

月での居住に向けての科学的知見（月の極の水氷）

春山 純一（JAXA/宇宙科学研究所）

Scientific Knowledge to Settle on the Moon (Water Ice)

Junichi Haruyama*,

*ISAS/JAXA, Sagamihara, Kanagawa 252-5210

E-Mail: haruyama.junichi_at_jaxa.jp (change _at_ to @)

Abstract: The new era of lunar explorations aiming future settlement of humans in the space have been starting. In this era, one of the most important topic is “water ice” on the lunar polar regions that has been suggested since 1960s. In 1990s, two lunar orbiters, Clementine and Lunar Prospector provided some important results interrelated with the existence of polar water ices on the Moon, particularly in the permanent shadowed area of Shackleton crater. However, the water ice existence in the Shackleton does not seem to have been confirmed by later various observations. On the other hand, the concentration of hydrogen on the lunar polar regions originated from solar wind proton implantation is likely true. LEND neutron spectrometer onboard LRO showed the highest hydrogen concentration at some regions of extremely low temperatures (~20K) should reach 470 ppm, that is corresponding to 0.42wt% of water ice if an appropriate amount of usable oxygen is given. We note that the amount of the highest hydrogen concentration detected at the lunar polar regions is same order to that have been reported for the element in some of lunar samples.

Key words; Moon, Exploration, Water, Ice, Hydrogen, Shackleton crater.

1. はじめに

1960年代には月に降り立った人類だが、1972年のアポロ17号以後、人は月を訪れず、また1976年、無人のルナ24号による月着陸以後、月探査はしばらく途絶えた。月探査の復活は1990年代まで待たねばならなかった。

しかし、今世紀に入って月探査は一気に進んできた。この動きは、各国が、ポスト国際宇宙ステーションとして今後の国際的な有人活動、宇宙における居住に向けた取り組みは、月が対象になってくる、と意識していることの現れであろう。今後、月の探査は、詳細な科学観測データの積み重ねを踏まえ、将来の有人月面居住を目指したものになっていくに違いない。

今後の将来の有人月面居住を目指した探査の重要課題の一つとして「月の極の水氷」が、取り沙汰されて久しい。「月の極の水氷」の存在に関する科学的な議論は、古くは、1960年代にまで遡る（Watson et al. 1961a,b）。そして現在、日本を含む多くの国で、月面における水を重要資源とみなし、更には一部「国家権益の保護のため」とも断じて、月面での水の発見調査を最優先課題として月探査を設定する動きがみられる。

確かに、水が、月面で採取され、燃料、飲料水などに用いられれば、人の月面での居住、そして、更にその先の探査に大変有用であるかもしれない。しか

し一方で、水というトピックに飛びつき、注意深い考察も無しに探査を推し進めることは注意しなければならない。水というトピックは、直感的に分かりやすいために、月や水についての知見を具体的に知らずとも、多少は語れる。様々な仮定の上で議論されるべき月の極の水氷の存在を、仮定を無意識に、あるいは意図的に触れずに語り、最後は「あるかどうか分からないから探査する」というような議論は、少なくとも科学の点からは、されるべきではないだろう。

そこで本稿では、月の水(氷)について、最近の科学的知見を概観し、今後の月有人居住を見据えての探査検討へ資するものとした。

2. どうして月の極に水氷が期待されるのか

月の極に水氷が期待されるのは、大きく分けて、次の二点からであろう：

- ①月に対して、いくつかの水の供給源が存在する可能性があること。
- ②月面に供給された水が、濃集し、かつまたは安定的に存在できる可能性が（極域に）あること。

月の極域には、夜側温度 120K をさえ下回る低温となる可能性がある「永久陰」が存在している。日中最高温度は 400K であるので水分子が得られる熱速度は最高でも 0.6km/s 程度。月面からの脱出速度 2.4km/s には至らない。したがって、極域永久陰で無

くとも、水分子が、（高温の日中においてさえ）月面に供給、もしくは生成された場合、それら水分子は、月面上を弾道飛行的に移動し、最終的には、超低温の、より水分子が保持されやすい極域永久陰にて定着する、すなわち、水分子が濃集する、という論理展開がされる。

月面への水の供給過程は様々あると考えられる。たとえば、Arnold(1979)がまとめているように、少なくとも4つはある：

- ①水を含む隕石による持ち込み供給
- ②彗星による持ち込み供給
- ③レゴリス中への打ち込まれた太陽風陽子の酸化鉄の還元による生成供給
- ④内部からの脱ガスによる供給。

