

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛАНСА МАССЫ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЛЕДНИКОВОГО ЩИТА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА

И.А. Корнева<sup>1,2</sup>, О.О. Рыбак<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б

*E-mail: comissa@mail.ru*

<sup>2</sup>Филиал Института природно-технических систем, г. Сочи, Курортный проспект, 99/18

<sup>3</sup>Сочинский научно-исследовательский центр РАН, г. Сочи, ул. Театральная, 8а

*E-mail: orybak@yub.ac.be*

Моделирование баланса массы Антарктического ледникового щита является актуальной задачей как с точки зрения мониторинга его современного состояния, так и прогноза при будущих изменениях климата. Оценка изменений поверхностного баланса массы Антарктического щита позволяет исследовать величину климатического сигнала, а также степень воздействия внешних факторов на Антарктическую ледниковую систему. В работе представлено описание масс-балансового блока модели Антарктического ледникового щита на основе исходных данных климатической модели INMCM. Рассмотрены особенности расчета поверхностного баланса массы в Антарктиде, в частности приводятся схемы параметризации сублимации льда/снега на поверхности, а также переноса снега.

**Ключевые слова:** Антарктида, поверхностный баланс массы, ледниковый щит, математическая модель, мониторинг, прогноз.

**Введение.** Современное потепление климата оказывает значительное влияние на ледниковые системы Земли и в основном приводит к их деградации [1]. Состояние ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды является важным индикатором современных изменений климата, а также источником информации о динамике климата в прошлом [1–4]. Оледенение Гренландии широко исследуется в связи со значительным потенциальным вкладом от таяния этого щита в повышение уровня мирового океана. Так, за период 1993–2010 гг. скорость таяния Гренландского ледникового щита составила в среднем 121 Гт/год, что эквивалентно повышению глобального уровня моря на 0,33 мм/год [1], а в период последнего межледниковья (130–115 тыс. лет назад) по разным оценкам уровень моря повысился на 0,5–5,5 м относительно современного [5]. Исследование и моделирование динамики Антарктического ледникового щита представляет собой не менее актуальную задачу. В условиях продолжающегося потепления климата усиливается таяние шельфовых ледников [1, 6] и наблюдается

отступление ледников Западно-Антарктического щита [7–9]. Согласно данным IPCC [1] баланс массы Антарктического ледникового щита за период 1993–2003 гг. изменился на -200 – +50 Гт/год, что соответствует изменению уровня Мирового океана на -0,14 – +0,55 мм/год. Повышение точности оценок изменения уровня Мирового океана в результате колебаний баланса массы Антарктического ледникового щита является важной задачей для контроля состояния окружающей среды, которая может быть частично реализована с помощью математического моделирования.

Мониторинг баланса массы в Антарктиде осложняется недостатком наблюдений. Поэтому в настоящее время одним из эффективных инструментов реконструкции поверхностного баланса массы Антарктического ледникового щита является математическое моделирование [1, 4, 9–11]. Изменения баланса массы на поверхности ледникового щита можно рассматривать как основной и легко интерпретируемый показатель отклика на климатический сигнал [10–12]. Для прогностических оценок влияния

изменений климата на состояние ледниковых щитов модели последних используются совместно с моделями общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), фактически образуя модель Земной системы [13, 14].

Включение в модель Земной системы моделей ледниковых щитов позволяет существенно увеличить точность расчетов составляющих баланса массы при недостатке прямых метеонаблюдений, а также становится возможным прогнозировать состояние ледникового щита в зависимости от реализации того или иного сценария климатических изменений. Однако, процесс совмещения моделей сопряжен с некоторыми трудностями. Прежде всего, для корректного описания динамики ледникового щита требуется существенно большее разрешение, чем в МОЦАО. Кроме того, шаг по времени при интегрировании уравнений в моделях ледниковых щитов обычно составляет от нескольких суток до года [2, 13], в то время как в МОЦАО – несколько минут. Также результаты расчетов на обеих моделях зависят от значений различных параметров, которые иногда оказываются несовместимыми при сопряжении моделей. В последнее десятилетие одним из подходов к сопряжению моделей ледниковых щитов и МОЦАО является создание буферной климатической (энергобалансовой) модели, которая позволяет осуществлять обмен данными между двумя моделями с разными пространственно-временными характеристиками [13].

