

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОСФЕРЕ

УДК 551.345. [532.43 + 525]

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ РАДИАЦИОННО-ТЕПЛООВОГО  
БАЛАНСА АНТАРКТИДЫ И ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЕЙ МАРСА

О.Н. Абраменко, И.А. Комаров, В.С. Исаев

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, геологический ф-т,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, oleg\_abramenko@inbox.ru, ilya\_komarov@mail.ru, tpomed@rambler.ru

Для пяти полярных станций Антарктиды (Новолазаревская, Молодежная, Беллинсгаузен, Мирный, Восток) выявлены закономерности временной и пространственной изменчивости составляющих радиационно-теплового баланса поверхности. Эти же закономерности были выявлены для пространственной сетки полярных регионов Марса. Проведенный сравнительный анализ позволяет оценить роль различных теплофизических составляющих, участвующих в формировании радиационно-теплового баланса Антарктиды и полярных регионов Марса.

Основной целью работы является проведение сравнительного анализа количественных и качественных параметров, характеризующих структуру радиационно-теплового баланса поверхности Антарктиды и полярных областей Марса. Марс – планетное тело с ощутимой атмосферой, мощной криосферой и постоянным присутствием льда в полярных шапках. На Земле наиболее близким аналогом полярных областей Марса, в частности, северной полярной шапки, состоящей преимущественно из льда H<sub>2</sub>O, является Антарктида, сопоставимая по площади и мощности ледяного щита (табл. 1). Антарктида характеризуется наиболее суровым климатом (на станции Восток зарегистрирован абсолютный минимум температуры –89,2 °С) и минимальным влиянием антропогенного фактора на ее природные условия.

Для анализа были использованы фоновые данные Арктического и антарктического научно-исследовательского института по российским антарктическим станциям Восток, Беллинсгаузен, Новолазаревская, Молодежная и Мирный за период от начала наблюдений (1958–1971 гг.) по 2008–2009 гг. (для Молодежной – до 1992 г.). Эти станции расположены на побережье либо вблизи него, а также внутри континента (на ледниках и внутри антарктических оазисов). Материалы содержали следующую информацию:

1) средние многолетние значения потоков солнечной радиации в выбранные для измерений сроки наблюдений (в условиях “ясного неба”: облачность менее 2 баллов; до 10 баллов);

2) статистически обработанные данные месячных сумм значений составляющих радиационно-

но-теплового баланса, а также суммы значений составляющих радиационно-теплового баланса для каждого года наблюдений;

3) статистически обработанные данные месячных и годовых сумм значений прямой солнечной радиации на перпендикулярную поверхность и коэффициента интегральной прозрачности атмосферы.

В рамках работы 53-й Российской антарктической экспедиции на станцию Новолазаревская в районе оазиса Ширмахера, который находится в 80 км от северного побережья Антарктиды в центральной части Земли Королевы Мод, одним из авторов была организована исследовательская площадка [Абраменко, 2009]. На ней отработана методика определения радиационно-теплового баланса поверхности, проведены измерения температурного режима, коэффициента теплопроводности, глубины сезонного оттаивания пород. Для фиксации результатов температурных измерений в годо-

Таблица 1. Сравнение параметров ледяных отложений Антарктиды и полярных шапок Марса

Регион	Площадь, км <sup>2</sup>	Макс. мощность ледяного покрова, км	Ледяные отложения	
			объем, км <sup>3</sup>	состав
Антарктида	1,4·10 <sup>7</sup>	4,8	26,7·10 <sup>6</sup>	H <sub>2</sub> O
Южная шапка Марса	3,9·10 <sup>5</sup>	3,7	1,6·10 <sup>6</sup>	H <sub>2</sub> O и преимущественно CO <sub>2</sub>
Северная шапка Марса	6,8·10 <sup>5</sup>	2,0	1,4·10 <sup>6</sup>	CO <sub>2</sub> и преимущественно H <sub>2</sub> O

Таблица 2. Сравнение осредненных за весь период наблюдений значений составляющих радиационно-теплового баланса на полярных станциях Антарктиды, Вт/м<sup>2</sup>

Станция	Радиационный баланс	Прямая солнечная радиация на поверхность		Солнечная радиация	
		перпендикулярную	горизонтальную	суммарная	отраженная
Восток	-6,7	344,7	105,0	147,8	111,8
Новолазаревская	37,2	181,2	67,3	125,0	26,7
Молодежная	38,6	144,5	62,8	134,0	50,5
Мирный	-8,5	148,2	62,4	135,3	108,1
Беллинсгаузен	20,2	42,2	20,7	7,8	45,2

вом цикле были установлены логгеры, любезно предоставленные университетом г. Фейрбэнкса (Аляска, США). Площадка включена в проект CALM [Brown et al., 2000].

