

ВЗВЕШЕННЫЕ В АТМОСФЕРЕ ЧАСТИЦЫ И СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ: ВЗГЛЯД С ЗЕМЛИ И ИЗ КОСМОСА

Антарктический континент содержит 90% мировых запасов льда, и поэтому его влияние на климат Земли огромно. Один только ледник Росса – самый крупный ледниковый шельф площадью 500 тыс. км² (2,5 территории Беларусь) и толщиной несколько сотен метров – содержит эквивалент 20 см уровня Мирового океана. Огромные айсберги время от времени отделяются от антарктических ледниковых шельфов. Самый крупный из них за историю спутниковых наблюдений – B-15 площадью 11 тыс. км² – откололся от ледника Росса в марте 2000 г. и таял в течение 10 лет. Вторым по величине был айсберг A-68 площадью 5,8 тыс. км² и массой около 1 трлн т, который, оторвавшись от шельфа Ларсена в июле 2017 г., уменьшил его площадь на 12%. Последнее из этих крупных ледовых образований – A-81 (1,5 тыс. км²) – отколилось от шельфа Бранта в январе 2023 г.

Снежный и ледяной покровы – система сильной обратной связью: рост температуры ускоряет таяние, что увеличивает поглощение солнечного света, от чего, в свою очередь, снег и лед тают еще быстрее. Эта взаимозависимость может быть существенно усиlena наличием загрязнения, особенно сажи, которая образуется в результате промышленных выбросов. Помимо этого, аэрозольные частицы, порожденные промышленной деятельностью, влияют на процесс формирования облаков (аэрозоль-облачное взаимодействие), выступая центрами конденсации водяного пара и увеличивая таким образом долю солнечного излучения, отраженного в космос.

Степень охлаждения от этого процесса в сравнении с нагревающим эффектом от таяния снега до сих пор является дискуссионным вопросом.

В связи с этим особую важность приобретает постоянный мониторинг снежного покрова и атмосферного аэрозоля. В Антарктиде наблюдения осуществляются мировым сообществом в соответствии с положениями Системы Договора об Антарктике. Беларусь присоединилась к нему 19 июня 2006 г., и с тех пор наши ученыые выполняют комплексные исследования окружающей среды на Ледовом континенте в рамках мероприятий Государственной антарктической программы. Одна из ее составляющих – изучение оптических свойств взвешенных в атмосфере частиц (аэрозолей) и земной поверхности. Коллектив исследователей Института физики НАН Беларусь осуществляет разработку оборудования для мониторинга поверхности снега и атмосферных аэрозолей, обработку спутниковых данных, проводит регулярные наблюдения на белорусской станции «Гора Вечерняя» (ранее – на российских станциях «Молодежная» и «Прогресс») [1].

Основным инструментом исследования аэрозольного состава атмосферы является спектральный сканирующий солнечный радиометр CIMEL (рис. 1) [2], созданный в Центре космических полетов им. Годдарда (НАСА, США). Он измеряет прямое и рассеянное солнечное излучение в диапазоне 340–1020 нм. Эта информация позволяет восстановить аэрозольную оптическую толщину и другие оптические характеристики аэрозоля, усредненные по атмосферному слою.



Рис. 1. Солнечный радиометр CIMEL и карта станций сети AERONET

Множество таких радиометров объединены в международную сеть под названием AERONET [3–4]. Она начала развиваться в 1993 г. и на сегодняшний день насчитывает около 500 станций по всему миру (рис. 1). Данные, полученные радиометрами на измерительных станциях, обрабатываются по единому алгоритму и выкладываются в открытый доступ в Интернет [4].

Первые пробные измерения в Антарктике провели на станции McMurdo (США) в 1995 г. В 2007 г. на Южном полюсе была основана постоянная база наблюдений South_Pole_Obs_NOAA (США). Второй радиометрический пункт американские ученые установили в 2008 г. на аргентинской антарктической базе Marambio (64.240°S , 56.625°W) (рис. 2). В том же году Институт физики в сотрудничестве с Лабораторией оптики атмосферы Лильльского университета (Франция) создал станцию радиометрического зондиро-

вания Vechernaya_Hill в районе горы Вечерней [1]. Сегодня насчитывается 13 станций AERONET, расположенных в Антарктиде, однако регулярные измерения проводятся всего на 5 из них (обозначены красным цветом на рис. 2).

