РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТНОГО ТАЯНИЯ В ЭНЕРГОБАЛАНСОВОЙ МОДЕЛИ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЛЕДНИКОВОГО ЩИТА

И.А. Корнева^{1,2}, О.О. Рыбак^{1,3}

¹ Филиал Института природно-технических систем, г. Сочи, Курортный проспект, 99/18

² Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,
г. Москва, ул. Глебовская, 20Б
E-mail: comissa@mail.ru

³ Сочинский научно-исследовательский центр РАН, г. Сочи, ул. Театральная, 8а
E-mail: o.o.rybak@gmail.com

Вариации поверхностного баланса массы Антарктического ледникового щита могут рассматриваться в качестве индикаторов климатических изменений и могут быть исследованы с помощью энергобалансовой модели ледникового щита. В работе представлено описание масс-балансового блока модели ЭВБМ-А, разработанного в целях интерактивного включения в МОЦАО ИВМ РАН модели ледникового щита Антарктиды. Рассмотрены алгоритмы для расчета энергетического баланса, поверхностного таяния и поверхностного стока и приведены результаты их расчета в среднем за 30-летний период доиндустриального климата. Полученные значения в целом удовлетворительно согласуются с проведенными в литературе оценками.

Ключевые слова: Антарктида, ледниковый щит, математическая модель, мониторинг, энергетический баланс, поверхностное таяние, сток.

Введение. Повсеместное таяние ледниковых систем за последние десятилетия уже привело к значительным последствиям: подъему уровня Мирового океана, усилению стихийных бедствий, разрушению инфраструктуры и т.д. [1]. С 50-х гг. XX в. исследования Антарктиды свидетельствовали об увеличении общей массы континентального льда вследствие роста количества осадков [2]. Однако, в последние десятилетия ситуация поменялась. По данным IPCC [1] баланс массы Антарктического ледникового щита за период 1993–2003 гг. изменился на от -200 до $+50$ Гт/год, что привело к изменениям уровня Мирового океана на $-0,14$ – $+0,55$ мм/год. Как показано в [2], баланс массы льда Восточной Антарктиды в настоящее время все еще возрастает, в то время, как тренд баланса массы Западной Антарктиды к концу XX в. был близок к нулю, а в XXI в. стал отрицательным. Таким образом, общий тренд изменений баланса массы Антарктического щита, как показывают последние оценки, в последние

годы стал отрицательным [2, 3]. Например, согласно [4] за период с 2002 по 2016 гг. он составил $-121,9 \pm 79$ Гт/год. По данным [5] за период 2003–2013 гг. изменения массы льда Антарктического ледникового покрова составляли -84 ± 22 Гт/год, -112 ± 10 Гт/год – в Западной Антарктиде, $+56 \pm 18$ Гт/год – в Восточной. Вклад таяния Антарктического льда в подъем уровня Мирового океана составляет по разным оценкам за период с конца XX по начало XXI вв. около $0,2$ мм/год [2, 3].

Баланс массы на поверхности Антарктического ледникового покрова определяется в основном количеством выпадающих осадков, которые существенно превышают поверхностный сток, даже на территории Антарктического полуострова. По оценкам [6] поверхностный баланс массы для всего щита, включая шельфовые ледники, составляет 2418 ± 181 Гт/год, отдельно для Антарктического полуострова он равен 351 ± 58 Гт/год (поверхностное таяние здесь составляет 34 ± 15 Гт/год) [7]. По

оценкам авторов данной работы 33 Гт/год талой воды здесь замерзает в толще ледника, сток составляет всего около 4 Гт/год (т.е. около 12%).

Поверхностное таяние Антарктического ледникового щита происходит на шельфовых ледниках, в прибрежных районах и на Антарктическом полуострове [7–10]. На Антарктический полуостров приходится около 66% всего таяния [11]. Наиболее интенсивное таяние здесь вызвано значительным повышением температуры воздуха и температуры поверхности прилегающих морей Беллинсгаузена и Уэдделла [8]. Наблюдения показывают, что за последние десятилетия продолжительность таяния на Антарктическом полуострове статистически значимо увеличивается [8]. Наиболее интенсивное поверхностное таяние происходит на шельфовых ледниках Антарктического полуострова, максимальное – на шельфовом леднике Ларсена – около 400 мм в.э./год [7, 10].

