N 4—6. — P. 181—301.
34. Garrick-Bethell I., Head J. W., Pieters C. M. Spectral properties, magnetic fields, and dust transport at lunar swirls // *Icarus.* — 2011. — **212**. — P. 480—492.
35. Gault D. E., Adams J. B., Collins R. J., Kuiper G. P., O'Keefe J. A., Phinney R. A., Shoemaker E. M. Lunar theory and processes: Post-sunset horizon "Afterglow" // *Icarus.* — 1970. — **12**. — P. 230—232.
36. Gordon M. A., Sorochenko R. L. Radio Recombination Lines: Their Physics and Astronomical Application. — Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2002.
37. Goswami J. N., Annadurai M. Chandrayaan-1: India's first planetary science mission to the Moon // *Curr. Sci.* — 2009. — **96**, N 4. — P. 486—491.
38. Guang-You Fang, Bin Zhou, Yi-Cai Ji, Qun-Ying Zhang, Shao-Xiang Shen, Yu-Xi Li, Hong-Fei Guan, Chuan-Jun Tang, Yun-Ze Gao, Wei Lu, Sheng-Bo Ye, Hai-Dong Han, Jin Zheng, Shu-Zhi. Lunar Penetrating Radar onboard the Chang'e-3 mission // *Res. Astron. Astrophys.* — 2014. — **14**, N 12. — P. 1607—1622.
39. Hapke B. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993. — 450 pp.
40. Hapke B. Space weathering from Mercury to the asteroid belt // *J. Geophys. Res.* — 2001. — **106**. — P. 10,039—10,073.
41. Hauria E. Y., Saal A. T., Rutherford M. J., Van Orman J. A. Water in the Moon's interior: Truth and consequences // *Earth and Planet. Sci. Lett.* — 2015. — **409**. — P. 252—264.
42. Henyey L. C., Greenstein J. L. Diffuse radiation in the galaxy // *Astrophys. J.* — 1941. — **93**. — P. 70—83.
43. Horanyi M., Walch B., Robertson S., Alexander D. Electrostatic charging properties of Apollo 17 lunar dust // *J. Geophys. Res.* — 1998. — **103E**, N 4. — P. 8575—8580.
44. Howell K. C. Three-dimensional periodic halo orbits // *Celest. Mech.* — 1984. — **32**, N 1. — P. 53—71.
45. Irvine W. M. Multiple scattering by large particles // *Astrophys. J.* — 1965. — **4**. — P. 1563—1575.
46. Jeong M., Choi Y.-J., Kim S. S., Kang K.-I., Shkuratov Y. G., Kaydash V. G., Videen G., Sim C. K., Kim I.-H., Preliminary Design of Wide-Angle Polarimetric Camera for the First Korean Lunar Mission // *3rd Planetary Data Workshop.* — 2017. — LPI Contrib. N 1986. — 7035.pdf.
47. Jester S., Falcke H. Science with a lunar low-frequency array: from the dark ages of the Universe to nearby exoplanets // *New Astron. Rev.* — 2009. — **53**. — P. 1—26.

48. Jin Weidong, Zhang Hao, Yuan Ye, Yang Yazhou, Lucey Paul, Shkuratov Yuriy, Kaydash Vadim, Zhu Meng-Hua, Xue Bin, Di Kaichang, Wan Wenhui, Xu Bin, Xiao Long, Wang Ziwei. In-situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 2. Photometric properties of the regolith // *Geophys. Res. Lett.* — 2015. — **42**, N 20. — P. 8312—8319.
49. Kaiser M. L. A low-frequency radio survey of the planets with RAE-2 // *J. Geophys. Res.* — 1977. — **82**. — P. 1256—1260.
50. Kaydash V., Shkuratov Y., Korokhin V., Videen G. Photometric anomalies in the Apollo landing sites as seen from the Lunar Reconnaissance Orbiter // *Icarus*. — 2011. — **211**. — P. 89—96.
51. Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G., Phase-ratio imagery as a tool of lunar remote sensing // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* — 2012. — **113**, N 18. — P. 2601—2607.
52. Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G. Landing of the probes Luna 23 and Luna 24 remains an enigma // *Planet. and Space Sci.* — 2013. — **89**. — P. 172—182.
53. Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G. Dark halos and rays of young lunar craters: A new insight into interpretation // *Icarus*. — 2014. — **231**. — P. 22—33.
54. Keller J. W., Petro N. E., Vondrak R. R., and the LRO team. The Lunar Reconnaissance Orbiter Mission — Six years of science and exploration at the Moon // *Icarus*. — 2016. — **273**. — P. 2—24.
55. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Kalinichenko N. N., Gridin A. A., Bubnov I. V., Lecacheux A., Rosolen C., Rucker H. O. Thirty-elements active antenna array as a prototype of a huge low-frequency radio telescope // *Exp. Astron.* — 2003. — **16**, N 3. — P. 149—164.
56. Konovalenko A. A., Sodin L. G. Neutral 14N in the interstellar medium // *Nature*. — 1980. — **283**. — P. 360—361.
57. Konovalenko A. A., Sodin L. G. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A // *Nature*. — 1981. — **294**. — P. 135—136.
58. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvnenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Grieß-Meier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT // *Exp. Astron.* — 2016. — **42**, N 1. — P. 11—48.
59. Konovalenko A. A., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., Lecacheux A., Mann G., Bougeret J.-L., Kaiser M. L., Briand C., Zarka P., Abranin E. P., Dorovsky V. V., Koval A. A., Mel'nik V. N., Mukha D. V., Panchenko M. Synchronized observations by using the STEREO and the largest ground-based decametre radio telescope // *Exp. Astron. Astrophys. Instrument. Methods.* — 2013. — **36**, N 1—2. — P. 137—154.
60. Konovalenko A. A., Stepkin S. V. Radio recombination lines // In: *Radio Astronomy from Karl Jansky to Microjansky* / Eds L. Gurvits, S. Frey, S. Rawlings. — Budapest: EAS Publ. Ser., 2005. — 15. — P. 271—295.
61. Konovalenko O. O., Tokarsky P. L., Yerin S. N. Effective area of phased antenna array of GURT radio telescope // *Proc. of the VII-th Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'14)*. — Kharkiv, Ukraine, 2014. — P. 25—29.
62. Litvinenko G. V., Shaposhnikov V. E., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Panchenko M., Dorovsky V. V., Brazhenko A. I., Rucker H. O., Vinogradov V. V., Melnik V. N. Quasi-similar decameter emission features appearing in the solar and jovian dynamic spectra // *Icarus*. — 2016. — **272**. — P. 80—87.
63. Liu Y., Park J. S., Schnare D., Hill E., Taylor L. A. Characterization of lunar dust for toxicological studies. II: Texture and shape characteristics // *J. Aerospace Eng.* — 2008. — **21**, N 4. — P. 272—279.
64. Louis C., Lamy L., Zarka P., Cecconi B., Hess S. L. Detection of Jupiter decametric emissions controlled by Europa and Ganymede with Voyager/PRA and Cassini/RPWS // *J. Geophys. Res. Space Phys.* — 2017. — **122**, N 9. — P. 9228—9247.
65. Lucey P., Taylor G., Malaret E. Abundance and distribution of iron on the Moon // *Science*. — 1995. — **268**. — P. 1150—1153.
66. Lynn V. L., Sohigian M. D., Crocker E. A. Radar observations of the Moon at a wavelength of 8.6 millimeters // *J. Geophys. Res.* — 1964. — **69**, N 4. — P. 781—783.
67. Managadze G. G., Cherepin V. T., Shkuratov Y. G., Kolesnik V. N., Chumikov A. E. Simulating of OH/H₂O formation by solar wind at the lunar surface // *Icarus*. — 2011. — **215**, N 1. — P. 449—451.
68. McCoy J. E., Criswell D. R. Evidence for a high altitude distribution of lunar dust // *Proc. Lunar Sci. Conf. 5th.* — LPI Houston, 1974. — P. 2991—3005.
69. Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Abranin E. P., Dorovsky V. V., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., Lecacheux A. Solar sporadic radio emission in the decametre waveband // *Astron. and Astrophys. Trans.* — 2005. — **24**, N 5. — P. 391—401.
70. Mimoun D., Wiczeorek M. A., Alkalai L., Banerdt W. B., Baratoux D., Bougeret J.-L., Bouley S., Cecconi B., Falcke H.,

