

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СУБЛИМАЦИИ СНЕГА НА СТАНЦИИ ВОСТОК, ЦЕНТРАЛЬНАЯ АНТАРКТИДА

канд. геогр. наук А.А. ЕКАЙКИН^{1,2}, метеоролог В.А. ЗАРОВЧАТСКИЙ³,
канд. геогр. наук В.Я. ЛИПЕНКОВ¹

¹ — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: ekaikin@aari.ru

² — Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле

³ — Российская антарктическая экспедиция, Санкт-Петербург

На протяжении пяти летних сезонов и двух зимовок Российской антарктической экспедиции на станции Восток (Антарктида), в 2011–2015 гг., проводились прямые измерения скорости сублимации снега. Установлено, что скорость сублимации зависит от двух параметров: приземной температуры воздуха и скорости ветра. В холодный период года (при средней суточной температуре < -45 °С) скорость сублимации примерно равна нулю, или даже имеет место конденсация водяного пара из атмосферы на снежную поверхность, которая в сумме за холодное полугодие составляет до 0,2 мм в.э. Суммарная сублимация снега в теплый период года (ноябрь – февраль) в среднем составляет около 2,3 мм в.э. Однако эта величина учитывает лишь сублимацию с поверхности снега, но не берет в расчет сублимацию снежных частиц во время метелевого переноса. Общая сублимация в течение антарктического лета может составлять 4–5 мм в.э. При современной скорости накопления снега на станции Восток, равной 23 мм в.э./год, годовое количество осадков в этом районе оценивается равным 25–28 мм.

Ключевые слова: Антарктида, снегонакопление, снежный покров, сублимация.

ВВЕДЕНИЕ

Количество осадков — один из наиболее важных климатологических показателей, характеризующий интенсивность влагооборота. При этом измерение количества твердых осадков сопряжено с большими методическими трудностями (Аверьянов, 1990), связанными с выдуванием снега из осадкомерных приборов. В Антарктиде инструментальное измерение количества осадков дополнительно осложняется их малым количеством. Как следствие, имеющиеся данные о количестве осадков по антарктическим станциям крайне ненадежны, и их нужно использовать с большой осторожностью во избежание получения ложных результатов. Гораздо более надежными являются данные о скорости снегонакопления, получаемые путем инструментальных наблюдений на снегомерных полигонах и гляциологических измерений в шурфах и по кернам скважин (см., например (Владимирова и др., 2015)). Во многих случаях именно скорость снегонакопления является конечной целью исследования — например, когда речь идет об оценке вклада изменения баланса массы ледника в уровень мирового океана. Но для сопоставления данных полевых наблюдений с результатами расчетов по региональным и глобальным климатическим моделям нужны данные о количестве осадков.

В условиях плато Центральной Антарктиды, где даже летом отсутствует таяние, а общий перенос снега в результате деятельности ветра равен нулю, применима формула: осадки = накопление + сублимация. Иными словами, наблюдаемая годовая величина накопления снега равна годовому количеству осадков за вычетом сублимации во время «теплого» периода.

Для станции Восток имеются несколько оценок интенсивности летней сублимации снега. Расчетные величины по методу турбулентной диффузии (Артемьев, 1976) показали, что за ноябрь, декабрь и январь должно сублимировать, соответственно, 0,38, 1,9 и 1,9 мм влаги (данные за февраль отсутствуют). Прямые измерения В.К. Ноздрюхина, выполненные летом 1961/62 г., показали меньшие значения: 0,36, 0,50 и 0,56 мм для ноября, декабря и января (Аверьянов, 1990). Напротив, измерения Д.Н. Дмитриева 1982 г. показывают на порядок большие величины (5–14 мм). Но в этом случае использовался образец не снега, а льда, имеющий относительно низкое альbedo, а потому подверженный большей сублимации, поэтому в дальнейшем мы данные Дмитриева не используем.

В настоящей работе мы приводим новые результаты долгосрочных прямых измерений сублимации снега на станции Восток, выполнявшихся между 56-й и 60-й Российскими антарктическими экспедициями (январь 2011 г. – январь 2015 г.), и предлагаем методику для аппроксимации скорости сублимации через температуру приземного воздуха и скорость ветра.