Данная работа носит концептуальный характер и содержит описание масс-балансового блока энергобалансовой модели для Антарктиды. Разрабатываемую модель предполагается в дальнейшем использовать в качестве буферной для подключения динамической модели Антарктического ледникового щита к модели Земной системы. В статье приводится описание исходных климатических данных, и рассматриваются параметризации для составляющих баланса массы. На следующем этапе работы будет проводиться расчет составляющих баланса массы Антарктического ледни-

кового щита с учетом приведенных параметризаций.

**1. Материалы и методы.** Энергобалансовая модель Антарктического ледникового щита состоит из двух блоков – климатического и масс-балансового. Масс-балансовый блок предназначен для расчета энергетического баланса на поверхности щита, а также для расчета баланса массы. Климатический блок служит для даунскейлинга необходимой климатической информации от климатической модели в масс-балансовый блок.

В настоящей работе в качестве исходных «климатических» данных для расчета баланса массы используются среднесуточные значения основных климатических переменных, осредненных за 30 модельных лет (приземные температура воздуха и атмосферное давление, количество осадков, скорость ветра, удельная влажность и балл облачности), полученных в ходе численных экспериментов на климатической модели INMCM, разработанной в Институте вычислительной математики (ИВМ) РАН [15]. Модель INMCM представляет собой гидростатическую модель общей циркуляции атмосферы и океана, основанную на конечно-разностном методе расчета. Атмосферный блок имеет 21 уровень по вертикали, шаг по времени – 12 минут. Модель активно развивается и используется во многих российских и международных проектах [15].

Основным преимуществом исходных модельных данных является возможность задавать требуемые параметры и период, позволяя производить прогноз состояния ледникового щита при будущих изменениях климата, а также исследовать его в прошлом. Пространственное разрешение исходных данных  $5 \times 4^\circ$ . Разрешение модели Антарктического щита составляет  $20 \times 20$  км, поэтому для расчета составляющих баланса массы осуществляется процедура интерполяции исходных модельных условно-климатических данных INMCM в сетку  $20 \times 20$  км (рис. 1). Компоненты поверхностного баланса массы рассчитываются для каждого отдельного дня, после чего полученные значения суммируются и

осредняются. Таким образом, выходными данными масс-балансового блока являются средние суммарные за год компоненты баланса массы. Код модели реализован на языке FORTRAN90.

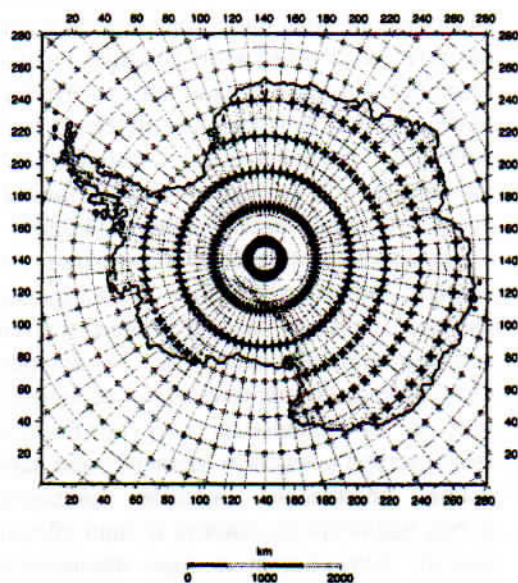


Рис. 1. Пространственная сетка  $5^\circ \times 4^\circ$ , используемая в INMCM (кружки), наложенная на стандартную сетку  $20 \times 20$  км, применяемую в энергобалансовой модели Антарктического ледникового щита. Крестиками показаны узлы сетки INMCM, попадающие в область покровного оледенения. Показана топография поверхности щита с шагом 500 м. На боковых границах показаны номера узлов сетки  $20 \times 20$  км

2. Особенности моделирования баланса массы в Антарктиде. Баланс энергии на поверхности ледникового щита [16, 17] определяется уравнением:

$$E = SW_1(1 - \alpha_s) - \varepsilon\sigma T_s^4 + LW_1 + H + LE + G, \quad (1)$$

где первый член – поглощенная солнечная радиация, второй – тепловое излучение поверхности, третий – встречное излучение атмосферы, четвертый – поток явного турбулентного тепла, пятый – поток скрытого турбулентного тепла, шестой – теплообмен с нижележащим слоем.