隕石の月面への落下供給は大きい。月全面は、大小様々なクレータで覆われる。特に極のような、後発性の溶岩が埋めていないような古くから残る高地では、数百 m 程度以下のクレータはほぼ被覆しつくしていることがクレータのサイズ頻度分布を描くと容易に分かる。このことから、隕石や彗星落下量そのものについては、非常に多いものと期待され、彗星はともかく、隕石などに含まれる水の量が仮に1%としても、月面への隕石供給にともなう水の供給総量は、かなりに上ると考えられる。

太陽風陽子は、磁場に即した回旋運動をおこなっており、極の永久影にも侵入しうる。地球軌道付近での太陽風フラックスは 4×10^8 個/cm²/s であるが、極域への減少率を考慮しても、衝突捕獲(implantation)される量は、レゴリス粒子中の利用可能なすべての遊離酸素と結合し水酸基を形成するのに十分な量である(Starukhina 2000, 2006, 2012)。飽和した結果、捕獲される水素は、1wt%の水相当の量となる。ただし、捕獲された水素が水酸基を経て、更に水分子となるかについては、まだ十分な研究があるとは言えない。

月の内部起源の水については、いまだ議論があるが、Saal et al. (2008) は、745ppm の水相当の OH 含有を、アポロ試料の中に発見している。

このように、水分子を月にもたらす過程は様々あり、また、それら水分子は極の永久陰に直接、間接に集積し得るということから、多少の散逸があっても、極域の永久陰域には水分子が、場合によっては数10wt%残存しているかもしれないとする主張（たとえば、Eke et al. 2009）が受け入れられてきているようにみえる。

しかし、月面へと落下し、水分子を供給したとする説には、次の3つの問題がある（たとえば、Watson et al. 1961 a,b, Arnold 1979, Starukhina 2012）：

①隕石や彗星の落下衝突した際の衝撃加熱で、衝突天体の水分子は、電離・分解してしまい、水としては殆ど月面には残存できないのではないか？

②隕石や彗星の落下衝突した際の衝撃加熱は、衝突天体だけでなく、月面に衝突以前に堆積していた水成分をも、電離・分解し、水損失に寄与してしまうほうが多いのではないか？

③仮に極域永久陰に水氷が集積し得たとしても、過去においては地球との距離の近さから自転軸が安定せず、現在の永久陰は過去においては永久陰でなかったはずで、更に現在においても月の稜動などを考えると、そもそも地史学的に長期間永久陰となっていて水氷を集積できる場所は殆ど無いのではないか？

より始源性が高く水含有割合も多い長周期彗星の場合、衝突速度は、平均で約 50km/s、速いもので 70km/s にも及ぶ(たとえば、Arnold 1979)。衝突した天体が、その場に自身が含んでいた水を残すことは、非常に考えにくい。

月の極以外の月面に供給された、あるいは、極以外の月面で生成された水の極域への移動では、水分子は、日中に太陽光によって乖離し、熱速度で脱出速度を得てしまう可能性が高い。実際、その場で得た熱速度をもった一回の弾道飛行で極域の永久陰に丁度入り込むことは、ほぼ希である。他の月面へと再度着地した水分子は、その場が日中であるならば、月面での吸着滞在時間内に光乖離を受けてしまう可能性も高いであろう。こうした論が、極域以外に供給、あるいは生成した水氷が、移動によっては容易に極域に濃集しないのでは無いか、という説の根拠となっている（たとえば、Arnold 1979, Starukhina 2012）。

更に、極以外にあった水分子が極にたどり着くのに難しいと考えられることとして、Butler(1997)が理論的考察に取り入れたように、

④月面で得る熱速度は、水分子の量が多いため統計的に扱わなければならない、脱出速度を持つ水分子も、多かれ少なかれ、生じるということもある。

つまり、水分子の極域への十分な量の移動と堆積を議論するには、多分に直感とは反する水分子の低い光乖離率や、或いは短い吸着滞在時間を仮定できるような、根拠ある実験データをもって主張しなければならない、加えて、正確な永久陰としての存在時間、移動の際に異端的に脱出速度を超えた熱速度を持つことになる水分子の存在なども考慮しなければならない。こうした水氷の移動・極への堆積にとってネガティブな要素を「データがないから」といった理由で議論から落とし、極への水氷の堆積の期待のみを述べるような主張には十分注意しなければならない。

