

Секция «Теоретические и прикладные задачи дистанционного зондирования Земли»

Оценка запасов водяного льда в лунных полярных областях

Научный руководитель – Слюта Евгений Николаевич

Гришакينا Екатерина Александровна

Сотрудник

Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

E-mail: orskatya@mail.ru

Введение:

Исследования Луны, проведенные в последнее время космическими аппаратами, показали, что в полярных областях могут содержаться значительные запасы водородсодержащих соединений, к которым относится водяной лед, а также ряд других замороженных и захороненных летучих соединений. Источником воды (водяного льда), присутствующего в лунном реголите, могли быть кометы, астероиды, метеориты, межпланетная пыль [1], космическое выветривание минералов реголита под воздействием ионов солнечного ветра, в результате которого образуется протонная вода [2], и наконец, дегазация лунных недр.

Замороженные летучие в лунном грунте:

Суммарный эффект воздействия сублимации, распыления, ультрафиолетового излучения Лайман-альфа и микрометеоритной бомбардировки не позволяет сохраняться отложениям водяного льда на поверхности реголита [1]. Сохранение водяного льда возможно лишь при захоронении его реголитом. Минимальная мощность сухого слоя реголита, покрывающего захороненные отложения водяного льда, составляет около 40 см и в зависимости от температурных условий на поверхности может изменяться [3, 4]. В силу неравномерности поступления воды из разных источников и неравномерности захоронения частиц льда слоем реголита при падении метеоритов, отложения водяного льда в реголите, по-видимому, должны быть слоистыми или стратифицированными в прямой зависимости от истории формирования слоев реголита. Отложения замороженных летучих в слое реголита на полюсах могут простираться на глубину до 2 м и более. Возраст этого слоя реголита может достигать 2 млрд. лет и более. Содержание водяного льда по разным данным оценивается от 150 г т^{-1} (0.015 вес %) до 5 вес % [1]. Замороженные летучие компоненты, по-видимому, находятся в открытом поровом пространстве в виде частиц микронного размера (иней) на поверхности частиц реголита. Наличие в реголите массивных отложений водяного льда в виде линз оценивается как маловероятное. Если принять содержание водяного льда в холодных ловушках (постоянно затененных кратерах) равным значению в 1.5% [5], то с учетом полученной минимальной площади ловушек в северном и южном полярном регионе по данным [6] минимальные прогнозные запасы льда составят 4.5×10^8 и 3.9×10^8 тонн соответственно. По данным радарной съемки КА «Чандраян-1» прогнозные запасы водяного льда в северной полярной области на дне 40 кратеров-ловушек диаметром 3-12 км оцениваются около 6×10^8 тонн [7].

Оценка возможных запасов водяного льда:

В результате эксперимента LCROSS в облаке выброса по данным наблюдений в NIR и UV диапазонах спектра кроме воды и OH^- был обнаружен обширный состав водородсодержащих летучих (H_2O , H_2S , NH_3 , C_2H_2 , CH_3OH , CH_4 , OH^-) [8]. По данным этого же эксперимента содержание воды в реголите кратера Кабеус оценивается в 5.6 ± 2.6 вес%. В кратере Кабеус концентрация водяного эквивалента водорода в сумме для слабосвязанной и замороженной компонент может достигать $10.9 + 5.1 - 3.3$ вес%, а в кратере Шумейкер -

9.4+2.7–2.0 вес% [8]. Отчетливой корреляции между распределением водородсодержащих аномалий и степенью освещенности не наблюдается. Тем не менее, водородсодержащие аномалии с самой высокой концентрацией водорода располагаются, как правило, на дне крупных постоянно затененных депрессий (кратеров) [8]. В северной полярной области в кратерах Erlanger (10.9 км, здесь и далее указан диаметр), Fibiger (21.1 км), Plaskett (114.3 км), Whipple (14.5 км), Rozhdestvenskiy (44 км), Milankovic E (49.3 км) (Рис. 1). В южной полярной области в кратерах Cabeus (100.6 км), Shoemaker (51.8 км), Haworth (51.4 км), Scott M (17.8 км), de Gerlache (32.7 км), Hale Q (24.1 км), Amundsen (103.4 км), Idel'son L (28 км) (Рис. 1).

В программной среде ArcGIS для оценки прогнозных запасов водяного льда в лунном реголите в месторождениях, расположенных в Южной и Северной полярных областях, были выделены и оцифрованы аномалии с содержанием водяного эквивалента водорода (ВЭВ) 0.33 вес % и более. Если предположить, что весь этот водород содержится в водяном льде, то это соответствует содержанию водяного льда в лунном реголите 2.97 вес % и более. Максимальное содержание ВЭВ в пределах выделенных аномалий достигает 0.54 вес %, что соответствует 4.86 вес % водяного льда. Таким образом, в пределах Южной полярной области было выделено 10 месторождений с максимальным содержанием водяного льда в лунном реголите, представляющих наибольший практический интерес, и 7 месторождений в Северной полярной области (Рис. 2).