Схема для расчета энергетического баланса приведена на рис. 2. Составляю-

щие радиационного баланса считаются с часовым разрешением. При этом суточная амплитуда температуры в каждой точке Антарктического щита задается для каждого месяца согласно данным [18]. Последним членом в уравнении (1) ввиду его малости по сравнению с остальными можно пренебречь.

Годовой баланс массы на поверхности щита рассчитывается как разность между аккумуляцией и стоком:

$$SMB = AC - RO = (P + SU - Q_t) - (M - RF), \quad (2)$$

где  $P$  – осадки;  $SU$  – сублимация/возгонка льда на поверхности щита, а также дрейфующего снега;  $Q_t$  – перенос дрейфующего снега;  $M$  – таяние;  $RF$  – повторно замерзшая талая вода.

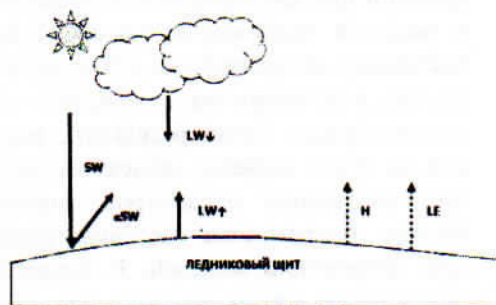


Рис. 2. Схема потоков энергии на поверхности Антарктического ледникового щита:  $SW$  – входящая к поверхности солнечная радиация,  $\alpha$  – альbedo,  $LW_{\downarrow}$  – встречное излучение атмосферы,  $LW_{\uparrow}$  – тепловое излучение поверхности,  $H$  – поток явного турбулентного тепла,  $LE$  – поток скрытого турбулентного тепла

Второй член в уравнении (2)  $SU$  – сублимация/возгонка льда и дрейфующего снега является определяющим для поверхностного баланса массы в Антарктиде. Сублимация определяется градиентом влажности между поверхностью льда/снега и вышележащим слоем воздуха и численно равна скрытому потоку турбулентного тепла. Используя теорию турбулентности в приземном слое, ее можно рассчитать как [19]

$$SU = k \cdot u^* \cdot q^*, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент перевода в кг в.э.;  $u^*$  – масштаб скорости ветра в приземном слое (динамическая скорость трения, м/с);  $q^*$  – масштаб влажности (кг/кг).

Согласно [20],  $u^*$  и  $q^*$  можно рассчитать по формулам:

$$u^* = \frac{\kappa U}{\ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right)}, \quad (4)$$

где  $U$  – скорость ветра на уровне 10 м над земной поверхностью (м/с);  $\kappa = 0,4$  – постоянная Кармана;  $z_0$  – параметр шероховатости.

$$q^* = \frac{\kappa q_s (RH - 1)}{\ln\left(\frac{z+z_q}{z_q}\right)}, \quad (5)$$

где  $q_s$  – удельная влажность насыщения (кг/кг);  $RH$  – относительная влажность;  $z_q$  – параметр шероховатости для влажности.

Сублимация льда на поверхности Антарктического щита происходит в основном в летние месяцы и преимущественно в прибрежных районах [19, 21]. Величина сублимации по разным оценкам варьирует от 0 до 150 мм в.э./год [19]. В прибрежных районах она составляет около 10–20% твердых осадков [19, 21, 22], а в районе Трансантарктических гор – более 50%, в среднем на материке – около 15% [19].

Параметризации сублимации и переноса дрейфующего снега рассмотрены в [19, 22]. Так, например, перенос снега  $Q$  (кг·м·с<sup>-1</sup>) может быть рассчитан как [22]:

$$Q = 0 \text{ если } u^* \leq u_i^* \quad (6)$$

$$Q = 0,297 \cdot \left( e^{2,803(u^* - u_i^*)} - 1 \right) \text{ если } u^* > u_i^*,$$

где  $u_i^*$  – динамическая скорость трения, рассчитываемая по формуле (4);  $u_i^* = 0,3$  м/с согласно [22].