В последние десятилетия математическое моделирование является универсальным инструментом исследования динамики массы ледниковых щитов [1, 12–16]. В последние годы активно создаются и совершенствуются модели Земной системы, которые включают в себя как модели атмосферы и океана (МОЦАО), так и модели ледниковых щитов [16, 17]. Такая модель Земной системы разрабатывается и в Институте вычислительной математики ИВМ РАН [16, 17].

Включение в модель Земной системы моделей ледниковых щитов позволяет существенно увеличить точность расчетов составляющих баланса массы, как для расчетов современных условий, так и для прогнозных оценок. Однако, процесс совмещения моделей сопряжен с такими трудностями, как разное пространственное разрешение МОЦАО и моделей ледниковых щитов, разное их временное разрешение, различия в параметризациях при сопряжении моделей [16–18]. Создание относительно простой

энергобалансовой модели, которая позволяет осуществлять обмен данными между двумя моделями и рассчитывать баланс массы и энергии на территории ледникового щита, является в последнее время актуальным способом решения проблемы сопряжения моделей [16].

В рамках работы над перспективной моделью Земли в ИВМ РАН была разработана первоначальная версия энергобалансовой модели Антарктического ледникового щита ЭВБМ-А [18, 19]. Исходными климатическими данными для расчета баланса массы являются среднесуточные значения основных климатических параметров, осредненных за 30 модельных лет (приземные температура воздуха и атмосферное давление, количество осадков, скорость ветра, удельная влажность и балл облачности), полученных в ходе численного эксперимента на климатической модели INMCM, разработанной в ИВМ РАН [20]. Пространственное разрешение исходных климатических данных $5^\circ \times 4^\circ$ в атмосферном блоке. Для расчетов с моделью Антарктического щита исходные данные проинтерполированы в сетку 20×20 км [18].

Данная работа содержит описание масс-балансового блока ЭВБМ-А и первые результаты расчетов составляющих энергетического баланса, величины поверхностного таяния и стока. В статье приводятся параметризационные выражения для компонент энергетического баланса.

1. Метод расчета таяния в ЭВБМ-А. Энерговлагодобалансовая модель Антарктического ледникового щита состоит из двух блоков – климатического и масс-балансового. Климатический блок используется для даунскейлинга климатической информации. В масс-балансовом блоке рассчитывается энергетический баланс и баланс массы на поверхности щита SMB:

$$SMB = AC - RO = (P + SU - Q_i) - (M - RF), \quad (1)$$

где P – осадки; SU – сублимация/возгонка льда на поверхности лед-

никового щита и испарение частиц снега в ходе метелевого переноса; Q_t – собственно метелевый перенос; M – таяние; RF – повторно замерзшая талая вода.

Основную роль в формировании поверхностного баланса массы играет аккумуляция в виде твердых осадков. Однако в прибрежных районах, на территории Западно-Антарктического щита и полуострова, а также на шельфовых ледниках таяние также играет важную роль. На Антарктическом полуострове по оценкам [7] оно составляет около 10% от величины баланса массы.

Для расчета таяния на поверхности ледниковых щитов в энергобалансовых моделях применяется два метода: метод энергетического баланса (1) и метод суммирования градусо-дней с положительной температурой. Второй метод часто используется при расчете таяния в Гренландии [21]. В модели ЭВБМ-А слой стаивания считается через энергетический баланс:

$$\begin{aligned} M &= \max(E, 0) / L_M & T_s &\geq 273,15 \\ M &= 0 & T_s &\leq 273,15 \end{aligned} \quad (2)$$

где L_M – удельная теплота плавления льда; E – доступная для таяния энергия, которая определяется как:

$$E = SW_{net} + LW_{net} + H + LE, \quad (3)$$

где первый член – поглощенная поверхностью льда солнечная радиация, второй – баланс длинноволновой радиации, третий – поток явного турбулентного тепла, четвертый – поток скрытого турбулентного тепла.