МЕТОДИКА

Для измерения сублимации снега мы использовали метод периодического (еже-суточного) взвешивания образца натурального снега. Измерение массы проводилось каждый день в одно и то же время (в 19 часов по местному времени) с помощью электронных весов *Precisa*. Номинальная точность весов составляет 0,005 г, максимальный допустимый вес образца — 620 г. Температура окружающего воздуха, при которой гарантирована стабильная работа прибора, — до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С учетом указанных характеристик весов была разработана следующая методика наблюдений. Образец со снегом помещается в пластиковый контейнер белого цвета (альbedo приблизительно такое же, как у снега) с горизонтальными размерами 10×10 см и высотой 6 см. В качестве образца используется блок натурального снега, вырезанный из ненарушенного участка снежной поверхности с наветренной стороны от станции. При характерной плотности снега в районе ст. Восток (около $0,33\text{--}0,35\text{ г/см}^3$) вес образца равен порядка 200–220 г. Контейнер со снегом помещается в снежную толщу таким образом, чтобы поверхность образца была на одном уровне с поверхностью окружающего снега.

После нескольких тестовых измерений мониторинг испарения снега был начат 1 февраля 2011 г. в рабочем режиме. Образец снега и весы были размещены на метеорологической площадке ст. Восток приблизительно в 100 м с наветренной стороны от основных строений станции. Поскольку даже в летний период температура воздуха систематически опускается ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, для установки весов была использована специальная утепленная будка с подогревом (установка «Улей», рис. 1). В качестве нагревателя в будке использовались лампы накаливания.

Проведенные тесты показали, что реальная точность определения массы образца хуже номинальной и составляет 0,05–0,1 г. Это связано с тем, что будка установлена на рыхлом основании (фирн) и при ветре может испытывать слабые колебания, которые и приводят к ухудшению результатов измерения. Тем не менее погрешность



Рис. 1. Установка для измерения скорости сублимации снега на ст. Восток.

измерений на 1–2 порядка меньше суточного изменения массы образца и поэтому удовлетворительна для целей нашего исследования.

Таким образом, для каждого суточного срока мы определяем изменение массы образца, а также выписываем из метеорологической таблицы ТМ-1 минимальные, максимальные и средние суточные значения температуры воздуха, среднюю скорость и максимальный порыв ветра, фиксируем все наблюдавшиеся за сутки явления (атмосферные осадки, метелевый перенос снега) и облачность.

Наблюдения велись с 1 февраля 2011 г. по 31 января 2012 г., с 14 декабря 2012 г. по 4 февраля 2013 г. и с 28 декабря 2013 г. по 5 февраля 2015 г. Общее количество сроков наблюдения составило 823. В дальнейшем из общей базы данных мы удалили те сроки, в которые наблюдались атмосферные осадки и метелевый перенос, что могло повлиять на изменение массы образца. После этой фильтрации в базе данных осталось 116 сроков, в которых могла наблюдаться чистая сублимация снега.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Суточное изменение массы образца колебалось от величин, близких нулю, до почти 0,5 г. Мы пересчитали скорость сублимации в $г/(м^2 \cdot сут)$ и построили график ее зависимости от порядкового номера дня в году (за 0 принята ночь с 31 декабря на 1 января) — рис. 2. На графике четко виден годовой ход сублимации снега: приблизительно с начала марта по конец октября значения близки нулю, либо наблюдаются отрицательные значения (т.е. осаджение влаги из атмосферы на поверхность снега). С начала ноября скорость сублимации быстро растет, достигает максимума в конце декабря — начале января, а затем быстро снижается до нуля к концу февраля.

Мы осреднили скорость сублимации для каждой декады и посчитали суммарные декадные значения сублимации. Согласно представленным данным, всего за теплый период года в сумме сублимирует 1,9 мм в.э. В холодный период года, в соответствии с ранее опубликованными данными (Аверьянов, 1990), преобладает поток влаги из атмосферы к снежной поверхности интенсивностью 0,001 мм в.э./сут, т.е. общий прирост массы во время зимних месяцев может составлять 0,2 мм в.э.

Теперь определим зависимость интенсивности скорости сублимации от различных метеорологических параметров.

В верхней части рис. 3 показана зависимость скорости сублимации от средней суточной приземной температуры воздуха по данным метеостанции. Как и ожида-

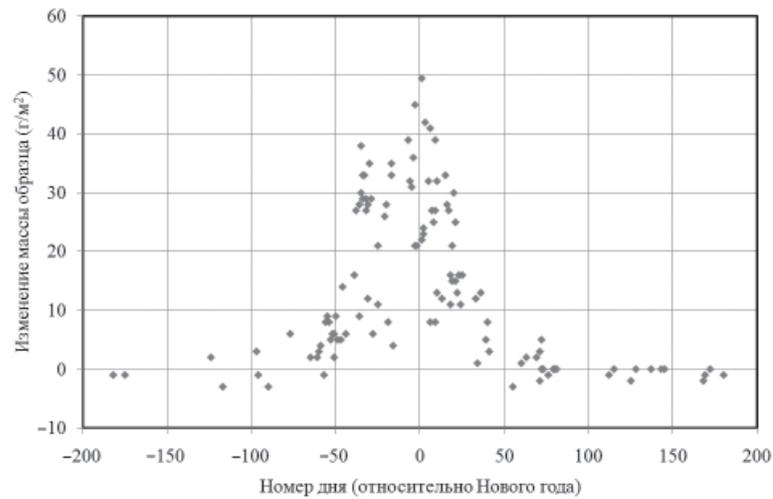


Рис. 2. Годовой ход скорости сублимации снега.