Таяние ( $M$ ) в Антарктиде происходит только в некоторых прибрежных районах и на территории Западно-Антарктического полуострова, поэтому, в отличие от Гренландии, играет крайне незначительную роль. Как следствие, Антарктический ледниковый щит менее чувствителен к изменениям температуры воздуха. Величина растаявшего снега и льда считается через энергетический баланс. Сток  $RO$  определяется как разность количества растаявшего снега и льда  $M$  и частично замерзшей талой воды  $RF$ . В среднем по территории Антарктического ледникового щита значения  $RO$  близки к нулю, т.к. большая часть талой воды замерзает [11, 23]. Величина повторно замерзшей талой воды  $RF$  определяется как [24]

$$RF = \min[P_r W_r], \quad (7)$$

где  $W_r$  – количество доступной для повторного замерзания талой воды;  $P_r$  – потенциально удерживаемая вода. Значение  $P_r$  можно оценить по формуле [12]

$$P_r = \frac{\max(E, 0) [1 - \exp(-T_s)]}{L_m}, \quad (8)$$

где  $T_s$  – температура верхнего двухметрового слоя снега, которая условно равна температуре поверхности;  $L_m$  – удельная теплота плавления;  $E$  – энергия, доступная для таяния.

**Заключение.** На первоначальном этапе работы над энергобалансовой моделью Антарктического ледникового щита:

- была разработана процедура пересчета модельных «климатических» данных на пространственную сетку модели ледникового щита;
- параметризована суточная амплитуда температуры воздуха на основе данных наблюдений в Антарктиде;
- модель дополнена параметрическим описанием переноса дрейфующего снега.

В рамках дальнейшей работы предполагается разработать алгоритм расчета всех составляющих баланса массы с учетом предложенных параметризаций, сравнение с результатами других моделей и данных наблюдений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker et al. (eds.). Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013, 1535 p.
2. Рыбак О.О. Математические модели континентальных ледниковых щитов:1. Архитектура моделей // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 1. С. 12–23.
3. Рыбак О.О. Математические модели континентальных ледниковых щитов:2. Сравнительная характеристика // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 3. С. 12–21.
4. Maris M.N.A., de Boer B., Ligtenberg S. R.M. et al. Modelling the evolution of the Antarctic ice sheet since the last interglacial // *The Cryosphere*. V. 8. 2014. P. 1347–1360.
5. Milne G., Carlson A., Dutton A., et al. Estimating rates and sources of sea level change during past warm periods // *Past Global Changes Magazine*. 2014. V. 22. No. 1. P. 42.
6. Trusel L.D., Frey K.E., and Das S.B. Antarctic surface melting dynamics: enhanced perspectives from radar scatterometer data // *Journal of Geophysical Research*. V. 117. 2012. F02023. doi:10.1029/2011JF002126.
7. Barrand N.E., Vaughan D.G., Steiner N. et al. Trends in Antarctic Peninsula surface melting condition from observations and regional climate modeling // *Journal of Geophysical Research*. 2013. V. 118. P. 1–16. doi: 10.1029/2012JF002559.
8. Turner J., Lachlan-Cope T.A., Marshall G.J., Morris E.M., Mulvaney R., and Winter W. Spatial variability of Antarctic Peninsula net surface mass balance // *Journal of Geophysical Research*. V. 107. 2002. No. D13, 4173.
9. van Wessem J.M., Ligtenberg S.R.M., Reijmer C.H. et al. The modelled surface mass balance of the Antarctic Peninsula at 5.5 km horizontal resolution // *The Cryosphere*. V. 10. 2016. P. 271–285.
10. van de Berg W.J., van den Broeke M.R., Reijmer C.H., van Meijgaard E. Characteristics of the Antarctic surface mass balance, 1958–2002, using a regional atmospheric climate model // *Annals of Glaciology*. V. 41. 2005. P. 97–104.
11. van de Berg W.J., van den Broeke M.R., Reijmer C.H., and van Meijgaard E. Reassessment of the Antarctic surface mass balance using calibrated output of a regional atmospheric climate model // *Journal of Geophysical Research*. 2006. V. 111. D11104. doi:10.1029/2005JD006495.
12. Oerlemans J. The mass balance of the Greenland ice sheet: Sensitivity to climate change as revealed by energy-balance modeling // *The Holocene*. 1991. V. 1. P. 40–49.
13. Рыбак О.О., Володин Е.М. Использование энерговлажобалансовой модели для включения криосферной компоненты в климатическую модель. Ч. I. Описание модели и расчетные климатические поля приземной температуры воздуха и осадков // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 11. С. 33–45.
14. Рыбак О.О., Володин Е.М., Невечера А.П., Морозова П.А. Использование энерговлажобалансовой модели для включения криосферной компоненты в климатическую модель. Ч. II. Модельный баланс массы на поверхности Гренландского ледникового щита // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 6. С. 5–16.
15. Volodin E.M., Dianskii N.A. and A.V. Gusev, 2010. Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and ocean general circulations // *Izvestiya Atmospheric and Ocean Physics*. V. 46. P. 414–431.
16. Ettema J., van den Broeke M. R., van Meijgaard E., et al. Climate of the