Поглощенная солнечная радиация считается через инсоляцию в зависимости от времени и географических координат. Альbedo поверхности α_s задано постоянным значением для разных районов Антарктического щита согласно данным [22]. Следует отметить, что при использовании постоянных значений α_s его понижение во время таяния не учитывается, что ведет к некоторому занижению значений поглощенной солнечной радиации. Попытки использования

имеющихся простых параметризаций альbedo поверхности (не требующих учета свойств снежной толщи), например, через температуру поверхности [23] или через высоту снежного покрова [24] приводят, наоборот, к существенному завышению значений поглощенной радиации, что ведет к завышенным оценкам величины таяния.

Длинноволновый баланс на поверхности щита равен разности встречного излучения атмосферы и излучения поверхности, с поправкой на облачность:

$$LW_{net} = c (LW_{\downarrow} - LW_{\uparrow}) = c (\varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4), \quad (4)$$

где T_s и T_a – температура поверхности льда/снега и температура воздуха; ε_s и ε_a – излучательная способность поверхности (принята равной 1) и атмосферы; c – коэффициент, учитывающий влияние облачности. Сильное выхолаживание ледниковой поверхности приводит к тому, что температура поверхности обычно значительно ниже температуры приземного слоя воздуха, поэтому температура поверхности была скорректирована по значениям температуры воздуха на 2 м с помощью линейной зависимости, приведенной в [25]. Излучательная способность атмосферы ε_a была рассчитана по формуле Прата [26, 27].

Потоки явного и скрытого тепла вычислялись на основе теории подобия Мони́на-Обухова:

$$H = k_1 \cdot u^* \cdot T^*, \quad (5)$$

$$LE = k_2 \cdot u^* \cdot q^*, \quad (6)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты перевода в Вт/м²; u^* – масштаб скорости ветра в приземном слое (динамическая скорость трения, м/с); T^* – масштаб температуры (К); q^* – масштаб влажности (кг/кг). Масштабы температуры и влажности зависят от градиента этих величин в приземном слое. Основные неопределенности в расчетах этих потоков связаны именно с заданием вертикального градиента температуры и влажности в

приземном слое воздуха. Вертикальный градиент температуры в нашем случае задан постоянным для каждого месяца по данным измерений на немногочисленных метеостанциях [28–30]. Принято во внимание, что во внутренних районах Антарктиды приземная инверсия наблюдается практически в течение всего года, в то время как в Западной части и в прибрежных районах она наблюдается в зимний период. Тем не менее, для более точного задания вертикального градиента температуры необходимо использовать более подробные данные – данные радиозондов, градиентных измерений, реанализа, особенно в Западной Антарктиде и в прибрежных районах.

Параметр влажности q^* в формуле (6) рассчитывается через относительную влажность u поверхности [31, 32]. Эта параметризация очень проста, однако, как показывает сравнение с данными наблюдений, относительная влажность по нашим расчетам в некоторых районах оказывается завышенной, что приводит к занижению величин возгонки.

Таблица 1. Компоненты энергетического баланса в среднем для территории Антарктического щита, Вт/м². Положительные значения потоков означают приток к поверхности земли

SW _{net}	LW _{net}	H	LE
16	-29	71	4

Средние по территории Антарктического щита среднегодовые компоненты энергетического баланса приведены в табл. 1. Значения радиационного баланса и скрытого потока тепла в различных регионах и в среднем по территории щита согласуются с данными наблюдений [27, 33–35] и существующими модельными оценками [36, 37]. Значения потока явного турбулентного тепла по сравнению с существующими оценками [36, 38] завышены, по-видимому, из-за того, что, соответственно, завышен вертикальный градиент температуры в слое инверсии.

2. Результаты и обсуждение. Поверхностное таяние Антарктического щита в среднем за 30-летний период по расчетам модели ЭВБМ-А представлено на рис. 1а, а по данным модели RACMO [40] на рис. 1б. Заметим, что модельные оценки таяния в некоторых районах из-за недостаточного разрешения могут быть несколько занижены по сравнению с данными наблюдений [11, 39]. Тем не менее, в целом, значения величины таяния, полученные по модели RACMO, хорошо согласуются с данными спутниковых наблюдений [8, 11, 39].

