



Российский фонд фундаментальных исследований

Южный федеральный университет  
Научно-исследовательский институт механики  
и прикладной математики им. Воровича И.И.

Российская академия наук  
Южный научный центр  
Институт аридных зон

# ЭКОЛОГИЯ ЭКОНОМИКА ИНФОРМАТИКА

## ТОМ 1

Ростов-на-Дону  
2014

используемых, достаточно простых и недорогих экспериментах исследуется в физиологии[5]. Построение функциональной зависимости рождаемости и смертности от резерва энергопотребления, включение в рассмотрение новых для человека в постиндустриальной биосфере функций позволит создать простые и эффективные модели динамики популяций с дальнейшим их использованием в оценке реализуемых стратегий развития.

### Литература

1. Попков Ю.С. Теория макросистем – равновесные модели. М.: Эдиториал УРСС, 1999. - 320 с.
2. Ростопшин Ю.А. Системно-методологические основы исследований устойчивого развития // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник 2003-2005.
3. М.:КомКнига/URSS, 2006. - с. 104-131.
4. З.Полужтков Р.А., Пых Ю.А., Швытов И.А. Динамические модели экологических систем. Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. - 288 с.
5. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц.- М.: Наука, 1967.- 575 с.
6. Термодинамика биологических процессов. М.,»Наука», 1976, 280 с.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЛЕДНИКА МАРУХ, ЗАПАДНЫЙ КАВКАЗ

Рыбак О.О., Рыбак Е.А.

Сочинский научно-исследовательский центр РАН, г. Сочи,  
Институт природно-технических систем РАН, г. Сочи,  
elena.rybak@gmail.com

В работе рассматривается структура математической модели ледника Марух на Западном Кавказе и ее калибровка на исторических данных наблюдений. Современное оледенение на Западном Кавказе имеется на участке от г. Фишт на западе до г. Эльбрус на востоке [1]. Бассейн ледника Марух занимает в пределах России крайне западное «океаническое» положение в умеренной широтной полосе [1], и в силу этого может считаться своего рода репером, чье поведение в достаточной степени типично для своего региона. Систематические полевые наблюдения на леднике Марух, начатые в послевоенные годы, проводились с большей или меньшей регулярностью до настоящего времени [1, 2]. Результаты этих наблюдений, как и наблюдения на ближайшей к леднику метеорологической

станции Клухорский перевал, были использованы для калибровки и тестирования математической модели.

Схематическое строение модели динамики горного ледника показано на рисунке 1. Два основных расчетных блока модели – динамический (обозначен цифрой 2) и массобалансовый блок (3), с которым непосредственно связаны блоки расчета затенения от окружающего рельефа (4) и солнечной радиации (5).

*Суб-модель течения льда.* Теоретические основы и алгоритмы суб-модели описаны в работах [3, 4].

*Суб-модель баланса массы.* Для расчета баланса массы ледника  $M_s$  используется энергобалансовая модель (ЭБМ). В основе ЭБМ лежит уравнение для расчета баланса массы  $M_s$ , то есть приращения или потери массы в каждой точке пространственной сетки за определенное время  $t$ , отсчитываемое с начала балансового года (соответствует 271-му дню стандартного календарного года):

$$M_s(t + \Delta t) = M_s(t) + \Delta t \left[ \min(0, -\psi/\rho_w L_m) \right] + P_s(t), \quad (1)$$

где  $\left[ \min(0, -\psi/\rho_w L_m) \right]$  представляет собой таяние на поверхности (абляция),  $L_m = 3,34 \times 10^5$  Дж кг<sup>-1</sup> – удельная теплота плавления,  $\rho_w = 1000$  кг м<sup>-3</sup> – плотность воды. Считается, что твердые осадки  $P_s$  выпадают при температуре воздуха ниже 2°C. Поток энергии на поверхности ледника  $\psi$  рассчитывается как

$$\psi = (1 - \alpha) Q + c_0 + c_1 T_a, \quad (2)$$

где первое слагаемое в правой части представляет собой приходящую радиацию (сумму прямой и рассеянной радиации) на поверхности ледника,  $c_0 + c_1 T_a$  – баланс длинноволновой радиации и турбулентного теплообмена,  $c_0 = -45$  Вт м<sup>-2</sup> и  $c_1 = 12$  Вт м<sup>-2</sup> °C<sup>-1</sup> – эмпирические коэффициенты,  $T_a$  – температура воздуха,  $\alpha$  – альbedo поверхности, которое экспоненциально убывает в зависимости от толщины снежного покрова  $d$ :

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

где  $\alpha_{ice}$  и  $\alpha_{snow}$  – типичные значения альbedo для льда и снега,  $d^*$  – характерная толщина снежного покрова.

Приходящая солнечная радиация (блок 5 на рисунке 1) состоит из двух компонент – прямой и рассеянной:

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

где  $f_{dir}$  и  $f_{dif}$  условные доли прямой и рассеянной радиации в приходящей радиации  $S$ , определяемые как 0,6 и 0,4,  $\tau=0,45$  - 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. Множитель  $\delta=1$  в случае, если затенение от окружающего рельефа в соответствующем узле сетки отсутствует, и  $\delta=0$ , если узел сетки находится в тени.