Greenland ice sheet using a high-resolution climate model. Part 1: Evaluation // *The Cryosphere*. 2010. V. 4. P. 511–527.

17. *Ettema J., van den Broeke M.R., E. van Meijgaard, and W.J. van de Berg*. Climate of the Greenland ice sheet using a high-resolution climate model – Part 2: Near-surface climate and energy balance // *The Cryosphere*. 2010. V. 4. P. 529–544.

18. *Comiso J.C.* Variability and trends in Antarctic surface temperatures from In Situ and Satellite Infrared Measurements // *Journal of Climate*. 2000. V. 13. P. 1674–1696.

19. *Déry S.J. and Yau M.K.* Large-scale mass balance effects of blowing snow and surface sublimation // *Journal of Geophysical Research*. V. 107. No. D23. 4679. doi: 10.1029/2001JD001251, 2002.

20. *Garratt J.R.* The Atmospheric Boundary Layer. Cambridge University Press. 1992. 316 pp.

21. *van den Broeke M.R.* Spatial and temporal variation of sublimation on Ant-

arctica: results of a high-resolution general circulation model // *Journal of Geophysical Research*. 1992. V. 102. No. D25. P. 29765–29777.

22. *van Lipzig N.P.M., King J.C., Lachlan-Cope T.A., and van den Broeke M.R.* Precipitation, sublimation, and snow drift in the Antarctic Peninsula region from a regional atmospheric model // *Journal of Geophysical Research*. 2004. V. 109. D24106. doi:10.1029/2004JD004701.

23. *Lenaerts J.T.M., van den Broeke M. R., van de Berg W.J., van Meijgaard E., and P. Kuipers Munneke.* A new, high-resolution surface mass balance map of Antarctica (1979–2010) based on regional atmospheric climate modeling // *Geophysical research letters*. 2012. V. 39. L04501. doi:10.1029/2011GL050713.

24. *Janssens I. and Huybrechts P.* The treatment of meltwater retention in mass-balance parameterizations of the Greenland ice sheet // *Annals of Glaciology*. 2000. V. 31. P. 133–140.

## MODELING MASS BALANCE OF THE ANTARCTIC ICE SHEET FOR THE PURPOSE OF MONITORING AND PREDICTION

I.A. Korneva<sup>1,2</sup>, O.O. Rybak<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, Moscow, Glebovskaya St., 20b  
*E-mail: comissa@mail.ru*

<sup>2</sup>Branch of the Institute of Natural and Technical Systems, Sochi, Kurortny Av., 99/18

<sup>3</sup>Scientific Research Center of RAS, Sochi, Theatralnaya St., 8a

*E-mail: orybak@vub.ac.be*

Modeling of Antarctic mass balance is very important for monitoring its current state and also for predicting its behavior under the future climate conditions. By assessment the Antarctic ice sheet mass balance we can properly investigate the degree of climate influence on the ice sheet system. This work contains the description of the mass-balance block of the model based on the initial climate model's INMCM data. The method of calculation of the Antarctic ice sheet surface mass balance is considered, in particular the surface sublimation and snow drifting processes parameterizations.

**Key words:** Antarctica, surface mass balance, ice sheet, mathematical model, monitoring, prediction.