В сравнении с данными модели RACMO [40] (рис. 1б) видно, что границы таяния немного расширены. Так, на территории Западно-Антарктического щита граница зоны таяния смещена к востоку, в прибрежных районах Восточной Антарктиды границы смещены вглубь континента по сравнению с расчетами [40]. Однако полученные нами значения слоя стаивания в этих районах не превышают 5 кг/м²/год. Величина таяния в различных районах щита в целом неплохо воспроизводится моделью ЭВБМ-А по сравнению с оценками [40]. В районах покровного оледенения значения таяния по модели ЭВБМ-А практически везде составляют менее 5 мм в.э./год, что согласуется с расчетами модели RACMO (рис. 1б). На шельфовых ледниках величины слоя стаивания различаются. Так, например, таяние на поверхности шельфовых ледников Шеклтона и Западного сильно занижено в ЭВБМ-А (5–20 мм в.э./год) по сравнению с RACMO (до 100 мм в.э./год), а шельфового ледника Эймера – наоборот, завышено. По данным модели RACMO таяние на шельфовых ледниках Росса и Ронне-Фильхнера составляет от 0 до 20 мм в.э./год, причем 20 мм в.э./год оно достигает только на окраинах (рис. 1б). По нашим расчетам таяние на этих ледниках немного завышено: на леднике Ронне-Фильхнера оно в среднем составляет 10 мм в.э./год, а на большей части ледника Росса – от 10 до 20 мм в.э./год, с

максимальными значениями – более 20 мм в.э./год. Величина стаивания на шельфовых ледниках Западно-Антарктического полуострова по расчетам модели ЭВБМ-А, наоборот, занижена и составляет от 20 мм в.э./год на западных шельфах полуострова, и до 400 мм в.э./год на шельфовом леднике Ларсена. По данным модели RASMO соответствующие значения составляют от 50 мм в.э./год и до 400 мм в.э./год [40]. Точный расчет величины таяния на шельфовых ледниках в модели ЭВБМ-А, по-видимому, требует улучшения параметризации альбедо поверхности.

Рис. 1. Таяние на поверхности Антарктического ледникового щита: по данным расчетов ЭВБМ-А, кг/м²/год (а); по данным расчетов (рис. 1а [40]), мм в.э./год (б)

По оценкам модели RASMO поверхностный сток с территории Антарктического щита равен 5 ± 2 Гт/год, что составляет всего около 6% от величины по-

верхностного таяния [41]. Поверхностный сток с Антарктического полуострова составляет 4 ± 4 Гт/год [7].

Поверхностный сток РО по расчетам модели ЭВБМ-А приведен на рис. 2. Заметим, что жидкие осадки бывают на территории Антарктиды редко и составляют в среднем менее 1% [42]. Поэтому на рис. 2 приведены значения стока без учета жидких осадков. Видно, что сток с покровной части Антарктического щита происходит только в крайних прибрежных районах и составляет менее 10 кг/м²/год. Сток талой воды на шельфовых ледниках (кроме Антарктического полуострова) составляет от 1 до 50 кг/м²/год, что сравнимо с величиной таяния в этих районах. Сток с шельфовых ледников Антарктического полуострова (рис. 2) составляет вплоть до 300 кг/м²/год, что согласуется с оценками [7].

Рис. 2. Сток с поверхности Антарктического ледникового щита по данным расчетов ЭВБМ-А (кг/м²/год)

Закключение. Представлены среднегодовые оценки таяния и стока на поверхности Антарктического ледникового щита за 30-летний доиндустриальный период по данным расчетов массбалансового блока модели ЭВБМ-А. Модель была разработана с целью сопряжения климатической модели INMCM и модели Антарктического лед-

никового щита. В качестве климатического форсинга были использованы данные климатической модели ИВМ РАН INMCM. Показано, что полученные среднегодовые значения слоя стаивания и стока на поверхности удовлетворительно согласуются с полученными ранее оценками.