Для станций Беллинсгаузен, Новолазаревская, Молодежная, Мирный и Восток наблюдалось преобладание величины прямой солнечной радиации на перпендикулярную поверхность (от 33 до 56 %) над другими видами солнечной радиации. Значения солнечной радиации изменялись в диапазонах: рассеянной – от 6 до 32 %, отраженной – от 6 до 26 %, поглощенной – от 3 до 23 %, прямой радиации на горизонтальную поверхность – от 9 до 17 % (табл. 2). Для Антарктиды в целом годовые значения радиационно-теплового баланса ледниковой поверхности Антарктиды являются отрицательными и составляют от -20 до -40 Вт/м<sup>2</sup>. Внутри области выделяются районы с положительными значениями радиационно-теплового баланса – это оазисы, горные хребты, не покрытые ледниками, и стационарные полыньи. В оазисах годовая величина радиационно-теплового баланса достигает 110 Вт/м<sup>2</sup>. Значения годовых сумм составляющих радиационно-теплового баланса изменяются в следующих диапазонах: прямой солнечной радиации на перпендикулярную поверхность – от 102 до 830 Вт/м<sup>2</sup>, на горизонтальную поверхность – от 48 до 199 Вт/м<sup>2</sup>, рассеянной солнечной радиации – от 67 до 179 Вт/м<sup>2</sup>, суммарной – от 19 до 329 Вт/м<sup>2</sup>, отраженной – от 65 до 263 Вт/м<sup>2</sup>. Среднемесячные значения климатических параметров на исследуемых станциях изменяются в диапазонах: альбедо 0,2–0,9, относительная влажность воздуха 48–90 %, скорость ветра 2,9–13,4 м/с.

Для оценки временной и пространственной изменчивости составляющих радиационно-теплового баланса поверхности полярных областей Марса, ее температуры и температуры приповерхностного слоя атмосферы были использованы данные Глобальной Марсианской Климатической Базы данных (ГМКБД). Она является результатом совместных исследований LMD (Laboratoire de Meteorologic Dynamique du CNRS, LMD, Paris) и AOPP (Atmospheric, Oceanic and Planetary Phy-

sics, Department of Physic, Oxford University, Oxford, England UK) [The global...].

В целом для северного полярного региона Марса диапазон изменения годовых сумм отраженной радиации составляет 414–750 Вт/м<sup>2</sup>, а южного – 532–840 Вт/м<sup>2</sup>. Годовая сумма поглощенной радиации в области южной полярной шапки изменяется от 658 до 2016 Вт/м<sup>2</sup>, в северной – от 702 до 1539 Вт/м<sup>2</sup>. Данные по составляющим радиационно-теплового баланса для северной и южной полярных областей обрабатывались по пространственной сетке для координат: 90°, 86,2°, 82,5°, 78,8°, 75° северной и южной широты; 135°, 90°, 45°, 0° западной долготы и 45°, 90°, 135°, 180° восточной долготы. Были проанализированы изменения в годовом цикле следующих величин: инфракрасного излучения атмосферы и поверхности, поглощенной и отраженной радиации, среднемесячной температуры поверхности. Оценены значения среднесуточных и среднемесячных колебаний температур поверхности и нижних слоев атмосферы (5 м над поверхностью) для двух временных периодов (0 часов и 12 часов), среднесуточных колебаний значений скорости ветра в зимний и весенний периоды.

Расчет составляющих радиационно-теплового баланса проводился по уравнению, которое используется при обработке данных для земной поверхности [Будыко, 1956]. Величина турбулентного теплообмена находилась как разность температур поверхности и приповерхностного слоя атмосферы (на высоте 5 м), полученная по данным ГМКБД и умноженная на коэффициент теплообмена. Значение коэффициента теплообмена принято в диапазоне 2–5 Вт/(м<sup>2</sup>·К), исходя из экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях при давлениях и температурах, характерных для высоких широт Марса [Лебедев, Перельман, 1973]. Затраты тепла на сублимацию (аблимацию) льда CO<sub>2</sub> или H<sub>2</sub>O определялись по среднегодовым значениям интенсивности процесса, которые были получены с помощью ГМКБД. Теплоты сублимации льда CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O оценивались с учетом их температурной зависимости [Комаров, 2003]. Величина теплового потока от

