

20.1

740



РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЮЖНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ И  
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. ВОРОВИЧА И.И.

**ЭКОЛОГИЯ**

**ЭКОНОМИКА**

**ИНФОРМАТИКА**

**XXXIX конференция  
“Математическое моделирование в  
проблемах рационального  
природопользования”**

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛАНСА МАССЫ ГОРНОГО ЛЕДНИКА<sup>3</sup>

Рыбак Е.А.

Государственный Южный научно-исследовательский полигон РАН,

г. Сочи, Rybak@gmail.com

Рыбак О.О.

Сочинский научно-исследовательский центр РАН, г. Сочи

o.o.rybak@gmail.com

Актуальность математического моделирования баланса массы горных ледников обусловлена той ролью, которое горное оледенение играет в формировании регионального гидрологического режима и тем, насколько сильно оно влияет на региональную экономику в различных регионах мира [1]. Прогностические расчеты состояния горного оледенения становятся особенно важными в условиях изменяющегося климата. Разрабатываемая в настоящее время в ГНИП РАН 3-мерная модель горного ледника состоит из динамического блока, описывающего течение льда, и энергобалансового блока, описывающего эволюцию баланса массы ледника в соответствии с задаваемыми метеорологическими условиями.

В основе метода параметризации баланса лежит энергобалансовая модель (ЭБМ), предложенная в [2]. ЭБМ позволяет рассчитать слой снега/льда, который должен растаять при заданных радиационных условиях и при заданном температурном режиме. При этом из анализа на настоящем этапе исключен ряд второстепенных процессов, в частности, влияние облачности на соотношение прямой и рассеянной радиации. В основе ЭБМ лежит уравнение для расчета кумулятивного баланса массы ледника  $B$ , то есть приращения или потери массы в каждой точке пространственной сетки за определенное время  $t$ :

$$B(t+1) = B(t) + \Delta t \left\{ \min\left(0, -\frac{\Psi}{L_m \cdot \rho}\right) \right\} + P_{solid}(t). \quad (1)$$

Член в фигурных скобках представляет собой таяние на поверхности (абляцию) в случае положительного баланса тепловой энергии. Испарением с поверхности пренебрегают. Предполагается, что твердые

<sup>3</sup> Работа выполнена по проекту 7.5 «Оценка будущих изменений климата от нескольких лет до столетий под влиянием внешних воздействий (региональный аспект) по Программе Президиума РАН № 64

осадки  $P_{solid}$  выпадают при температуре воздуха ниже  $+2^{\circ}\text{C}$ . Составляющими баланса тепловой энергии на поверхности ледника являются прямая и рассеянная радиация и турбулентное тепло. Поток энергии  $\psi$ , на поверхности ледника рассчитывается как

$$\psi = (1 - \alpha) \cdot Q + c_0 + c_1 \cdot T_{air}, \quad (2)$$

где первое слагаемое в правой части представляет собой приходящую радиацию (сумму прямой и рассеянной радиации) на поверхности ледника, член  $c_0 + c_1 \cdot T_{air}$  – баланс длинноволновой радиации и турбулентного теплообмена. Альбедо меняется от 0.37 (лед) до 0.78 (снег) и экспоненциально убывает в зависимости от толщины снежного покрова  $d$ :

$$\alpha = \alpha_{snow} + (\alpha_{ice} - \alpha_{snow}) \cdot \exp(-d/d^*), \quad (3)$$

где  $d^*$  - характерная толщина снежного покрова. Приходящая солнечная радиация состоит из двух компонент – прямой и рассеянной:

$$Q = Q_{dir} + Q_{dif} = f_{dir} S \tau \sin(h_s + \gamma_s) + f_{dif} S \tau \sin(h_s), \quad (4)$$

где  $f_{dir}=0,6$  и  $f_{dif}=0,4$  - условные доли прямой и рассеянной радиации в приходящей радиации  $S$ ,  $\tau$  - коэффициент прозрачности атмосферы,  $h_s$  - угол солнца над горизонтом,  $\gamma_s$  - угол между проекцией солнца на горизонтальную плоскость и поверхностью ледника в узле сетки:

$$\gamma_s = \text{atan}(\phi + \cos(a - \theta)), \quad (5)$$

где  $a$  - текущий азимут солнца, зависящий от географических координат и времени суток,  $\theta$  - ориентация поверхности ледника.