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. Котляков В.М., Глазовский А.Ф., Москалевский М.Ю. Динамика массы льда в Антарктиде в эпоху потепления // Лед и снег. 2017. № 2 (57). С. 149–169.
3. Shepherd A., Ivins E.R., Geruo F., et al. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance // Science. 2012. V. 338 (6111). P. 1183–1189.
Doi: 10.1126/science.1228102.
4. Watkins M.M., Wiese D.N., Yuan D.N., et al. Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. 2015. V. 120. P. 2648–2671. Doi: 10.1002/2014JB011547.
5. Martin-Espanol A., Zammit-Mangion A., Clarke P.J., et al. Spatial and temporal Antarctic Ice Sheet mass trends, glacio-isostatic adjustment, and surface processes from a joint inversion of satellite altimeter, gravity, and GPS data // Journal of Geophysical Research. Earth Surface. 2016. V. 121. P. 182–200.
Doi: 10.1002/2015JF003550.
6. Lenaerts J.T.M., van den Broeke M.R., van de Berg W.J. et al. 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.
7. 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. 2016. V. 10. P. 271–285.
8. 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.
9. Turner J., Lachlan-Cope T.A., Marshall G.J. et al. Spatial variability of Antarctic Peninsula net surface mass balance // Journal of Geophysical Research. 2002. V. 107. D13. P. 4173.
10. Trusel L.D., Frey K.E., and Das S.B. Antarctic surface melting dynamics: enhanced perspectives from radar scatterometer data // Journal of Geophysical Research. 2012. V. 117. F02023.
Doi: 10.1029/2011JF002126.
11. Kuipers Munneke P., Picard G., van den Broeke M.R. et al. Insignificant change in Antarctic snowmelt volume since 1979 // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. P. L01501. Doi:10.1029/2011GL050207.
12. Рыбак О.О. Математические модели континентальных ледниковых щитов: 1. Архитектура моделей // Криосфера Земли. 2008. № 1 (XII). С. 12–23.
13. Рыбак О.О. Математические модели континентальных ледниковых щитов: 2. Сравнительная характеристика // Криосфера Земли. 2008. № 3 (XII). С. 12–21.
14. 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. 2005. V. 41. P. 97–104.
15. van de Berg W.J., van den Broeke M.R., Reijmer C.H., van Meijgaard E. Re-assessment 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.

16. Рыбак О.О., Володин Е.М. Использование энергволабалансовой 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.

17. Рыбак О.О., Володин Е.М., Невечеря А.П., Морозова П.А. Использование энергволабалансовой 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.

18. И.А. Корнева, О.О. Рыбак. Моделирование баланса массы Антарктического ледникового щита для целей мониторинга и прогноза // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь: ИПТС. 2016. Вып. 5 (25). С. 72–77.

19. Korneva I.A., Rybak O.O., Volodin E.M. Surface mass balance modeling of the Antarctic ice sheet: evaluating contributions of the main components and coupling to an AO GCM // *Geophysical Research Abstracts*. 2017. V. 19. EGU2017-12705-1.

20. Volodin E.M., Dianskii N.A. Gusev A.V. Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and ocean general circulations // *Izvestiya Atmospheric and Ocean Physics*. 2010. V. 46. P. 414–431.

21. Janssens I., Huybrechts P. The treatment of meltwater retention in mass-balance parameterizations of the Greenland ice sheet // *Annals of Glaciology*. 2000. V. 31. P. 133–14.

22. Laine V. Antarctic ice sheet and sea ice regional albedo and temperature change, 1981–2000, from AVHRR Polar Pathfinder data // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112. P. 646–667.

23. Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., et al. The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part 1. Model description. Tech. Rep. 349. Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany, 2003. 127 p.

24. Oerlemans J., Knap W.H. A 1 year record of global radiation and albedo in the ablation zone of Morteratschgletscher, Switzerland // *Journal of Glaciology*. 1998. V. 44. No. 147. P. 231–238.

25. Meyer H., Katurji M., Appelhans T., et al. Mapping daily air temperature for Antarctica based on MODIS LST // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. No. 732. Doi:10.3390/rs8090732.

26. Prata A.J. A new longwave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1996. V. 122. P. 1127–1151.

27. Ganju A., Gusain H.S. Six years observations and analysis of radiation parameters and surface energy fluxes on ice sheet near ‘Maitri’ research station, East Antarctica // *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 2017. V. 83. No. 2. P. 449–460.