Измерения показывают, что Антарктика – достаточно чистый регион: общее содержание аэрозоля субмикронной фракции на станции Vechernaya_Hill в 7 раз меньше, чем в Минске, а для грубой фракции (частицы крупнее 1 мкм) эти величины различаются более чем в 40 раз.

В 2011 г. в программу наблюдений на Белорусской научной станции помимо солнечно-радиометрических наблюдений включили измерения высотной зависимости оптических параметров атмосферы с помощью лидара. Институт физики имеет богатый опыт в разработке лидарного оборудования и проведении лидарного зондирования. С помощью данного метода еще в 1965 г. институт осуществил эксперимент по исследованию воды озера Нарочь, а затем в 1966 г. – и атмосферы. С тех пор, за почти 60 лет, Институт физики построил свыше 25 лидарных систем и осуществил поставки более чем в десяток стран. Аппаратурные разработки института используются на станциях лидарных сетей EARLINET (Европа) и CIS-LiNet (СНГ). Первые измерения в Антарктиде проводились на открытых площадках посредством мобильного двухвольнового лидара (рис. 3). Со временем в антарктические экспедиции поставлялось все более совершенное оборудование, включающее в себя стационарный многоволновой лидар, имеющий несколько спектральных каналов, в том числе для измерения поляризации и комбинационного рассеяния.

В 2023 г. на станции «Гора Вечерня» была оборудована стационарная лидарная



Рис. 2. Карта антарктических станций сети AERONET

лаборатория и началась программа регулярных лидарных измерений (рис. 4).

Также был изготовлен спектральный альбедометр для измерения спектров отражения земной поверхности, в первую очередь – снежного покрова Антарктиды [5] (рис. 5).

Важная роль в формировании системы мониторинга атмосферы и подстилающих слоев Антарктиды отводится космическим наблюдениям. Алгоритм восстановления характеристик снежной поверхности по спутниковым измерениям был разработан в Институте физики [6–7] и реализован в виде программного кода ASAR. Посредством измерений яркости снежного покрова он позволяет воссоздать степень покрытия территории снегом и эффективный размер снежных зерен, а также среднее спектральное альбено – важнейшие параметры, определяющие радиационный баланс полярных регионов (рис. 6). Эти данные необходимы для изучения процессов метаморфизма в снежно-ледяном покрове Антарктиды. В реализации кода ASAR, используемого в настоящее время, входными являются данные спектрорадиометра MODIS [8], но также была разработана версия, обрабатывающая данные более современного радиометра OLCI [9].

С помощью кода ASAR были обработаны спутниковые данные MODIS за последние два десятилетия и исследованы тренды характеристик



Рис. 3. Мобильный двухволновой лидар в Антарктиде

снежного покрова в районе горы Вечерней. Установлены незначительные тенденции уменьшения эффективного размера снежных зерен в летний период, что может свидетельствовать о том, что район Восточной Антарктиды вблизи горы Вечерняя, видимо, выпадает из общей картины увеличения глобальных температур.

По итогам проведенных исследований можно сказать, что регион Антарктики на сегодняшний день, к счастью, является довольно чистым



Рис. 4. Стационарная лидарная лаборатория в Антарктиде



Рис. 5. Спектральный альбедометр, измеряющий отражательную способность снежной поверхности и скальных пород

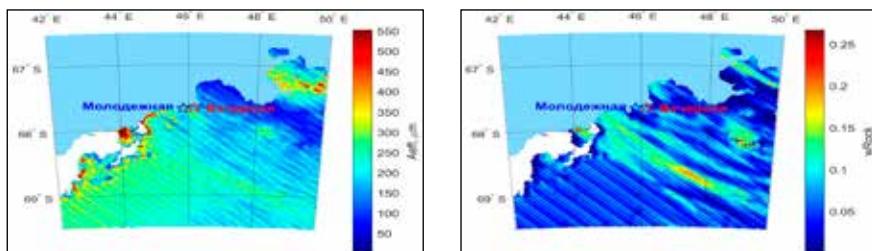


Рис. 6. Карты распределения размера снежных зерен и доли обнаженных скал в районе горы Вечерней, восстановленных по данным спутникового радиометра MODIS