- Flohrer J., Garcia R. F., Grimm R., Grott M., Gurvits L., Jaumann R., Johnson C. L., Knapmeyer M., Kobayashi N., Konovalenko A., Lawrence D., Le Feuvre M., Lognonné Ph., Neal C., Oberst J., Olsen N., Röttgering H., Spohn T., Vennerstrom S., Woan Gr., Zarka Ph. Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the moon // *Exp. Astron.* — 2012. — **33**, N 2–3. — P. 529–585.
71. Mitrofanov I. G., Zelenyi L. M., Tretyakov V. I. Upgraded program of Russian lunar landers: studying of lunar poles // *Proc. Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group.* — LPI Contrib., 2012. — N 1685. — 3025.
 72. Ono T., Oya H. Lunar Radar Sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft // *Earth, Planets and Space.* — 2000. — **52**. — P. 629–637.
 73. Park J. S., Liu Y., Kihm K. D., Taylor L. A. Characterization of lunar dust for toxicological studies. I: Particle size distribution // *J. Aerospace Eng.* — 2008. — **21**, N 4. — P. 266–271.
 74. Petrov D., Shkuratov Y., Videen G. Analytical light-scattering solution for Chebyshev particles // *J. Opt. Soc. Amer.* — 2007. — **A24**, N 4. — P. 1103–1119.
 75. Petrov D., Shkuratov Y., Videen G. Electromagnetic wave scattering from particles of arbitrary shapes // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* — 2011. — **112**, N 11. — P. 1636–1645.
 76. Pieters C. M., Goswami J. N., Clark R. N., and the M3 Science Team. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1 // *Science.* — 2009. — **326**. — P. 568–572.
 77. Pieters C., Shkuratov Y., Kaydash V., Stankevich D., Taylor L. Lunar soil characterization consortium analyses: pyroxene and maturity estimates derived from Clementine image data // *Icarus.* — 2006. — **184**. — P. 83–101.
 78. Pinet P. C., Shevchenko V. V., Chevrel S. D., Daydou Y., Rosemberg C. Local and regional lunar regolith characteristics at Reiner Gamma Formation: Optical and spectroscopic properties from Clementine and Earth-based data // *J. Geophys. Res. Planets.* — 2000. — **105E**, N 4. — P. 9457–9475.
 79. Pritchard J. R., Loeb A. Constraining the unexplored period between the dark ages and reionization with observations of the global 21 cm signal // *Phys. Rev. D-Part. and Fields.* — 2010. — **82**. — 023006.
 80. Popel S. I., Zelenyi L. M. Dusty plasmas over the Moon // *J. Plasma Phys.* — 2014. — **80**, N 6. — P. 885–893.
 81. Rennilson J. J., Criswell D. R. Surveyor observations of lunar horizon-glow // *The Moon.* — 1974. — **10**. — P. 121–142.
 82. Robinson M. S., Brylow S. M., Tschimmel M., Humm D., Lawrence S. J., Thomas P. C., Denevi B. W., Bowman-Cisneros E., Zerr J., Ravine M. A., Caplinger M. A., Ghaemi F. T., Schaffner J. A., Malin M. C., Mahanti P., Bartels A., Anderson J., Tran T. N., Eliason E. M., McEwen A. S., Turtle E., Jolliff B. L., Hiesinger H. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) instrument overview // *Space Sci. Rev.* — 2010. — **150**. — P. 81–124.
 83. Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R., Vinogradov V. V., Denis L. A low-noise, high-dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz // *Astron. and Astrophys.* — 2010. — **510**. — id. A16.
 84. Ryabov V. B., Zarka P., Hess S., Konovalenko A., Litvinenko G., Zakharenko V., Shevchenko V. A, Cecconi B. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions // *Astron. and Astrophys.* — 2014. — **568**. — id. A53.
 85. Schmitt H. H. Return to the Moon: Exploration, Enterprise, and Energy in the Human Settlement of Space. — Copernicus books, NY: Springer-Verlag, 2006.
 86. Scolnik M. I. Radar Handbook. — New York: McGraw-Hill Book Company, 1989.
 87. Severny A. B., Terez E. I., Zvereva A. M. The measurements of sky brightness on Lunokhod-2 // *The Moon.* — 1975. — **14**. — P. 123–128.
 88. Shkuratov Y., Starukhina L., Kreslavsky M., Opanasenko N., Stankevich D., Shevchenko V. Principle of perturbation invariance in photometry of atmosphereless celestial bodies // *Icarus.* — 1994. — **109**. — P. 168–190.
 89. Shkuratov Y., Lytvynenko L., Shulga V., Yatskiv Y., Vidmachenko A., Kislyuk V., Objectives of a prospective Ukrainian orbiter mission to the moon // *Adv. Space Res.* — 2003. — 31, N 11. — P. 2341–2345.
 90. Shin-ichi Sobue, Hayato Okumura, Susumu Sasaki, Manabu Kato, Hironori Maejima, Hiroyuki Minamino, Satoru Nakazawa, Hisashi Otake, Naoki Tateno, Hisashi Konishi, Katsuhide Yonekura, Hoshino Hirokazu, Jun Kimura. The project highlight of Japan's Lunar Explorer Kaguya (SELENE) // *Lunar Planet. Sci. Conf. 40th.* — LPI Houston, 2009. — 1224.pdf.
 91. Shkuratov Y., Kaydash V., Korokhin V., Velokodsky Y., Opanasenko N., Videen G. Optical measurements of the Moon as a tool to study its surface // *Planet. and Space Sci.* — 2011. — **59**. — P. 1326–1371.
 92. Shkuratov Y., Kaydash V., Sysolyatina X., Razim A., Videen G. Lunar surface traces of engine jets of Soviet sample return probes: the enigma of the Luna-23 and Luna-24 landing sites // *Planet. and Space Sci.* — 2013. — **75**. — P. 28–36.
 93. Shkuratov Y., Kaydash V., Videen G. The crater Giordano Bruno as seen with optical roughness imagery // *Icarus.* — 2012. — **218**, N 1. — P. 525–533.
 94. Shkuratov Y. G., Stankevich D. G., Petrov D. V., Pinet P. C., Cord A. M., Daydou Y. H. Interpreting photometry of regolith-like surfaces with different topographies: shadowing and multiple scatter // *Icarus.* — 2005. — **173**. — P. 3–15.
 95. Stanislavsky A., Konovalenko A., Rucker H., Abranin E., Kaiser M., Dorovskyy V., Mel'nik V., Lecacheux A. Antenna