Для оценки прогнозных запасов использовалось минимальное значение содержания водяного льда в пределах выделенных месторождений, равное 2.97 вес %, глубина залегания в лунном реголите до 3 метров, средняя плотность реголита 1.9 г см^{-3} [9]. В Южной полярной области площадь выделенных месторождений колеблется от 8.8 до 1939.9 км² с прогнозными запасами от 1 490 000 до 328 405 000 тонн водяного льда (Таблица 1).

В Северной полярной области выделенные месторождения, в отличие от месторождений Южной полярной области, характеризуются более близкими размерами в пределах от 136.80 до 445.20 км² и, соответственно, близкими прогнозными запасами в пределах от 23 158 000 до 75 368 000 тонн (Таблица 2).

Заключение:

Суммарные запасы в месторождениях Южной полярной области, представляющие наибольший практический интерес, оцениваются в 734 869 000 тонн, или 7.3×10^8 тонн, и почти в два раза превышают минимальную оценку в 3.9×10^8 тонн, сделанную с учетом минимальной площади ловушек в южном полярном регионе [6]. Суммарные прогнозные запасы в Северной полярной области оцениваются в 341 356 000 тонн, или в 3.4×10^8 тонн, что немного меньше минимальной оценки в 4.5×10^8 тонн по данным [6] и почти в два раза меньше оценки по данным [7]. Таким образом, в целом оцененные прогнозные запасы в Южной и Северной полярной областях достаточно хорошо согласуются с минимальной предварительной оценкой, рассчитанной с учетом минимальной площади постоянно затененных холодных ловушек (кратеров) по данным [6], а также рассчитанных по данным радарной съемки КА «Чандраян-1» на дне 40 кратеров в северной полярной области [7]. Следует отметить, что в данной работе представлена оценка прогнозных запасов в определенных выделенных месторождениях с известными координатами и площадью, и с максимальной концентрацией водяного льда, т.е. представляющие наибольший практический интерес для разведки и добычи воды, и других замороженных газовых компонентов.

Источники и литература

- 1) Arnold J.R. (1979) J.G.R. 84, 5659–5668
- 2) Slyuta E.N. et al. (2017) *Geochemistry International* 55(1), 27–37
- 3) Feldman W.C. et al. (1998) *Science* 281, 1496–1500

- 4) Lawrence D.J. et al. (2006) J.G.R. 111(E08001), 1-19
- 5) Feldman W.C. et al. (2000) J.G.R. 105(E2), 4175-4195
- 6) Bussey D.B.J. et al. (2003) G. Res. Let. 30(6), 1278-1281
- 7) Spudis P.D. et al. (2010) LPSC XXXXI, ID: 1224
- 8) Sanin A. B, et al. (2017) Icarus 283, 20-30
- 9) Slyuta E.N. (2014) Sol. Sys. Res. 48(5), 330–353

Иллюстрации

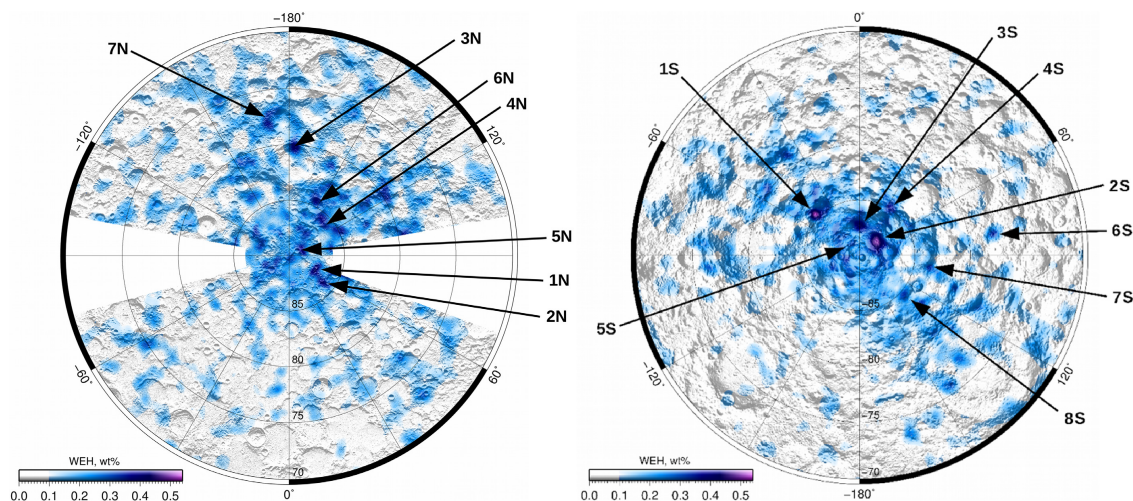


Рис. 1. Карта распределения водяного эквивалента водорода (ВЭВ) в Северной полярной области (справа) и в Южной полярной области (слева) по данным [8]