3. 月南極シャクルトンの水氷

1960 年代、70 年代の月探査、特にアポロ計画では、

月の極の水氷に対する知見は、得られていない。なぜならば、アポロ計画では、着陸船が着陸後に太陽エネルギーの取得しやすい赤道軌道が周回船においても採用され、極域データは収集されなかったからである。

アポロ計画から 20 年以上の時を経て、1994 年、米国の打ち上げた月極軌道周回衛星クレメンタインと、1998 年、やはり米国の打ち上げた月極軌道周回衛星ルナー・プロスペクタ衛星のデータから、月の極の水氷の存在に関わる知見として、次の三つの報告がある：

①クレメンタイン衛星による、月南極域が夏の時の二ヶ月の連続観測により、画像情報の重ね合わせにより、月南極の永久陰部分を同定された(Shoemaker et al. 1994)

②クレメンタイン衛星による、月南極点近傍に位置し永久陰を有するシャクルトンクレータ（直径約 20km）へのレーダ照射実験で、反射波の地球での受信データに水氷の存在を示唆する結果を得た（Nozette et al. 1996）

③ルナー・プロスペクタ衛星搭載中性子分光計（NS）の観測により、月の両極域に水素濃集がみられることが確認された（Feldman et al. 1998）。

クレメンタイン衛星による月極の永久陰同定は、1）南極域だけだったこと、2）画像情報によるもので高度情報からレイ・トレーシングを行ってより確実に得るものとは違う、といったことはあるものの、月極に永久陰の存在を確認したことは意義が大きい。

一方、Nozette らの、クレメンタインの電波照射実験によるシャクルトンクレータ内の水氷同定については、その後、否定的な報告が相次いでいる。Nozette らの報告直後、Simpson and Tyler (1999) は、クレメンタイン衛星実験データの再解析では確認されなかったことを報告している。更に Stacy et al. (1996)や、Campbell et al. (2006)によるアレシボ地上アンテナを使った同種の実験でも、クレメンタイン実験によって、水氷の存在が示唆されたシャクルトンクレータ内の永久陰部分（の中の地球からは可視部分）には、水氷の堆積があるとは言えないとの結論が出された。クレメンタイン実験で水氷の存在によるとされた類似の反射は、ケイ酸塩鉱物が極度に冷却している場合や、電波波長程度の表面のラフネス（凸凹具合）によっても生じる（例えば、Campbell et al. 2006, Starukhina 2012）。また、Campbell et al. (2006)の実験では、地球から見えるシャクルトンクレータの一部の永久陰にさえ、クレメンタイン実験で水氷の存在によるとされた類似の反射を観測しており、シャクルトンクレータの永久陰に水氷があるとする結論に対する重要な否定的根拠となる結果を提示している。

2007 年に打ち上げられた SELENE（かぐや）に搭載された「地形カメラ」によるデータで、Haruyama らは、シャクルトンクレータの（太陽一次光については）永久陰となっている底が、クレータ上部からの二次反射光で照らされているのを観測するのに成功し、

①同クレータの底は 100K 程度と、 10^9 年オーダーで水氷を保持するのに可能なほど低温である

しかし、一方で、

②同クレータの底には、スケートリンクを張ったような平ら状な地形はみられない

③同クレータの底の反射率は、クレータ縁周りの地質のそれと同程度である

といった結果を得、永久陰となっているクレータ内では宇宙風化がより達成されていないことを鑑みると、周りの反射率と同程度の反射率、ということは、水氷の露出はあっても数%か、多分にほぼ無いとの結論を下した（Haruyama et al. 2008）。

その後、Zuber et al. (2012)は、LRO 搭載の LOLA が、能動的に 1000nm 付近のレーザを発射する高度計であることを利用し、シャクルトンクレータ内の反射率は高いと報告した。そして、その高い反射率をもたらすものは、水氷の露出によるものかもしれないと述べた。しかし、その高い反射率は、SELENE 搭載地形カメラの可視域で得た反射率の傾向、すなわち可視域の反射率の約 2 割ほど高くなること（Ohtake et al. 2010）と調和的であり、特段に高い反射率が見つかったという主張には、注意を要する。実際、Yamamoto et al. (2012)や、Haruyama et al. (2013)は、シャクルトンクレータの壁上部で日照域となったところについて、高い反射率を持つ purest anorthosite (PAN) を同定している。これらの結果は、Haruyama et al. (2008)のシャクルトン内部が周りと同程度の反射率であるということを、あらためて支持するものといえる。従って、LOLA による測定結果は、水氷の存在に一意的に結びつくものではない。