- performance analysis for decameter solar radio observations // *Astron. Nachr.* — 2009. — **330**. — P. 691–697.
96. *Stankevich D., Shkuratov Y.* Monte Carlo ray-tracing simulation of light scattering in particulate media with optically contrast structure // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* — 2004. — **87**, N 3–4. — P. 289–296.
 97. *Starukhina L. V., Shkuratov Y. G.* The lunar poles: water ice or chemically trapped hydrogen? // *Icarus.* — 2000. — **147**. — P. 585–587.
 98. *Starukhina L. V., Shkuratov Y. G.* Swirls on the Moon and Mercury: meteoroid swarm encounters as a formation mechanism // *Icarus.* — 2004. — **167**, N 1. — P. 136–147.
 99. *Stepkin S. V., Konovalenko A. A., Kantharia N. G., Udaya Shankar N.* Radio recombination lines from the largest bound atoms in space // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 2007. — **374**, N 3 — P. 852–856.
 100. *Stubbs T., Vondrak R., Farrell W. A* Dynamic fountain model for lunar dust // *Lunar Planet. Sci.* — 2005. — **36**. — (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2005/pdf/1899.pdf>).
 101. *Sun Huixian, Wu Ji, Dai Shuwu, Zhao Baochang, Shu Rong, Chang Jin, Wang Huanyu, Zhang Xiaohui, Ren Qiongying, Chen Xiaomin, Ouyang Ziyuan, Zou Yongliao.* Introduction to the payloads and the initial observation results of Chang'E-1 // *Chin. J. Space Sci.* — 2008. — **28**, N 5. — P. 374–384.
 102. *Sunshine J. M., Farnham T. L., Feaga L. M., Groussin O., Merlin F., Milliken R. E., A'Hearn M. F.* Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the Deep Impact Spacecraft // *Science.* — 2009. — **326**. — P. 565–568.
 103. *Taylor L.* Helium-3 on the Moon: model assumptions and abundances // *Eng. Constr. and Operations in Space IV, ASCE Publication, Proceedings of Space.* — 1994. — **94**. — P. 678–686.
 104. *Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., Yerin S. N.* Sensitivity of an active antenna array element for the low-frequency radio telescope GURT // *IEEE Trans. on Antennas and Propag.* — 2017. — **65**, N 9. — P. 4636–4644.
 105. *Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Seredkina A. A.* Polarization sounding of the pulsar magnetosphere // *Proc. of the International Astronomical Union.* — 2012. — **8**, N S291. — P. 530–532.
 106. *Ulyanov O. M., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A., Lecacheux A., Rosole C., Rucker H. O.* Detection of individual pulses from pulsars B0809+ 74; B0834+ 06; B0950+ 08; B0943+ 10; B1133+ 16 in the decameter waves range // *Radio Phys. and Radio Astron.* — 2006. — **11**. — P. 113–133.
 107. *Vaniman D., French B., Heiken G.* Afterword // *Lunar Sourcebook / Eds G. H. Heiken, D. T. Vaniman, B. M. French.* — NY: Cambridge University Press, 1991. — P. 633–641 (Chapter 11).
 108. *Vasilyev O. Y., Kuzin A. I., Kravtsov A. A., Bulakh E. V., Vynogradov V. V., Vavriv D.M.* Multifunctional digital receiver-spectrometer // *Radio Phys. and Radio Astron.* — 2014. — **19**, N 3. — P. 276–289.
 109. *Vondrak R., Keller J., Russell C.* (Eds) *Lunar Reconnaissance Orbiter Mission.* — NY: Springer, 2010. — 302 p.
 110. *Walmsley C. M., Watson W. D.* The influence of dielectric-like recombination at low temperatures on the interpretation of interstellar, radio recombination lines of carbon // *Astrophys. J.* — 1982. — **260**. — P. 317–325.
 111. *Wittenberg L., Santarius J., Kulchinski G.* Lunar source of ³He for fusion power // *Fusion Technol.* — 1986. — **10**. — P. 167–178.
 112. *Yan Su, Guang-You Fang, Jian-Qing Feng, Shu-Guo Xing, Yi-Cai Ji, Bin Zhou, Yun-Ze Gao, Han Li, Shun Dai, Yuan Xiao and Chun-Lai Li* Data processing and initial results of Chang'e-3 lunar penetrating radar // *Res. Astron. Astrophys.* — 2014. — **14**, N 12. — P. 1623–1632.
 113. *Yocky D. A., Wahl D. E., Jakowarż C. V. (Jr.)* Terrain elevation mapping results from airborne spotlight-mode coherent cross-track SAR stereo // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* — 2004. — **42**. — P. 301–308.
 114. *Zakharenko V. V.* Sporadic radio emissions from celestial sources: studies at decameter wavelengths // *Radio Phys. and Radio Astron.* — 2011. — **2**, N 4. — P. 287–298.
 115. *Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovsky V., Shepelev V.* Digital receivers for low-frequency radio telescopes UTR-2, URAN, GURT // *J. Astron. Instrument.* — 2016. — **5**, N 04. — id.1641010.
 116. *Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Fischer G., Konovalenko A. A., Zarka P., Grießmeier J.-M., Ryabov B. P., Vavriv D. M., Ryabov V. B., Rucker, H., Ravier P., Sidorchuk M. A., Cecconi, B., Coffre A., Denis L., Fabrice C., Kozhyn R. V., Mukha D. V., Pallier L., Schneider J., Shevchenko V. A., Vinogradov V. V., Weber R., Nikolaenko V. S.* Identification of Saturn lightnings recorded by the UTR-2 radio telescope and Cassini spacecraft // *Radio Phys. and Radio Astron.* — 2011. — **2**, N 2. — P. 93–98.
 117. *Zakharenko V., Mylostna K., Konovalenko A., Kolyadin V., Zarka P., Grießmeier J.-M., Litvinenko G., Sidorchuk M., Rucker H., Fischer G., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Shevchenko V., Nikolaenko V.* Search and study of electrostatic discharges in the Solar System with the radio telescope UTR-2 // *Europ. Planet. Sci. Congress, 23–28 September 2012. Madrid, Spain.* — 2012. — id. EP-SC2012-186. Available from: <http://meetings.copernicus.org/epsc2012>.
 118. *Zakharenko V. V., Nikolaenko V. S., Ulyanov O. M., Motiyenko R. A.* A high time resolution receiver for radio emission investigation // *Radio Phys. and Radio Astron.* — 2007. — **12**, N 3. — P. 233–242.
 119. *Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Konovalenko A. A., Ulyanov O. M., Serylak M., Zarka P., Grießmeier J. M., Cognard I., Nikolaenko V. S.* Detection of decametre-

- wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 2013. — **431**, N 4. — P. 3624—3641.
120. Zarka P., Bougeret J.-L., Briand C., Cecconi B., Falcke H., Girard J., Grießmeier J.-M., Hess S., Klein-Wolt M., Konovalenko A., Lamy L., Mimoun D., Aminaei A. Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the Moon // *Planet. Space Sci.* — 2012. — **74**. — P. 156—166.
121. Zebker H. A., Goldstein R. M. Topographic mapping from interferometric SAR observations // *J. Geophys. Res.* — 1986. — **91B**, N 5. — P. 4993—4999.
122. Zhang Hao, Yang Yazhou, Jin Weidong, Yuan Ye, Lucey Paul, Zhu Meng-Hua, Kaydash Vadim, Shkuratov Yuriy, Di Kaichang, Wan Wenhui, Xu Bin, Xiao Long, Wang Ziwei, Xue Bin. In-situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: I. Mineral abundances inferred from spectral reflectance // *Geophys. Res. Lett.* — 2015. — **42**, N 17. — P. 6945—6950.
123. Zook H., Potter A., Cooper B. The lunar dust exosphere and Clementine lunar horizon glow // *Lunar Planet. Sci.* — 1995. — **26**. — P. 1577—1578.
124. Zubko E., Shkuratov Yu., Kiselev N., Videen G. DDA simulations of light scattering by small irregular particles with various structure // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* — 2006. — **101**. — P. 416—434.
125. Zubko E., Shkuratov Yu., Mishchenko M., Videen G. Light scattering in a finite multi-particle system // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* — 2008. — **109**. — P. 2195—2206.
126. Zubko E., Weinberger A., Zubko N., Shkuratov Y., Videen G. Umov effect in single-scattering dust particles: Effect of irregular shape // *Opt. Lett.* — 2017. — **42**, N 10. — P. 1962—1965.
3. Konovalenko A. A., Yerin S. M., Bubnov I. M., Tokarsky P. L., Zakharenko V. V., Ulyanov O. M., Sidorchuk M. A., Stepkin S. V., Gridin A. O., Kvasov G. V., Koliadin V. L., Melnik V. M., Dorovskyy V. V., Kalinichenko M. M., Litvinenko G. V., Zarka P., Denis L., Girard J., Rucker H. O., Panchenko M., Stanislavsky A. A., Khristenko O. D., Mukha D. V., Reznichenko O. M., Lisachenko V. M., Bortsov V. V., Brazhenko A. I., Vasylieva I. Y., Skoryk A. O., Shevtsova A. I., Mylostna K. Y. Astrofizicheskie issledovaniya s pomosh'yu malorazmernykh nizkochastotnykh radioteleskopov novogo pokoleniya [Astrophysical studies with small low-frequency radio telescopes of new generation]. *Radiofizika i radioastronomia*, **21** (2), 83—131 (2016) [in Russian].
4. Mylostna K. Y., Zakharenko V. V. Poisk i issledovanie grozovoi aktivnosti na Saturne i drugikh planetakh Solnechnoi sistemy [Search and study of storm activity on Saturn and other planets of the Solar system]. *Radiofizika i radioastronomia*, **18** (1), 12—25 (2013) [in Russian].
5. Mylostna K. Y., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A., Fischer G., Zarka P., Sidorchuk M. A. Tonkaa vremennaa structura molnii na Saturne [Fine time structure of lightnings on Saturn]. *Radiofizika i radioastronomia*, **19** (1), 10—19 (2014) [in Russian].
6. Shkuratov Y. G., Kislyuk V. S., Lytvynenko L. N., Yatskiv Y. S. Model' Luny dlya proekta «Ukrselena» [Model of the Moon for the project “Ukr selene”]. *Kosm. nauka tehnol., Dodatok*, **10** (2), 3—51 (2004) [in Russian].
7. Abranin E. P., Bruck Yu. M., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A. The new preamplification system for the UTR-2 radio telescope. *Exp. Astron.*, **11** (2), 85—112 (2001).
8. Alexander J. K., Kaiser M. L., Novaco J. C., Grena F. R., Weber R. R. Scientific instrumentation of the Radio-Astronomy-Explorer-2 satellite. *Astron. and Astrophys.*, **40**, 365—371 (1975).
9. Arnold J. R. Ice in the lunar polar regions. *J. Geophys. Res.*, **84**, 5659—5668 (1979).
10. Bass F. G., Fuks I. M. Wave scattering from statistically rough surfaces. (Pergamon Press, Oxford, New York, 1979).
11. Bell M. E., Murphy Tara, Johnston S., Kaplan D. L., Croft S., Hancock P., Callingham J. R., Zic A., Dobie D., Swiggum J. K., Rowlinson A., Hurley-Walker N., Oftringa A. R., Bernardi G., Bowman J. D., Briggs F., Cappallo R. J., Deshpande A. A., Gaensler B. M., Greenhill L. J., Hazelton B. J., Johnston-Hollitt M., Lonsdale C. J., McWhirter S. R., Mitchell D. A., Morale M. F. S., Morgan E., Oberoi D., Ord S. M., Prabu T., Shankar N. Udaya, Srivani K. S., Subrahmanyam R., Tingay S. J., Wayth R. B., Webster R. L., Williams A., Williams C. L. Time-domain and spectral properties of pulsars at 154 MHz. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **461** (1), 908—921 (2016).
12. Bezvesilnyi O. O., Dukhopelnykova I. V., Vinogradov V. V., Vavriv D. M. Retrieving 3-D topography by using a sin-

Стаття надійшла до редакції 21.12.17

REFERENCES

1. Abranin E. P., Bruck Yu. M., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A. Structura s parametry novoi sistemy antennogo usilenia radioteleskopa UTR-2 [Structure and parameters of new system of antenna amplification of radio telescope UTR-2]. *Radiofizika i radioastronomia*, **2** (1), 95—102 (1997) [in Russian].
2. Dorovskyy V. V., Melnyk V. M., Konovalenko A. A., Bubnov I. N., Gridin A. A., Shevchuk N. V., Falkovych I. S., Koval A. A., Rutkevych B. P., Reznik A. P., Rucker H. O., Panchenko M., Belov A. S., Khrystenko A. D., Kvasov G. V., Yerin S. N. Nabludeniya solnechnogo U-vspleska v polose chastot 10—70 MHz s ispol'zovaniem radioteleskopa GURT [Observations of the type U burst in with in 10—70 MHz with the GURT radio telescope]. *Radiofizika i radioastronomia*, **18** (2), 101—106 (2013) [in Russian].