Таблица 3. Среднегодовые значения составляющих радиационно-теплового баланса для участков полярных областей Марса и станции Новолазаревская

Участок	Координаты	Составляющие радиационного баланса, Вт/м <sup>2</sup>			Составляющие теплового баланса, Вт/м <sup>2</sup>				
		Коротковолновая солнечная радиация			Альбедо поверхности, д. е.	Эффективное длинноволновое излучение	Затраты тепла на испарение/сублимацию	Тепловой поток в массив пород	Турбулентный теплообмен
		суммарная	отраженная	поглощенная					
Станция Новолазаревская	11° в.д. 70° ю.ш.	125,0	26,7	98,3	0,2	61,1	1·10 <sup>-3</sup>	1,1	34,9
Участок южной шапки Марса	0° в.д. 82,5° ю.ш.	60,4	14,5	45,9	0,2	26,9	20,5	0,1	0,7
Участок северной шапки Марса	0° в.д. 82,5° с.ш.	57,3	17,2	40,1	0,3	24,1	18,0	0,1	0,5

поверхности в массив льда рассчитывалась решением дифференциального уравнения теплопроводности при соответствующих краевых условиях. Для северной полярной шапки принималась модель двухслойного разреза, для южной – трехслойного разреза [Комаров, Исаев, 2010].

Для Антарктиды и полярных регионов Марса фиксируется во многом аналогичный качественный характер закономерностей изменения составляющих радиационно-теплового баланса, однако по абсолютной величине наблюдаются различия. В частности, на Марсе значения отраженной и поглощенной радиации несколько меньше, чем на станции Новолазаревская (табл. 3). В отличие от Земли, температура поверхности Марса определяется в основном прямым солнечным нагревом, а не теплопереносом в атмосфере. В результате при средней температуре периферийной области северной полярной шапки Марса в начале лета ( $L_s = 90^\circ$ , где  $L_s$  – солнечная долгота), равной 235 К, температура локальных участков может достигать 272 К. В целом для южной полярной области в течение года характерно изменение среднесуточной температуры воздуха на высоте 5 м в диапазоне от 143,1 до 249,9 К, для северной – от 147,8 до 230,4 К.

Согласно проведенной нами расчетной оценке мощности мерзлых пород и криосферы Марса в целом, величина мерзлых пород меняется от 1000 м на экваторе до 3600–3750 м в области полярных шапок [Комаров, Исаев, 2010]. Средняя мощность мерзлых пород составляет 2300 м, что превышает величину средней мощности криолитозоны Земли. Суммарный объем льда в сферическом слое мощностью 2300 км при внешнем радиусе Марса 3394 км и разных методах оценки

льдиности пород составляет  $(0,4–2,0) \cdot 10^8$  км<sup>3</sup>, что примерно на два порядка больше суммарного объема льда, содержащегося в полярных шапках.

Авторы признательны начальнику антарктических экспедиций Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) В.В. Лукину за содействие, а руководителю работ 53-й Российской сезонной антарктической экспедиции С.Р. Веркуличу и всему персоналу станции Новолазаревская за помощь в проведении исследований.

Работы по марсианской тематике проводились при поддержке РФФИ (проекты 04-05-65110, 09-05-07045).

### Литература

- Абраменко О.Н.** Методика исследования составляющих радиационно-теплового баланса поверхности и глубин сезонного оттаивания в районе оазиса Ширмахера (Антарктида) // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология, 2009, № 4, с. 67–69.
- Будыко М.И.** Тепловой баланс земной поверхности. Л., Гидрометеониздат, 1956, 256 с.
- Комаров И.А.** Термодинамика и теплообмен в дисперсных мерзлых породах. М., Науч. мир, 2003, 603 с.
- Комаров И.А., Исаев В.С.** Криология Марса и других планет Солнечной системы. М., Науч. мир, 2010, 232 с.
- Лебедев Д.П., Перельман Т.Л.** Тепло- и массообмен в процессах сублимации в вакууме. М., Энергия, 1973, 336 с.
- Brown J., Hinkel K.M., Nelson E.F.** The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: research designs and initial results // Polar Geogr., 2000, vol. 24, No. 3, p. 165–258.
- The global Mars Climate Database.** (<http://www-mars.lmd.jussieu.fr/>).

Поступила в редакцию  
9 февраля 2011 г.