北極点近傍に存在する、底が永久陰となっている二つのクレータの地形カメラデータ解析からも、底の温度や反射率が推定される。結果は、シャクルトンクレータと同じく、あるいはむしろ、反射率は低く、やはり水氷の露出を積極的に主張するものではないことが初期的な解析で分かっている（Haruyama et al. 2009）。

永久陰内の水氷の調査は、LRO 搭載の超極端紫外線観測機器（LAMP）の反射率観測によっても行われ、シャクルトンクレータ内では 2%の水氷の存在可能性が報告されている（Gladstone et al. 2012）。ただし、この報告では、誤差評価が明確でないようにみえる。精度についての検討を更に進めなければ、その妥当性については、すぐには受け入れるべきも

のでは無いであろう。

そして、シャクルトンクレータ内に水氷が数%も露出していない、というのは、ルナー・プロスペクタ搭載中性子分光計 (NS) の後継となった LRO 搭載中性子分光計 (LEND) の観測から、確定的になったといえる。Mitrofanov et al. (2012)によって、シャクルトンクレータ内の水の存在を示唆するような中性子観測量の減衰は無かったと報告されたのである。

以上のように、月南極点に位置し、最も水氷の露出が期待されていたシャクルトンクレータの永久陰となっている底には、数%以上にも及ぶ水氷の存在は確かめられてはいないといえる。むしろ、否定的な結果が多い、というのが現状である。

4. シャクルトン以外の月極の水氷の観測

シャクルトンクレータ以外において、月の極域での水の存在を示唆する観測は、これまでどうであったのだろうか？

今世紀になって行われた探査によって取得したデータの解釈により、月の極域での水氷の存在についての報告主張が、いくつかなされてきている。その代表が、チャンドラヤーンと LRO に搭載された Mini-SAR と呼ばれる電波放射計による観測結果に基づくものである (たとえば, Spudis et al. 2010)。この Mini-SAR データに基づく報告主張の内容は、すでに述べたレーダデータの解釈としての曖昧性を多分に含んだものであり、水氷の存在を必ずしも支持しないものである (Fa and Cai 2013)。Spudis et al. (2010)は、極域クレータには、高いレーダ反射率を示すものが有り、それらクレータ群は、周りにも高い反射率を示すものと、周りには高い反射率を示さないものがあるとした。前者は、形成年代が比較的若くクレータ内は凹凸があり、レーダの高反射につながっているが、後者のクレータは古く (したがって、凹凸による高いレーダ反射の可能性が低く)、水氷の存在による高い反射率に他ならないとの主張である。しかし、同様の様相をみせるクレータが、(水氷など期待すべくもない) 月赤道にも見られることが学会 (2011 年の LPSC) で指摘されるなど、Mini-SAR データからの水氷存在の主張には疑問を抱く専門家も多いようである。

もう一つの水氷の存在の主張を強く裏付けるとされるのが、LCROSS による南緯 81.5 度に存在するカベウスクレータへの衝突の際、水が観測されたという報告である。Colaprete et al. (2010)は、LCROSS 衝突の際に生じた Plume (噴出雲) について、シェパード (追尾) 機により波長域 1.3~2.3 μm の分光観測をすることに成功したと報告した。そして彼らは、観測データから、衝突の際に飛散した中に水の舞い上がりが観測され、更にその後、衝突点地面が暖め

られたことによって、再び水氷が生じたことを示し、 $5.6 \pm 2.9\%$ の水の存在を主張した。しかし、この主張を全面的に受け入れるには以下の難点がある：

①まずは、論文掲載図からではあるが、生データに非常にノイズが載っているようにみえることである。このデータをもって、果たして有意義な観測スペクトルのデコンボリューション結果を得たといえるのであろうか？

②そして、そもそもデコンボリューションは、どのようなエンドメンバーを仮定するかによって、容易に結果が変わりうる。そうした試行の過程が論文からは見て取れない。

③加えて、LCROSS 衝突に際して、地上からの観測のいずれからでも、水の噴出が報告されていない (Heldman 2010, Hong et al. 2011)。