- gle-antenna squint-mode airborne SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **45** (11), 3574–3582 (2007).
13. Bezvesilniy O. O., Vynogradov V. V., Vavriv D. M. High-accuracy doppler measurements for airborne SAR applications. *Proc. 5th European Radar Conf. October 2008*. P. 29–32 (Amsterdam, The Netherlands, 2008).
 14. Blewett D. T., Lucey P. G., Hawke B. R., Jolliff B. L. Clementine images of the lunar sample-return stations: refinement of FeO and TiO₂ mapping techniques. *J. Geophys. Res.*, **102** (16), 319–325 (1997).
 15. Braude S. Ya., Megn A. V., Ryabov B. P., Sharykin N. K., Zhouk I. N. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. I. The UTR-2 Radio Telescope. Experimental techniques and data processing. *Astrophys. and Space Sci.*, **54**(1), 3–36 (1978).
 16. Burns J. O., Duric N., Taylor G. J., Johnson S. W. Observatories on the Moon. *Sci. Amer.*, **262**, 18–25 (1990).
 17. Burns R. Mineralogical applications of crystal field theory. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1993).
 18. Bussey D. B., Spudis P. D., Nozette S., Lichtenberg C. L., Raney R. K., Marinelli W., Winters H. L. Mini-RF: Imaging radars for exploring the lunar poles. *Lunar Planet. Sci. Conf. 39th*. (LPI Houston, 2008).
 19. Ceconi B. Goniopolarimetric techniques for low-frequency radio astronomy in space. Huber M. C. E., Pauluhn A., Culhane J. L., Timothy J. G., Wilhelm K., Zehnder A. (Eds). *Observing Photons in Space. ISSI Scientific Reports Ser. P. 263–277* (Springer, 2010).
 20. Chertok B. Rockets and people. *The Moon Race. NASA SP-2011-4110*. (Washington, DC., 2011).
 21. Clark R. N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon. *Science*, **326**, 562–564 (2009).
 22. Condoleo E., Cinelli M., Ortore E., Circi C. Stable orbits for lunar landing assistance. *Adv. Space Res.*, **60** (7), 1404–1412 (2017).
 23. Crawford I., Joy K. Lunar exploration: opening a window into the history and evolution of the inner Solar System. *Phil. Trans. Roy. Soc. London A.*, **372**, id. 20130315 (2014).
 24. Crawford I. A., Zarnecki J. Astronomy from the Moon. *Astron. Geophys.*, **49**, 2.17–2.19 (2008).
 25. Crider D. H., Vondrak R. R. The solar wind as a possible source of lunar polar hydrogen deposits. *J. Geophys. Res.*, **105**, 26773–26782 (2000).
 26. Dessler A. J. Jupiter's magnetic field and magnetosphere. Dessler. A. J. (Ed). *Physics of the Jovian magnetosphere P. 1–50* (Cambridge University Press, Cambridge, 1983).
 27. Dyar M. D., Hibbitts C. A., Orlando T. M. Mechanisms for incorporation of hydrogen in and on terrestrial planetary surfaces. *Icarus*, **208**, 425–437 (2010).
 28. Evans J. V., Pettengill G. H. The radar cross-section of the Moon. *J. Geophys. Res.*, **68**(17), 5098–5099 (1963).
 29. Falkovich I. S., Konovalenko A. A., Gridin A. A., Sodin L. G., Bubnov I. N., Kalinichenko N. N., Rashkovskii S. L., Mukha D. V., Tokarsky P. L. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy. *Exp. Astron.*, **32** (2), 127–145 (2011).
 30. Fischman M.A. Sensitivity of a 1.4 GHz Direct-Sampling Digital Radiometer. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **37** (5), 2172–2180 (1999).
 31. Fisher G., Kurth W. S., Gurnett D. A., Zarka P., Dyudina U. A., Ingersoll A. P., Ewald S. P., Porco C. C., Wesley A., Go C., Delcroix M. A giant thunderstorm on Saturn. *Nature*, **475** (7354), 75–77 (2011).
 32. Freeman J. W., Ibrahim B. Lunar electric fields, surface potential and associated plasma sheets. *The Moon*, **14**, 103–114 (1975).
 33. Furlanetto S. R., Peng O. S., Briggs F. H. Cosmology at low frequencies: The 21 cm transition and the high-redshift Universe. *Phys. Repts.*, **433** (4–6), 181–301 (2006).
 34. Garrick-Bethell I., Head J. W., Pieters C. M. Spectral properties, magnetic fields, and dust transport at lunar swirls. *Icarus*, **212**, 480–492 (2011).
 35. Gault D. E., Adams J. B., Collins R. J., Kuiper G. P., O'Keefe J. A., Phinney R. A., Shoemaker E. M. Lunar theory and processes: Post-sunset horizon "Afterglow". *Icarus*, **12**, 230–232 (1970).
 36. Gordon M. A., Sorochenko R. L. *Radio Recombination Lines: Their Physics and Astronomical Application*. (Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 2002).
 37. Goswami J. N., Annadurai M. Chandrayaan-1: India's first planetary science mission to the Moon. *Curr. Sci.*, **96** (4), 486–491 (2009).
 38. Guang-You Fang, Bin Zhou, Yi-Cai Ji, Qun-Ying Zhang, Shao-Xiang Shen, Yu-Xi Li, Hong-Fei Guan, Chuan-Jun Tang, Yun-Ze Gao, Wei Lu, Sheng-Bo Ye, Hai-Dong Han, Jin Zheng, Shu-Zhi, Lunar Penetrating Radar onboard the Chang'e-3 mission. *Res. Astron. Astrophys.*, **14** (12), 1607–1622 (2014).
 39. Hapke B. *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1993).
 40. Hapke B. Space weathering from Mercury to the asteroid belt. *J. Geophys. Res.*, **106**, 10,039–10,073 (2001).
 41. Hauria E. Y., Saal A. T., Rutherford M. J., Van Orman J. A. Water in the Moon's interior: Truth and consequences. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **409**, 252–264 (2015).
 42. Henyey L. C., Greenstein J. L. Diffuse radiation in the galaxy. *Astrophys. J.*, **93**, 70–83 (1941).
 43. Horanyi M., Walch B., Robertson S., Alexander D. Electrostatic charging properties of Apollo 17 lunar dust. *J. Geophys. Res.*, **103E** (4), 8575–8580 (1998).
 44. Howell K. C. Three-dimensional periodic halo orbits. *Celest. Mech.*, **32** (1), 53–71 (1984).
 45. Irvine W. M. Multiple scattering by large particles. *Astrophys. J.*, **4**, 1563–1575 (1965).
 46. Jeong M., Choi Y.-J., Kim S. S., Kang K.-I., Shkuratov Y. G., Kaydash V. G., Videen G., Sim C. K., Kim I.-H., Preliminary Design of Wide-Angle Polarimetric Camera for