28. Naithani J., Dutta H. Diurnal and seasonal variation in the surface layer parameters observed at Maitri station, Antarctica // *Fourteenth Indian Expedition to Antarctica, Scientific Report*. 1998. Department of Ocean Development, Technical Publication No. 12. P. 57–70.

29. Hudson S., Brandt R. A look at the surface-based temperature inversion on the Antarctic Plateau // *Journal of Climate*. 2005. V. 18. P. 1673–1696.

30. Tomasi C., Petkov B., Benedetti E. et al. Analysis of a 4 year radiosonde data set at Dome C for characterizing temperature and moisture conditions of the Antarctic atmosphere // *Journal of geophysical research*. 2011. V. 116. D15304. Doi:10.1029/2011JD015803.

31. Déry S.J., Yau M.K. Large-scale mass balance effects of blowing snow and

surface sublimation // *Journal of Geophysical Research*. 2002. V. 107. D23. P. 4679. Doi: 10.1029/2001JD001251.

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

33. *van As D., van den Broeke M., Reijmer C., van de Wal R.* The summer surface energy balance of the high Antarctic plateau // *Boundary-Layer Meteorology*. V. 115. No. 2. P. 289–317.

34. *Yamanouchi T., Charlock T. P.* Comparison of radiation budget at the TOA and surface in the Antarctic from ERBE and ground surface measurements // *Journal of Climate*. 1995. V. 8. P. 3109–3120.

35. *Van den Broeke M., Reijmer C., van de Wal R.* Surface radiation balance in Antarctica as measured with automatic weather stations // *Journal of Geophysical Research*. 2004. V. 109. D09103.

36. *Van de Berg W. J., van den Broeke M. R., Meijgaard E.* Heat budget of the East Antarctic lower atmosphere derived from a regional atmospheric climate model // *Journal of geophysical research*. 2007. V. 112. D23101. Doi:10.1029/2007JD008613.

37. *Hines K.M., Bromwich D.H., Rasch P.J., Iacono M.J.* Antarctic clouds

and radiation within the NCAR climate models // *Journal of Climate*. 2004. V. 17. I. 6. P. 1198–1212.

38. *Van den Broeke M. R., van As D., Reijmer C., van de Wal R.* Sensible heat exchange at the Antarctic snow surface // *International Journal of Climatology*. 2005. V. 25. P. 1081–1101.

39. *Trusel L., Frey K., Das S. et al.* Satellite-based estimates of Antarctic surface meltwater fluxes // *Geophysical research letters*. 2013. V. 4. P. 6148–6153.

40. *Van den Broeke M.R., König-Langlo G., Picard G. et al.* Surface energy balance, melt and sublimation at Neumayer Station, East Antarctica // *Antarctic Science*. 2010. V. 22 (1). P. 87–96.

41. *Lenaerts J., Vizcaino M., Fyke J. et al.* Present-day and future Antarctic ice sheet climate and surface mass balance in the Community Earth System Model // *Climate Dynamics*. 2016. V. 47. P. 1367–1381.

42. *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*. 2005. V. 41. P. 97–104.

EVALUATION OF SURFACE MELT RATE USING A MASS BALANCE MODEL OF THE ANTARCTIC ICE SHEET

I.A. Korneva^{1,2}, O.O. Rybak^{1,3}

¹Branch of Institute of Natural and Technical Systems, Sochi, Kurortny Av., 99/18

²Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, Moscow, Glebovskaya St., 20b
E-mail: *comissa@mail.ru*

³Sochi Scientific Research Centre, Russian Academy of Sciences, Sochi, Theatralnaya St., 8a
E-mail: *o.o.rybak@gmail.com*

Variations in surface mass balance of the Antarctic ice sheet can be considered as indicators of global climate change and can be investigated using the energy balance models. In the paper, we present a description of a mass balance unit EWBM-A designed for coupling of an ice sheet model and a climate model. We describe algorithms of energy balance calculation on the surface of the Antarctic ice sheet, of surface melt rate and run-off. Calculations are carried out for a 30-yr pre-industrial period. Our results are compared with the results of similar model studies. We show satisfactory similarity between both.

Keywords: Antarctica, ice sheet, mathematical model, monitoring, energy balance, surface melt, run-off.