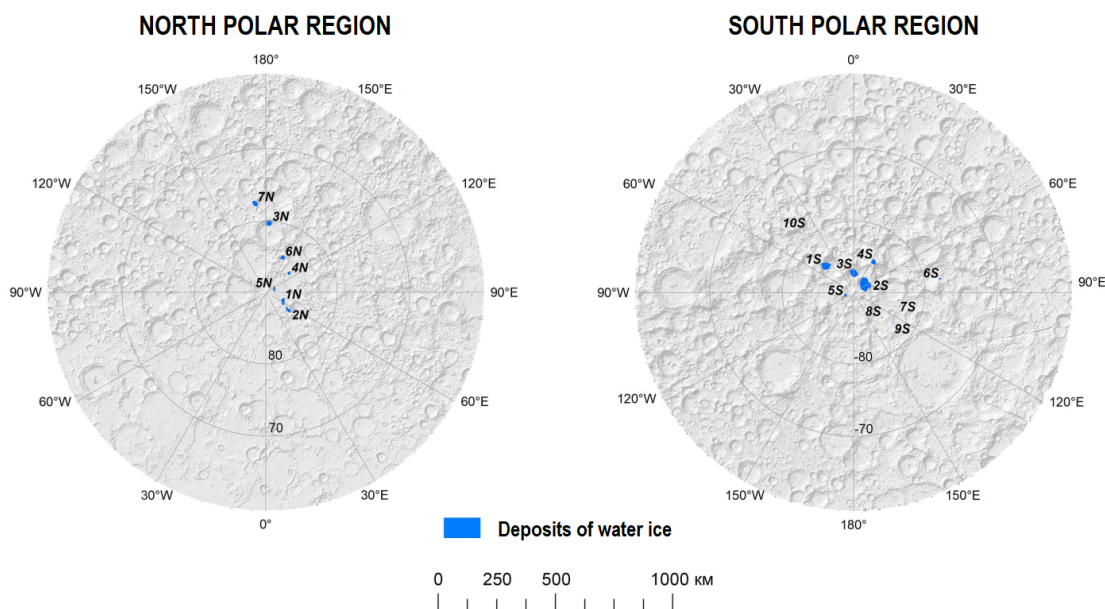


Рис. 2. Месторождения водяного льда в Северной полярной области (слева) и Южной полярной области (справа) на Луне с содержанием водяного льда в лунном реголите более 2.97 вес %

№ п/п	Месторождение	Координаты	Площадь, км ²	Запасы водяного льда, т
1	1S Cabeus	84.5° ю.ш., 47.3° в.д.	964.10	163 212 000
2	2S Shoemaker	88.0° ю.ш., 53.8° з.д.	1939.90	328 405 000
3	3S Haworth	87.3° ю.ш., 1.8° з.д.	836.20	141 560 000
4	4S Scott M	84.8° ю.ш., 32.3° з.д.	351.50	59 505 000
5	5S de Gerlache	88.8° ю.ш., 107.3° в.д.	111.00	18 791 000
6	6S Hale Q	77.8° ю.ш., 80.8° з.д.	56.80	9 616 000
7	7S Amundsen	83.6° ю.ш., 99.8° з.д.	30.70	5 197 000
8	8S Idel'son L	82.9° ю.ш., 127.3° з.д.	23.70	4 012 000
9	9S Idel'son L	82.9° ю.ш., 127.4° з.д.	18.20	3 081 000
10	10S Newton E	78.9° ю.ш., 36.1° в.д.	8.80	1 490 000
11	Всего		4340.90	734 869 000

Рис. 3. Прогнозные запасы водяного льда в Южной полярной области Луны

№ п/п	Месторождение	Координаты	Площадь, км ²	Запасы водяного льда, т
1	1N Erlanger	87.3° с.ш., 64.3° з.д.	351.20	59 455 000
2	2N Fibiger	86.2° с.ш., 51.3° з.д.	284.80	48 214 000
3	3N Plaskett	80.3° с.ш., 176.8° з.д.	445.20	75 368 000
4	4N Rozhdestvenskiy U	85.5° с.ш., 139.3° з.д.	136.80	23 158 000
5	5N Whipple	88.8° с.ш., 116.3° з.д.	153.20	25 935 000
6	6N Rozhdestvenskiy U	84.5° с.ш., 153.8° з.д.	242.70	41 087 000
7	7N Milankovic E	78.0° с.ш., 170.8° в.д.	402.50	68 139 000
8	Всего		2016.40	341 356 000

Рис. 4. Прогнозные запасы водяного льда в Северной полярной области Луны