Поскольку регулярные метеорологические наблюдения непосредственно на самих ледниках чрезвычайно редки, возникает проблема репрезентативности метеоданных, которые можно бы было использовать в расчетах. Самым очевидным выходом является использование данных близлежащих метеостанций.

1) Температура воздуха. Если доступны ежечасные данные о температуре воздуха на метеостанции поблизости от ледника, последние могут быть легко пересчитаны в температуру воздуха над ледником с учетом вертикального градиента температуры. Реальный суточный ход температуры будет отличаться от расчетного, поскольку сам ледник влияет на формирование температурного режима в

приземном слое воздуха, однако этот эффект может быть учтен при более аккуратных расчетах. Как правило, однако, доступными являются метеонаблюдения с большей временной дискретностью – 1 сутки или 1 месяц. В этом случае может быть проведен формальный пересчет в ежечасные данные с учетом сведений о максимальной и минимальной температурах.

2) Осадки. Ледник является интегратором, который преобразует осадки, которые можно ассоциировать со случайными шумами, в отклик, подобный случайным блужданиям [2]. В этом случае, точность количественного описания индивидуального события выпадения осадков не столь уж важно. Поэтому для описания осадков над горным ледником можно применить ряд методов:

- использовать ежесуточные данные об осадках на близлежащей станции и прозвести их калибровку по отрывочным или неполным данным наблюдений на самом леднике;
- использовать для калибровки косвенные данные – например измерения толщины ежегодных слоев в снежных шурфах в зоне аккумуляции ледника;
- воспроизвести процесс выпадения осадков с помощью простой авторегрессионной модели или одной из ее разновидностей (модели с сезонным ходом и т.д.).

ЭБМ была протестирована на модельном горном леднике с простой искусственно заданной топографией поверхности в численных экспериментах длительностью 110 модельных лет. Начало балансового года соответствовало 271-му дню года (последнему дню сентября). Для тестирования ЭБМ были использованы ежесуточные данные о температуре воздуха и осадках на станции Сочи и средние многолетние данные об осадках на станции Ачишхо, которая условно считалась репрезентативной для модельного ледника. Для каждого месяца года был рассчитан переводной коэффициент для перерасчета среднесуточных данных на ст. Сочи в соответствующие ежесуточные данные на ст. Ачишхо. Абсолютная высота поверхности модельного ледника подбиралась таким образом, чтобы в ходе расчетов получить слабоположительный и слабоотрицательный многолетний ход удельного баланса массы (рисунок 1).

В точках, находящихся в зонах аккумуляции и абляции были рассчитаны балансы массы и условная толщина снежного покрова для вариантов 1 и 2 (рисунок 2). Баланс массы обнуляется в конце каждого балансового года, поэтому на рисунке 2 эта величина имеет пикообразную форму. Условная толщина снежного покрова – это кумулятивная сумма всего выпавшего снега за вычетом кумулятивной суммы всего растаявшего снега. Эта величина не может быть

сопоставлена с реальной глубиной снега, потому что в модели не учитывается процесс фирнификации (превращения выпавшего снега в фирн) и льдообразования. Отметим характерные различия между областями аккумуляции и абляции:

- в области аккумуляции баланс массы положителен в течение практически всего времени эксперимента, в то время как в области абляции он большую часть времени равен нулю или отрицателен (за исключением экстремально холодных периодов времени);
- в области аккумуляции условная глубина снега растет в течение всего времени эксперимента, в то время как в зоне абляции глубина снега увеличивается лишь в те дни, когда баланс массы отрицателен.

Результаты расчетов, приведенных выше, были выполнены исходя из предположения о неизменности топографии поверхности ледника. В реальных природных условиях толщина льда и его очертания непосредственно связаны с изменением его баланса массы. В дальнейшем описанная в работе ЭБМ, объединенная с динамическим блоком модели, будет использована для моделирования динамики ледника с реальной топографией поверхности и толщиной ледяного покрова.