и слабо подверженным общемировым трендам потепления, по крайней мере его восточная часть, в которой расположена белорусская антарктическая станция. Однако с учетом важности для климата Земли в целом его состояние, особенно тенденции изменения, нуждаются в дальнейшем тщательном изучении. Кроме того, Антарктика может служить отличным тестовым полигоном для разработки методов мониторинга окружающей среды в других регионах планеты. Одновременно можно с уверенностью сказать, что будущее дистанционного зондирования – за интегрированием данных наземных и космических наблюдений. **и**

Аркадий Иванов,
главный научный
сотрудник
Института
физики НАН
Беларусь, член-
корреспондент

Алексей Малинка,
ведущий научный
сотрудник
Института физики
НАН Беларусь,
кандидат физико-
математических
наук

**Анатолий
Чайковский,**
заведующий
центром
Института физики
НАН Беларусь,
кандидат физико-
математических наук

Игорь Алексеев,
младший научный
сотрудник
Института физики
НАН Беларусь

**Владислав
Базылевич,**
научный сотрудник
Института физики
НАН Беларусь

Владимир Дик,
зам. заведующего
центром
Института физики
НАН Беларусь,
кандидат физико-
математических
наук

Элеонора Зеге,
ведущий научный
сотрудник
Института физики
НАН Беларусь,
кандидат физико-
математических
наук

**Евгений
Илькевич,**
младший научный
сотрудник
Института физики
НАН Беларусь

**Александр
Калевич,**
младший научный
сотрудник
Института физики
НАН Беларусь

Иосиф Кацев,
ведущий научный
сотрудник
Института физики
НАН Беларусь,
кандидат физико-
математических наук

Михаил Король,
старший научный
сотрудник
Института физики
НАН Беларусь

Федор Осипенко,
научный сотрудник
Института физики
НАН Беларусь

**Владислав
Пещеренков,**
научный сотрудник
Института физики
НАН Беларусь

**Александр
Прихач,**
старший научный
сотрудник
Института физики
НАН Беларусь

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Оптические исследования атмосферы и подстилающей поверхности в Антарктике / А.П. Чайковский [и др.] // Беларусь в Антарктике: к 10-летию начала регулярных научных и экспедиционных исследований; под ред. акад. В.Ф. Логинова / Минск, 2016. – С. 50–101.
- CIMEL and multiwavelength lidar measurements for troposphere aerosol altitude distributions investigation, long-range transfer monitoring and regional ecological problems solution: field validation of retrieval techniques / A. Chaikovsky [et al.] // Optica Pura y Aplicada. 2004. Vol. 37. P. 3241–3246.
- AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization / B.N. Holben [et al.] // Remote Sens. Environ. 1998. Vol. 66. P. 1–16.
- AERONET. The Aerosol Robotic Network // <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>.
- Наземные и спутниковые исследования атмосферы и земной поверхности в Антарктике / А.П. Чайковский [и др.] // Научные исследования Беларусь в Антарктике; под ред. акад. В.Ф. Логинова / Минск, 2021. – С. 36–54.
- New algorithm to retrieve the effective snow grain size and pollution amount from satellite data / E.P. Zege [et al.] // Annals of Glaciology. 2008. Vol. 49. P. 139–144. – DOI: 10.3189/172756408787815004.
- Algorithm for retrieval of the effective snow grain size and pollution amount from satellite measurements / E.P. Zege [et al.] // Rem. Sens. of Env. 2011. V. 115, No. 10. P. 2674–2685. DOI: 10.1016/j.rse.2011.06.001.
- MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) // <https://modis.gsfc.nasa.gov/>.
- Sentinel-3 // <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-future-missions/sentinel-3>.