- the First Korean Lunar Mission. *3rd Planetary Data Workshop. LPI Contrib. N 1986* (2017), 7035.pdf.
47. Jester S., Falcke H. Science with a lunar low-frequency array: from the dark ages of the Universe to nearby exoplanets. *New Astron. Rev.*, **53**, 1–26 (2009).
 48. Jin Weidong, Zhang Hao, Yuan Ye, Yang Yazhou, Lucey Paul, Shkuratov Yuriy, Kaydash Vadim, Zhu Meng-Hua, Xue Bin, Di Kaichang, Wan Wenhui, Xu Bin, Xiao Long, Wang Ziwei. In-situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 2. Photometric properties of the regolith. *Geophys. Res. Lett.*, **42** (20), 8312–8319 (2015).
 49. Kaiser M. L. A low-frequency radio survey of the planets with RAE-2. *J. Geophys. Res.*, **82**, 1256–1260 (1977).
 50. Kaydash V., Shkuratov Y., Korokhin V., Videen G. Photometric anomalies in the Apollo landing sites as seen from the Lunar Reconnaissance Orbiter. *Icarus*, **211**, 89–96 (2011).
 51. Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G., Phase-ratio imagery as a tool of lunar remote sensing. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.*, **113** (18), 2601–2607 (2012).
 52. Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G. Landing of the probes Luna 23 and Luna 24 remains an enigma. *Planet. and Space Sci.*, **89**, 172–182 (2013).
 53. Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G. Dark halos and rays of young lunar craters: A new insight into interpretation. *Icarus*, **231**, 22–33 (2014).
 54. Keller J. W., Petro N. E., Vondrak R. R., and the LRO team. The Lunar Reconnaissance Orbiter Mission — Six years of science and exploration at the Moon. *Icarus*, **273**, 2–24 (2016).
 55. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Kalinichenko N. N., Gridin A. A., Bubnov I. V., Lecacheux A., Rosolen C., Rucker H. O. Thirty-elements active antenna array as a prototype of a huge low-frequency radio telescope. *Exp. Astron.*, **16** (3), 149–164 (2003).
 56. Konovalenko A. A., Sodin L. G. Neutral 14N in the interstellar medium. *Nature*, **283**, 360–361 (1980).
 57. Konovalenko A. A., Sodin L. G. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A. *Nature*, **294**, 135–136 (1981).
 58. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Grieb-Meier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.*, **42** (1), 11–48 (2016).
 59. Konovalenko A. A., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., A. Lecacheux, G. Mann, J.-L. Bougeret, M. L. Kaiser, C. Briand, P. Zarka, E. P. Abranin, V. V. Dorovsky, A. A. Koval, V. N. Mel'nik, D. V. Mukha, M. Panchenko et al. Synchronized observations by using the STEREO and the largest ground-based decametre radio telescope. *Exp. Astron. Astrophys. Instrument. Methods*, **36** (1–2), 137–154 (2013).
 60. Konovalenko A.A., Stepkin S.V. Radio recombination lines . In: Radio Astronomy from Karl Jansky to Microjansky. Eds L. Gurvits, S. Frey, S. Rawlings. — Budapest: EAS Publ. Ser., **15**, 271–295 (2005).
 61. Konovalenko O. O., Tokarsky P. L., Yerin S. N. Effective area of phased antenna array of GURT radio telescope. *Proc. of the VII-th Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'14)*. P. 25–29 (Kharkiv, Ukraine, 2014).
 62. Litvinenko G. V., Shaposhnikov V. E., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Panchenko M., Dorovsky V. V., Brazhenko A. I., Rucker H. O., Vinogradov V. V., Melnik V. N. Quasi-similar decameter emission features appearing in the solar and jovian dynamic spectra. *Icarus*, **272**, 80–87 (2016).
 63. Liu Y., Park J. S., Schnare D., Hill E., Taylor L. A. Characterization of lunar dust for toxicological studies. II: Texture and shape characteristics. *J. Aerospace Eng.*, **21** (4), 272–279 (2008).
 64. Louis C., Lamy L., Zarka P., Cecconi B., Hess S. L. Detection of Jupiter decametric emissions controlled by Europa and Ganymede with Voyager/PRA and Cassini/RPWS. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **122** (9), 9228–9247 (2017).
 65. Lucey P., Taylor G., Malaret E. Abundance and distribution of iron on the Moon. *Science*, **268**, 1150–1153 (1995).
 66. Lynn V. L., Sohigian M. D., Crocker E. A. Radar observations of the Moon at a wavelength of 8.6 millimeters. *J. Geophys. Res.*, **69** (4), 781–783 (1964).
 67. Managadze G. G., Cherepin V. T., Shkuratov Y. G., Kolesnik V. N., Chumikov A. E. Simulating of OH/H₂O formation by solar wind at the lunar surface. *Icarus*, **215** (1), 449–451 (2011).
 68. McCoy J. E., Criswell D. R. Evidence for a high altitude distribution of lunar dust. *Proc. Lunar Sci. Conf. 5th*. P. 2991–3005 (LPI Houston, 1974).
 69. Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Abranin E. P., Dorovsky V. V., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., Lecacheux A.

- Solar sporadic radio emission in the decametre waveband. *Astron. and Astrophys. Trans.* **24** (5), 391–401 (2005).
70. Mimoun D., Wieczorek M. A., Alkalai L., Banerdt W. B., Baratoux D., Bougeret J.-L., Bouley S., Cecconi B., Falcke H., Flohrer J., Garcia R. F., Grimm R., Grott M., Gurvits L., Jaumann R., Johnson C. L., Knapmeyer M., Kobayashi N., Konovalenko A., Lawrence D., Le Feuvre M., Lognonné Ph., Neal C., Oberst J., Olsen N., Röttgering H., Spohn T., Vennerstrom S., Woan Gr., Zarka Ph. Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the moon. *Exp. Astron.*, 33 (2–3), 529–585 (2012).
 71. Mitrofanov I. G., Zelenyi L. M., Tret'yakov V. I. Upgraded program of Russian lunar landers: studying of lunar poles. Proc. Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group. N 1685, P. 3025 (LPI Contrib., 2012).
 72. Ono T., Oya H. Lunar Radar Sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft. *Earth, Planets and Space*, 52, 629–637 (2000).
 73. Park J. S., Liu Y., Kihm K. D., Taylor L. A. Characterization of lunar dust for toxicological studies. I: Particle size distribution. *J. Aerospace Eng.*, 21 (4), 266–271 (2008).
 74. Petrov D., Shkuratov Y., Videen G. Analytical light-scattering solution for Chebyshev particles. *J. Opt. Soc. Amer.*, A24 (4), 1103–1119 (2007).
 75. Petrov D., Shkuratov Y., Videen G. Electromagnetic wave scattering from particles of arbitrary shapes. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.*, 112 (11), 1636–1645 (2011).
 76. Pieters C. M., Goswami J. N., Clark R. N., and the M3 Science Team. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1. *Science*, 326, 568–572 (2009).
 77. Pieters C., Shkuratov Y., Kaydash V., Stankevich D., Taylor L. Lunar soil characterization consortium analyses: pyroxene and maturity estimates derived from Clementine image data. *Icarus*, 184, 83–101 (2006).
 78. Pinet P. C., Shevchenko V. V., Chevrel S. D., Daydou Y., Rosemberg C. Local and regional lunar regolith characteristics at Reiner Gamma Formation: Optical and spectroscopic properties from Clementine and Earth-based data. *J. Geophys. Res. Planets*, 105E (4), 9457–9475 (2000).
 79. Pritchard J. R., Loeb A. Constraining the unexplored period between the dark ages and reionization with observations of the global 21 cm signal. *Phys. Rev. D-Part. and Fields*, 82, 023006 (2010).
 80. Popel S. I., Zelenyi L. M. Dusty plasmas over the Moon. *J. Plasma Phys.*, 80 (6), 885–893 (2014).
 81. Rennilson J. J., Criswell D. R. Surveyor observations of lunar horizon-glow. *The Moon*, 10, 121–142 (1974).
 82. Robinson M. S., Brylow S. M., Tschimmel M., Humm D., Lawrence S. J., Thomas P. C., Denevi B. W., Bowman-Cisneros E., Zerr J., Ravine M. A., Caplinger M. A., Ghaemi F. T., Schaffner J. A., Malin M. C., Mahanti P., Bartels A., Anderson J., Tran T. N., Eliason E. M., McEwen A. S., Turtle E., Jolliff B. L., Hiesinger H. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) instrument overview. *Space Sci. Rev.*, **150**, 81–124 (2010).
 83. Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R., Vinogradov V. V., Denis L. A low-noise, high-dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz. *Astron. and Astrophys.*, **510**, id. A16 (2010).
 84. Ryabov V. B., Zarka P., Hess S., Konovalenko A., Litvinenko G., Zakharenko V., Shevchenko V. A., Cecconi B. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions. *Astron. and Astrophys.*, **568**, id. A53 (2014).
 85. Schmitt H. H. Return to the Moon: Exploration, Enterprise, and Energy in the Human Settlement of Space (Springer-Verlag, Copernicus books, NY, 2006).
 86. Scolnik M. I. Radar Handbook (McGraw-Hill Book Company, New York, 1989).
 87. Severny A. B., Terez E. I., Zvereva A. M. The measurements of sky brightness on Lunokhod-2. *The Moon*, **14**, 123–128 (1975).
 88. Shkuratov Y., Starukhina L., Kreslavsky M., Opanasenko N., Stankevich D., Shevchenko V. Principle of perturbation invariance in photometry of atmosphereless celestial bodies. *Icarus*, **109**, 168–190 (1994).
 89. Shkuratov Y., Lytvynenko L., Shulga V., Yatskiv Y., Vidmachenko A., Kislyuk V., Objectives of a prospective Ukrainian orbiter mission to the moon. *Adv. Space Res.*, **31** (11), 2341–2345 (2003).
 90. Shin-ichi Sobue, Hayato Okumura, Susumu Sasaki, Manabu Kato, Hironori Maejima, Hiroyuki Minamino, Satoru Nakazawa, Hisashi Otake, Naoki Tateno, Hisashi Konishi, Katsuhide Yonekura, Hoshino Hirokazu, Jun Kimura. The project highlight of Japan's Lunar Explorer Kaguya (SELENE). *Lunar Planet. Sci. Conf. 40th.* (LPI Houston, 2009) 1224.pdf.
 91. Shkuratov Y., Kaydash V., Korokhin V., Velokodsky Y., Opanasenko N., Videen G. Optical measurements of the Moon as a tool to study its surface. *Planet. and Space Sci.*, **59**, 1326–1371 (2011).
 92. Shkuratov Y., Kaydash V., Sysolyatina X., Razim A., Videen G. Lunar surface traces of engine jets of Soviet sample return probes: the enigma of the Luna-23 and Luna-24 landing sites. *Planet. and Space Sci.*, **75**, 28–36 (2013).
 93. Shkuratov Y., Kaydash V., Videen G. The crater Giordano Bruno as seen with optical roughness imagery. *Icarus*, **218** (1), 525–533 (2012).
 94. Shkuratov Y. G., Stankevich D. G., Petrov D. V., Pinet P. C., Cord A. M., Daydou Y. H. Interpreting photometry of regolith-like surfaces with different topographies: shadowing and multiple scatter. *Icarus*, **173**, 3–15 (2005).