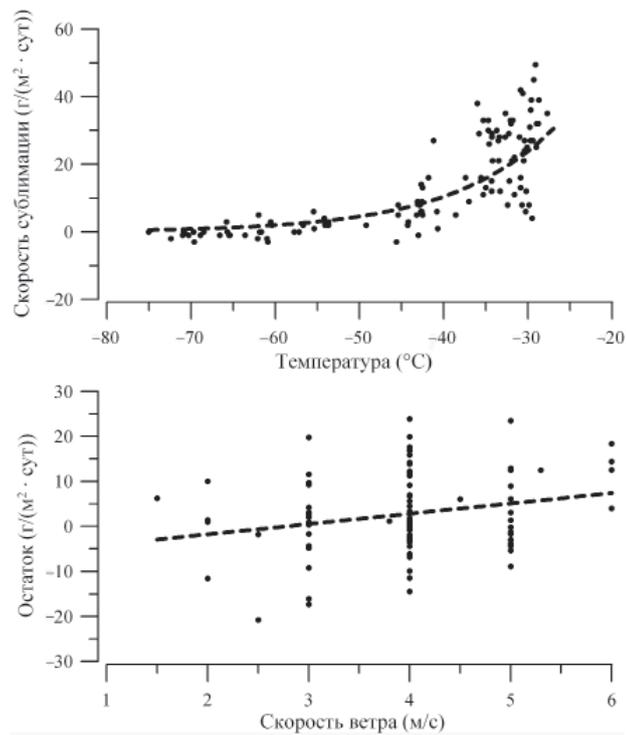


Рис. 3. Зависимость скорости сублимации от приземной температуры воздуха (наверху) и скорости ветра (внизу).

лось, эти два параметра связаны экспоненциальной зависимостью с коэффициентом детерминации (R^2) = 0,58. Ниже -45 °C связи нет (скорость сублимации практически равна нулю), а выше -45 °C зависимость выражается формулой:

$$s = 280,46 \cdot e^{0,0822 \cdot T}, \quad (1)$$

где s — скорость сублимации ($\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$), а T — температура в $^{\circ}\text{C}$.

Мы также проверили связь между скоростью сублимации и минимальной и максимальной суточными температурами и установили, что наилучшая корреляция наблюдается именно со средней суточной температурой.

Далее мы рассчитали разности между реально измеренной скоростью сублимации и скоростью сублимации по уравнению (1) и сопоставили полученные остатки с другими метеорологическими параметрами. Значимая корреляция ($R = 0,24$) обнаружена лишь со средней суточной скоростью ветра (нижняя часть рис. 3).

Таким образом, можно предложить оценку скорости сублимации снега на Востоке (s) для средних суточных температур воздуха выше -45°C по температуре (T) и скорости ветра (V):

$$s = 280,46 \cdot e^{0,0822 \cdot T} + 2,29V - 6,3. \quad (2)$$

Мы использовали формулу (2) для расчета скорости сублимации для периода с ноября 2011 по февраль 2012 г. по средним суточным данным о приземной температуре воздуха и скорости ветра. Суммарная сублимация за этот период составила 2,4 мм в.э. Эта величина существенно больше указанного выше значения (1,9 мм), полученного по реально измеренным данным. Дело в том, что данные измерений получены в те дни, когда не наблюдалось метелевого переноса снега, т.е. в дни с относительно низкой скоростью ветра (< 6 м/с), тогда как в реальности нередки дни с большей скоростью ветра (в указанный период — до 10 м/с).

Интересно, что если для расчета месячной суммы сублимации использовать средние месячные значения температуры воздуха и скорости ветра, то полученные величины будут в пределах 10 % совпадать с величинами, рассчитанными путем суммирования суточных значений.