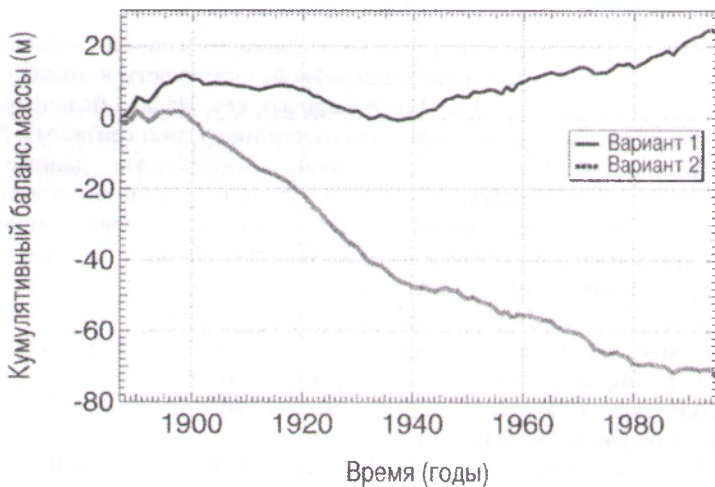


Рисунок 1 – Кумулятивный баланс массы модельного ледника, варианты 1 и 2.

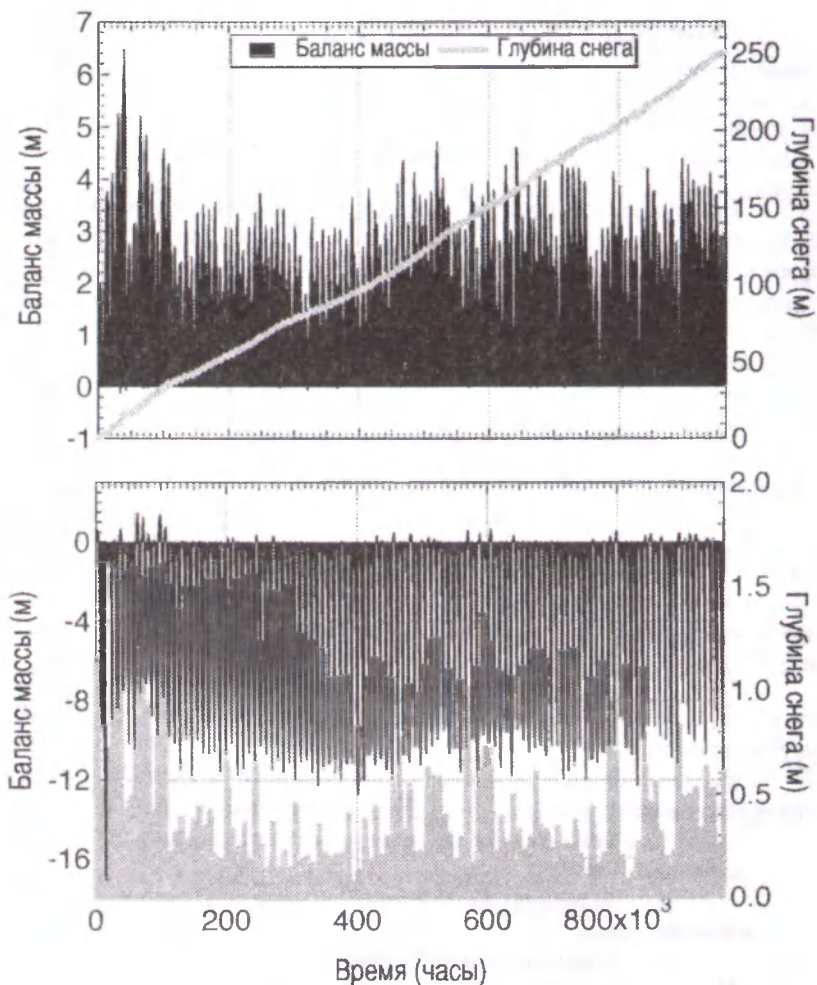


Рисунок 2 - Баланс массы модельного ледника (левая ось) и условная глубина снега (правая ось, м слоя воды) в области аккумуляции (вверху) и области абляции (внизу) для варианта 2.

#### Литература

1. Рыбак О.О., Рыбак Е.А. Сравнительный анализ годовых балансов массы горных ледников // Известия КБНЦ РАН. 2006. №1(15). С. 110-122.
2. Oerlemans J. *Glaciers and Climate change*. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers. 2001. 148 p.