カベウスクレータ内の水氷存在については、再度検証が必要であろう。

話しは前後するが、ルナープロスペクタは、中性子分光計による観測で、月の極に水素の濃集を確認した (Feldman et al. 1998, Lawrence et al. 2006 など)。それらは、クレメンタインによる永久陰確認と、レーダでのシャクルトンクレータ内の水氷存在示唆と相まって、水が存在している証拠に他ならないとする主張する向きが少なくない。しかし、これまで述べたように、シャクルトンクレータ内の水氷の存在は、極めて根拠が薄弱である。水素濃集を水氷の存在と短絡的に結びつけることは、十分に気をつけなければならない。

ルナープロスペクタの中性子分光計の後継機となった LRO 搭載 LEND データは、解像度を格段に上げ、月極域の水素濃集に関わるデータを提供してきている。そのデータの解析結果によれば、月極の水素濃集度は、最も高いところでは、470ppm (0.047 質量%) に及ぶ、としている (Mitrofanov et al. 2012, Starukhina 2012)。これらの量は、月のレゴリス粒子殻への太陽風プロトンの衝突打ち込み (implantation) によって、レゴリス内酸化鉄の還元を起こしつつ、水素が捕獲されるということに調和的な量である (Starukhina 2012)。一方で、中性子分光計の観測による水素イオンの濃集分布は、必ずしも、極の永久陰の分布とは相関がない (Feldman et al. 1998, Lawrence et al. 2006, Mitrofanov et al. 2012)。これらのことから、LEND によって月極域に観測された水素濃集は、多分に (水では無く) 太陽風起源の月面に打ち込まれた「水素」そのものであり、しかも、その濃集量は「最大でも」470ppm、仮に水換算できるとしても 0.42% 程度というのが実際のところではないかと思われる。

4. 最後に

現在、月探査が有人探査をみすえ、世界的に活発

化しており、月の水への期待は、再度高まっている。しかし、これまで見てきたように、月の極の水氷の存在・濃集は、確証的なものは無く、しかも「いろいろな解釈、考えがある」と言うどころではなく、むしろ、殆どが数%もの水の存在にさえ懐疑的にならざるを得ないものである。一方で、打ち込まれた太陽風起源の水素の存在は可能性が高いと思われる。しかし、その水素の濃集量は、前節の最後に述べたように、LEND データの解析結果を信じるならば、最も濃集しているところで、470ppm、仮に、酸化を行えるような遊離酸素が存在、あるいは持ち込めたとして、水換算では 0.42%にも満たないというところである。

それでも、水素は、燃料や、水を生成するのに役立つということで、その調査を主張するのはあるかもしれない。しかし、その主張をするには、同時に、水素が最高値に濃集していると考えられる場所（最も低温に近いところであろうから、およそ 20K 領域）に、アプローチし、大量の地面を掘り返し、そこから、（どのように供給するかは別として）持ち込んだ遊離酸素と効率よく反応させる手段も並行して検討していくことが必要となろう。

また、水素濃集場所を調べるには、必ずしも着陸探査が最適かどうかにも注意深い検討が必要となる。仮に、着陸探査によって水素濃集を見いだしたとしても、その集積がどのように広がっているかは、まったく推測が困難だろうと思われる。というのも、水素の濃集は、過去の隕石衝突、その飛散物の拡がり、更にはこれまでの自転軸の動きに伴う永久陰の分布などに大きく依存しているはずで、現時点において、それらを追うのは、殆ど不可能に思えるからである。むしろ、極域を遠隔探査で、これまで以上に精度良く水素濃集を観測出来るような探査機のほうが、水素濃集調査においては、実効的であるかもしれない。

ところで、近年分析技術が向上したこともあり、アポロサンプルにも、745ppm 水相当の OH（つまり、水素で 83ppm）が見つかったりしている（Saal et al. 2008）。つまり、20K などという超低温の極域ではないところでも、オーダで変わらない程度の水素を含有するサンプルの取得は可能であるかもしれない。月の地下空洞に至れば、脱ガスが抑えられた岩体への接近は、これまで考えられていた以上に容易であろう。最近の科学的知見を更に取り入れつつ、今後、新たに、月への居住を見据えての月探査ではどこをどう目指すべきかを、客観的に専門的にトレードオフを行っていくことが望まれよう。