Мы использовали этот приближенный подход, чтобы рассчитать среднее значение сублимации снега за теплый период года на станции Восток за весь период инструментальных наблюдений, и получили величину $2,3 \pm 0,2$ мм в.э./год. Эта величина хорошо совпадает с приведенными выше результатами прямых измерений В.К. Ноздрюхина и приблизительно вдвое ниже результатов теоретических расчетов А.Н. Артемьева.

Использованная нами методика учитывает лишь сублимацию с поверхности снега, но априори не способна измерить сублимацию частиц снега, участвующих в метелевом переносе. Считается, что последняя составляет 50–80 % от общей величины сублимации снега (Bintanja, Reijmer, 2001). Недоучет метелевого фактора существенно завышает общую оценку накопления снега в Антарктиде (Das et al., 2013).

Таким образом, общая величина годовой сублимации снега на ст. Восток может составлять порядка 4–5 мм в.э., что совпадает с теоретическими расчетами А.Н. Артемьева по тепловому балансу.

При современной скорости накопления снега на станции Восток, равной 23 мм в.э./год (Ekaikin et al., 2014), мы можем оценить количество осадков в этом районе равным 25–28 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На протяжении пяти летних сезонов и двух зимовок Российской антарктической экспедиции на станции Восток (Антарктида) мы проводили прямые измерения скорости сублимации снега. Установлено, что скорость сублимации зависит от двух параметров: приземной температуры воздуха и скорости ветра. В холодный период года скорость

сублимации примерно равна нулю, или даже имеет место конденсация водяного пара из атмосферы на снежную поверхность. Суммарная сублимация снега в теплый период года в среднем составляет около 2,3 мм в.э. Однако эта величина учитывает лишь сублимацию с поверхности снега, но не берет в расчет сублимацию снежных частиц во время метелевого переноса. Общая сублимация в течение антарктического лета может составлять 4–5 мм в.э. При современной скорости накопления снега на станции Восток, равной 23 мм в.э./год, мы оцениваем годовое количество осадков в этом районе равным 25–28 мм.

Дальнейшие работы в этом направлении должны включать измерение потока влаги от поверхности в атмосферу во время метелевого переноса для того, чтобы более точно оценить общую скорость сублимации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант 14-27-00030. Авторы благодарят Российскую антарктическую экспедицию за логистическое обеспечение данных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверьянов В.Г.* Гляциоклиматология Антарктиды. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 200 с.
- Артемьев А.Н.* Взаимодействие атмосферы и подстилающей поверхности на антарктическом плато // Тр. Сов. антаркт. экспед. 1976. Т. 66. 107 с.
- Владимирова Д.О., Екайкин А.А., Липенков В.Я., Попов С.В., Шибяев Ю.А.* Пространственная изменчивость скорости накопления и изотопного состава снега в Индоокеанском секторе Восточной Антарктиды, включая район подледникового озера Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1 (103). С. 69–86.
- Bintanja R., Reijmer C.H.* A simple parameterization for snowdrift sublimation over antarctic snow surfaces // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106. P. 31,739–731,748.
- Das I., Bell R.E., Scambos T.A., Wolovick M., Creyts T.T., Studinger M., Frearson N., Nicolas J.P., Lenaerts J.T.M., Van den Broeke M.R.* Influence of persistent wind scour on the surface mass balance of Antarctica // Nature Geoscience. 2013. Vol. 6. P. 367–371.
- Ekaikin A.A., Kozachek A.V., Lipenkov V.Ya., Shibaev Y.A.* Multiple climate shifts in the southern hemisphere over the past three centuries based on central Antarctic snow pits and core studies // Ann. Glaciol. 2014. Vol. 55. P. 259–266.

A.A. EKAYKIN, V.A. ZAROVCHATSKIY, V.Ya. LIPENKOV

MEASUREMENTS OF SNOW SUBLIMATION RATE AT VOSTOK STATION (ANTARCTICA)

During 5 summer seasons and 2 winters of Russian Antarctic Expedition at Vostok Station (Antarctica), 2011–2015. Direct measurements of snow sublimation were conducted. We established that the sublimation rate depends on two parameters: surface air temperature and wind speed. During the cold period of year (March–October with the average day air temperature below -45°C) the sublimation rate is near zero, or even condensation of water vapor on the snow surface occurs (in total up to 0.2 mm w.e.). The total sublimation during the warm period of year (November – February) is about 2.3 mm w.e. However, this value does not take into account the sublimation of the snow particles during the wind-driven snow transport. With this factor, total sublimation could be 4–5 mm w.e. Taking into account the present-day snow accumulation rate at Vostok, 23 mm w.e./year, there was estimated the annual precipitation amount in this area is about 25–28 mm w.e.

Keywords: Antarctica, snow accumulation, snow cover, sublimation rate.