95. Stanislavsky A., Konovalenko A., Rucker H., Abranin E., Kaiser M., Dorovskyy V., Mel'nik V., Lecacheux A. Antenna performance analysis for decameter solar radio observations. *Astron. Nachr.*, **330**, 691–697 (2009).
96. Stankevich D., Shkuratov Y. Monte Carlo ray-tracing simulation of light scattering in particulate media with optically contrast structure. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.*, **87** (3–4), 289–296 (2004).
97. Starukhina L. V., Shkuratov Y. G., The lunar poles: water ice or chemically trapped hydrogen? *Icarus*, **147**, 585–587 (2000).
98. Starukhina L. V., Shkuratov Y. G. Swirls on the Moon and Mercury: meteoroid swarm encounters as a formation mechanism. *Icarus*, **167** (1), 136–147 (2004).
99. Stepkin S. V., Konovalenko A. A., Kantharia N. G., Udaya Shankar N. Radio recombination lines from the largest bound atoms in space. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **374** (3), 852–856 (2007).
100. Stubbs T., Vondrak R., Farrell W. A Dynamic fountain model for lunar dust. *Lunar Planet. Sci.*, 36 (2005). — Retrieved from <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2005/pdf/1899.pdf>.
101. Sun Huixian, Wu Ji, Dai Shuwu, Zhao Baochang, Shu Rong, Chang Jin, Wang Huanyu, Zhang Xiaohui, Ren Qiongying, Chen Xiaomin, Ouyang Ziyuan, Zou Yongliao. Introduction to the payloads and the initial observation results of Chang'E-1. *Chin. J. Space Sci.* **28** (5), 374–384 (2008).
102. Sunshine J. M., Farnham T. L., Feaga L. M., Groussin O., Merlin F., Milliken R. E., A'Hearn M. F. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the Deep Impact Spacecraft. *Science* **326**, 565–568 (2009).
103. Taylor L. Helium-3 on the Moon: model assumptions and abundances. *Eng. Constr. and Operations in Space IV, ASCE Publication, Proceedings of Space*, **94**, 678–686 (1994).
104. Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., Yerin S. N. Sensitivity of an active antenna array element for the low-frequency radio telescope GURT. *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, **65** (9), 4636–4644 (2017).
105. Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Sereckina A. A. Polarization sounding of the pulsar magnetosphere. *Proc. of the International Astronomical Union*, **8** (S291), 530–532 (2012).
106. Ulyanov O. M., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A., Lecacheux A., Rosole C., Rucker H. O. Detection of individual pulses from pulsars B0809+ 74; B0834+ 06; B0950+ 08; B0943+ 10; B1133+ 16 in the decameter waves range. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **11**, 113–133 (2006).
107. Vaniman D., French B., Heiken G. Afterword. *Lunar Sourcebook*. Heiken G. H., Vaniman D. T., French B. M. (Eds). P. 633–641 (Chapter 11) (Cambridge University Press, NY, 1991).
108. Vasilyev O. Y., Kuzin A. I., Kravtsov A. A., Bulakh E. V., Vynogradov V. V., Vavriv D.M. Multifunctional digital receiver-spectrometer. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **19** (3), 276–289 (2014).
109. Vondrak R., Keller J., Russell C. (Eds) *Lunar Reconnaissance Orbiter Mission* (Springer, NY, 2010).
110. Walmsley C. M., Watson W. D. The influence of dielectronic-like recombination at low temperatures on the interpretation of interstellar, radio recombination lines of carbon. *Astrophys. J.*, **260**, 317–325 (1982).
111. Wittenberg L., Santarius J., Kulchinski G. Lunar source of ³He for fusion power. *Fusion Technol.*, **10**, 167–178 (1986).
112. Yan Su, Guang-You Fang, Jian-Qing Feng, Shu-Guo Xing, Yi-Cai Ji, Bin Zhou, Yun-Ze Gao, Han Li, Shun Dai, Yuan Xiao and Chun-Lai Li Data processing and initial results of Chang'e-3 lunar penetrating radar. *Res. Astron. Astrophys.*, **14** (12), 1623–1632 (2014).
113. Yocky D. A., Wahl D. E., Jakowarz C. V. (Jr.) Terrain elevation mapping results from airborne spotlight-mode coherent cross-track SAR stereo. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, **42**, 301–308 (2004).
114. Zakharenko V. V. Sporadic radio emissions from celestial sources: studies at decameter wavelengths. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **2** (4), 287–298 (2011).
115. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovsky V., Shepelev V. Digital receivers for low-frequency radio telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrument.*, **5** (04), id.1641010 (2016).
116. Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Fischer G., Konovalenko A. A., Zarka P., Griebmeier J.-M., Ryabov B. P., Vavriv D. M., Ryabov V. B., Rucker H., Ravier P., Sidorchuk M. A., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Fabrice C., Kozhyn R. V., Mukha D. V., Pallier L., Schneider J., Shevchenko V. A., Vinogradov V. V., Weber R., Nikolaenko V. S. Identification of Saturn lightnings recorded by the UTR-2 radio telescope and Cassini spacecraft. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **2**(2), 93–98 (2011).
117. Zakharenko V., Mylostna K., Konovalenko A., Kolyadin V., Zarka P., Griebmeier J.-M., Litvinenko G., Sidorchuk M., Rucker H., Fischer G., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Shevchenko V., Nikolaenko V. Search and study of electrostatic discharges in the Solar System with the radio telescope UTR-2. *Europ. Planet. Sci. Congress*, 23–28 September 2012. Madrid, Spain., id. EPSC2012-186 (2012). — Retrieved from <http://meetings.copernicus.org/epsc2012>.
118. Zakharenko V. V., Nikolaenko V. S., Ulyanov O. M., Motiyenko R. A. A high time resolution receiver for radio emission investigation. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **12** (3), 233–242 (2007).
119. Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Konovalenko A. A., Ulyanov O. M., Serylak M., Zarka P., Griebmeier J. M., Cognard I., Nikolaenko V. S. Detection of decametre-

- wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **431** (4), 3624–3641 (2013).
120. Zarka P., Bougeret J.-L., Briand C., Cecconi B., Falcke H., Girard J., Grießmeier J.-M., Hess S., Klein-Wolt M., Konovalenko A., Lamy L., Mimoun D., Aminaev A. Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the Moon. *Planet. Space Sci.*, **74**, 156–166 (2012).
121. Zebker H. A., Goldstein R. M. Topographic mapping from interferometric SAR observations. *J. Geophys. Res.*, **91B**(5), 4993–4999 (1986).
122. Zhang Hao, Yang Yazhou, Jin Weidong, Yuan Ye, Lucey Paul, Zhu Meng-Hua, Kaydash Vadim, Shkuratov Yuriy, Di Kaichang, Wan Wenhui, Xu Bin, Xiao Long, Wang Ziwei, Xue Bin. In-situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 1. Mineral abundances inferred from spectral reflectance. *Geophys. Res. Lett.*, **42** (17), 6945–6950 (2015).
123. Zook H., Potter A., Cooper B. The lunar dust exosphere and Clementine lunar horizon glow. *Lunar Planet. Sci.*, **26**, 1577–1578 (1995).
124. Zubko E., Shkuratov Yu., Kiselev N., Videen G. DDA simulations of light scattering by small irregular particles with various structure. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.*, **101**, 416–434 (2006).
125. Zubko E., Shkuratov Yu., Mishchenko M., Videen G. Light scattering in a finite multi-particle system. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.*, **109**, 2195–2206 (2008).
126. Zubko E., Weinberger A., Zubko N., Shkuratov Y., Videen G. Umov effect in single-scattering dust particles: Effect of irregular shape. *Opt. Lett.*, **42** (10), 1962–1965 (2017).

Received 21.12.17

Ю. Г. Шкуратов^{1,2}, А. А. Коноваленко¹, В. В. Захаренко^{1,2},
А. А. Станиславский^{1,2}, Е. Ю. Банникова^{1,2},
В. Г. Кайдаш², Д. Г. Станкевич², В. В. Корохин²,
Д. М. Ваврив¹, В. Г. Галушко¹, С. Н. Ерин¹, И. Н. Бубнов¹,
П. Л. Токарский¹, О. М. Ульянов¹, С. В. Степкин¹,
Л. Н. Литвиненко¹, Я. С. Яцкив³,
Г. Видин⁴, Ф. Зарка⁵, Г. О. Рукер⁶

¹ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина

² Институт астрономии Национального университета имени В. Н. Каразина, Харьков, Украина

³ Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

⁴ Space Science Institute, Boulder, USA

⁵ LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, Université Paris-Diderot, Paris, France

⁶ Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz, Austria

УКРАИНСКАЯ МИССИЯ НА ЛУНУ: ЦЕЛИ И ПОЛЕЗНАЯ НАГРУЗКА

Научно-технический потенциал Украины в сотрудничестве с другими заинтересованными странами позволяет

подготовить космическую миссию с полезной нагрузкой для исследования Луны. В статье рассматриваются подробности такой миссии, которая состоит из двух частей: 1) орбитальное исследование с использованием вытянутой орбиты с перигентром над северным полюсом (100 км над поверхностью) и апоцентром над южным полюсом (высота примерно 3000 км); 2) исследование с помощью посадочного модуля на обратной стороне Луны вблизи южного полюса в окрестностях кратера Брауде. Посадочный модуль, имеющий в своем составе пять дипольных антенн, позволит выполнить разнообразные радиоастрономические наблюдения от сотен кГц до 40 МГц. Панорамная камера посадочного модуля с цветными и поляризационными фильтрами обеспечит наблюдения горизонта с целью исследований сияния, вызванного эффектом электростатической левитации лунной пыли. Для картирования структурных и минералогических характеристик молодых поверхностных образований предлагается камера HiRes в двух спектральных полосах. Трехмиллиметровый радар в режиме бокового обзора позволит построить карты не только радиояркости поверхности, характеризующие ее шероховатость, но и улучшить лунную топографическую модель.

Ключевые слова: радиоизлучения астрофизических объектов, низкочастотная радиоастрономия, космические миссии, лунную пыль, сияние горизонта вблизи полюса, мода растяжения, изображение фазового отношения, карта радиояркости поверхности.

Y. G. Shkuratov^{1,2}, A. A. Konovalenko¹, V. V. Zakharenko^{1,2},
A. A. Stanislavsky^{1,2}, E. Y. Bannikova^{1,2}, V. G. Kaydash²,
D. G. Stankevich², V. V. Korokhin², D. M. Vavriv¹,
V. G. Galushko¹, S. N. Yerin¹, I. N. Bubnov¹, P. L. Tokarsky¹,
O. M. Ulyanov¹, S. V. Stepkin¹, L. M. Lytvynenko¹,
Y. S. Yatskiv³, G. Videen⁴, P. Zarka⁵, H. O. Rucker⁶

¹ Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

² Institute of Astronomy, V. N. Karazin National University, Kharkiv, Ukraine

³ Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine

⁴ Space Science Institute, Boulder, USA

⁵ LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, Université Paris-Diderot, Paris, France

⁶ Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz, Austria

UKRAINIAN MISSION TO THE MOON: HOW TO AND WITH WHAT

Ukrainian scientific and technical potential in collaboration with other interested countries allows constructing a spacecraft with the payload for exploration of the Moon. In this paper we consider details of such a mission that includes two

parts: 1) orbiter exploration from an elongated orbit with a pericenter over the north pole (100 km above the surface) and the apocenter over the south pole (altitude about 3000 km), and 2) exploration with a lander located on the lunar farside near the south pole in the vicinity of the Braude crater. The lander will contain five dipole antennas for various radio astronomy observations from hundreds of kHz to 40 MHz. The lander panoramic camera equipped with color and polarization filters will provide useful observations of horizon glow due to the electrostatic levitation effect of the lunar dust. A

HiRes camera operating in two spectral bands is suggested for mapping structural and mineralogical characteristics of young surface formations. Working in a squint mode, the 3-mm radar will map the Moon surface in radio brightness, characterizing its roughness, to improve the lunar topographic model.

Keywords: radio emission of astrophysical objects, low frequency radio astronomy, space missions, lunar dust, horizon glow near the pole, stretching mode, phase ratio image, brightness map of the surface.