参考文献

- Anorl, J.R., "Ice in the Lunar Polar Regions", *J. Geophys. Res.* 84 (B10), 5659- 5668 (1979).
- Butler, B.J., "The migration of volatiles on the surfaces of Mercury and the Moon", *J. Geophys. Res.* 102, 19283–19291 (1997).
- Campbell, D.B. et al., "No Evidence for Thick Deposits of Ice at the Lunar South Pole", *Nature* 443, 835-837, (2006).
- Colaprete, A. et al., "Detection of water in the LCROSS ejecta plume", *Science* 330, 463–468 (2010).
- Eke, V.R. et al. "The spatial distribution of polar hydrogen deposits on the Moon", *Icarus* 200, 12–18, (2009).
- Feldman, W.C. et al.. "Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: Evidence for water ice at the lunar poles", *Science* 281, 1496–1500, (1998).
- Gladstone, G.R. et al., "Far-ultraviolet reflectance properties of the Moon's permanently shadowed regions", *J. Geophys. Res.* 111, E00H04, doi: 10.1029/2011JE003913, (2012).
- Haruyama, J. et al., "Lack of Exposed Ice Inside Lunar South Pole Shackleton Crater", *Science* 322, 938-939, (2008).
- Haruyama, J. et al., "SELENE (Kaguya) Terrain Camera Observation Results of Nominal Mission Period", *40th LPSC*, abst#1553, (2009).
- Haruyama, J. et al., "An Explanation of Bright Areas inside Shackleton Crater at Lunar South Pole other than Water-Ice Deposits", *Geophys. Res. Lett.* 40, 1–5, doi:10.1002/grl.50753, (2013).
- Heldman, J.L., et al., "LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) Observation Campaign: Strategies, Implementation, and Lessons Learned", *Space Sci Rev.*, DOI 10.1007/s11214-011-9759-y, (2010).
- Hong, P.K. et al., "A ground-based observation of the LCROSS impact events using the Subaru Telescope", *Icarus* 214 (1), 21-29, (2011).
- Lawrence, D.J. et al. "Improved modeling of Lunar Prospector neutron spectrometer data: Implications for hydrogen deposits at the lunar poles", *J. Geophys. Res.* 111, E08001, (2006).
- Mitrofanov I. et al., "Testing Polar Spots of Water-rich Permafrost on the Moon: LEND Observations Onboard LRO", *J. Geophys. Res.* 117, E00H27, doi:10.1029/2011JE003956, (2012).
- Nozette, S. et al. "The Clementine bistatic radar experiment", *Science* 274, 1495–1498 (1996).
- Ohtake, M. et al., "Deriving the Absolute Reflectance of Lunar Surface Using SELENE (Kaguya) Multiband Imager Data", *Space Sci Rev.* 154, Issue 1-4, 57-77, (2010).
- Saal, A.E. et al., "Volatile Content of Lunar Volcanic

- Glasses and the Presence of Water in the Moon's Interior", *Nature* 454, 192-195, (2008).
- Shoemaker, E.M. et al. "The South Pole Region of the Moon as Seen by Clementine", *Science* 266, 1851-1854, (1994).
- Simpson, R.A. and Tyler, G.L.. "Reanalysis of Clementine bistatic radar data from the lunar South Pole", *J. Geophys. Res.* 104, 3845-3862, (1999).
- Spudis, P. D. et al., "Initial results for the north pole of the Moon from Mini-SAR, Chandrayaan-1 mission, *Geophys. Res. Lett.* 37, L06204, doi:10.1029/2009GL042259, (2010).
- Stacy, N.J.S. et al., "Arecibo radar mapping of the lunar poles: A search for ice deposits", *Science* 276, 1527-1530, (1997).
- Starukhina, L.V. and Y.G. Shkuratov, "The Lunar Poles: Water Ice or Chemically Trapped Hydrogen?", *Icarus* 147, 585-587, (2000).
- Starukhina, L.V., "Polar Regions of the Moon as a Potential Repository of Solar-wind-implanted Gases", *Advances in Space Research* 37, 50-58, (2006).
- Starukhina, L., "Water on the Moon: What Is Derived from the Observation?", in: Badescu, V. (Eds.), *Moon - Prospective Energy and Material Resources*, Springer, pp. 57-85, (2012).
- Watson, K. et al., "On the Possible Presence of Ice on the Moon", *J. Geophys. Res.* 66 (5), 1598-1600 (1961a).
- Watson, K. et al., "The Behavior of Volatiles on the Lunar Surface", *J. Geophys. Res.* 66 (9), 3033-3045 (1961b).
- Yamamoto, S. et al., "Massive Layer of Pure anorthosites on the Moon", *Geophys. Res. Lett.* 39, L13201, doi:10.1029/2012GL052098, (2012).