Температура воздуха в уравнении (2) зависит от высоты  $z(x,y)$  в каждой точке ледника:

$$T_a(x,y) = T_0 - \xi[s(x,y) - S_0], \quad (6)$$

где  $T_0$  - метеорологические данные о температуре воздуха, приведенные к условной средней высоте ледника,  $S_0 = 2700$  м - условная средняя высота ледника высота,  $\xi = -0.007$  °C м<sup>-1</sup> - вертикальный градиент температуры воздуха.

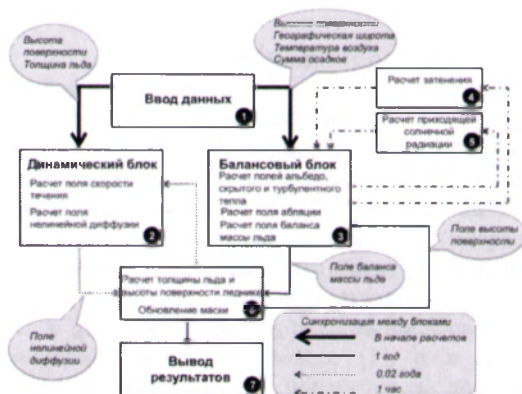


Рис. 1 - Структура математической модели динамики горного ледника

Расчет толщины льда (блок 6 на рисунке 1) производится путем решения уравнения сохранения баланса массы, которое трансформируется в

уравнение для локальной толщины льда  $H$ . Баланс массы на поверхности ледника  $M_s$  входит в его правую часть:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{v}_h H) + M_s = -\nabla \cdot (D \nabla H) + M_s, \quad (7)$$

где  $t$  – время,  $\mathbf{v}_h$  – вектор осредненной по вертикали скорости течения,  $-\nabla \cdot (\mathbf{v}_h H) = -D \nabla H$ ,  $D$  – сложный нелинейный комплекс, зависящий от толщины ледника и модуля градиента высоты его поверхности  $s$  («нелинейная диффузия»). В уравнении (7) компоненты поля нелинейной диффузии  $D = D_x$  и  $D_y$  – выражаются через компоненты скорости течения, толщину льда и градиент поверхности ледника:

$$D_x = -uH \left( \frac{\partial s}{\partial x} \right)^{-1}, \quad D_y = -vH \left( \frac{\partial s}{\partial y} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Особенности проведения расчетов определяют создание двух баз данных о рельефе поверхности. Для расчета области затенения на поверхности ледника требуются данные об окружающем ледник рельефе. В то же время, для расчета скорости течения и баланса массы ледника может быть использована гораздо меньшая по размерам подобласть. Для создания цифровой модели рельефа были использованы топографические данные окрестностей ледника Марух, совмещенные с более подробными данными геодезической съемки непосредственно на леднике [1]. Данные были пересчитаны в узлы регулярной пространственной сетки размером  $3 \times 5$  км с шагом 25 м («большая область»). Область ориентирована с юго-востока на северо-запад, что совпадает с ориентацией продольной оси ледника Марух. В выделенной подобласти размером  $1,650 \times 3,775$  км высота поверхности совпадает с высотой поверхности в «большой области». Для расчета толщины льда в узлах регулярной сетки подобласти были использованы данные гравиметрии и радиозондирования толщи ледника Марух, а также данные о границе области, занятой льдом, полученные в 1967 г. [1].

Среднесуточные значения сумм осадков  $P_s$  и температуры воздуха  $T_a$ , входящие в уравнения (1) и (2) рассчитывались по данным наблюдений на метеостанции Клухорский перевал. Исходные среднесуточные данные, имеющие пробелы, осреднялись за десятилетие 1959-1968 гг. Этого отрезка времени было достаточно, чтобы пробелы были полностью исключены. Осредненные данные были приведены к средней высоте ледника Марух. Период осреднения связан с тем, что геометрические данные относятся к 1967 г. Кроме того, в период 1967-1982 гг. проводились наблюдения за балансом массы ледника, которые в будущем предполагается использовать в



качестве контрольных данных для оценки результатов математического моделирования. Задача калибровки состояла в подборе трех свободных параметров:

1.  $A_{fl}$ , который определяет деформируемость льда и, тем самым, деформационную скорость. Диапазон тестируемых значений составил  $0,4 \times 10^{-16} - 3,0 \times 10^{-16} \text{ Па}^{-3} \text{ год}^{-1}$ .
2.  $A_{sl}$ , который определяет связь между градиентом поверхности и скоростью базального (глыбового) скольжения, и, таким образом, влияющий на его долю в суммарной скорости течения. Диапазон тестируемых значений составил  $0,4 \times 10^{-16} - 3,0 \times 10^{-15} \text{ м}^7 \text{ Н}^{-3} \text{ год}^{-1}$ .
3. Плотность льда  $\rho_i$ . В [1] отмечена значительная пространственная – как горизонтальная, так и вертикальная неоднородность поля плотности льда. В соответствии с приведенным в [1] характерным диапазоном разброса значений плотности льда, в модели принят диапазон 880-910  $\text{кг м}^3$ .

В качестве трех свободных параметров, оптимальные значения которых необходимо было подобрать в суб-модели баланса массы, были выбраны альbedo снега и альbedo льда,  $\alpha_{snow}$  и  $\alpha_{ice}$ , в уравнении (3), диапазон изменений которых принят 0,74-0,86 ( $\alpha_{snow}$ ) и 0,23-0,49 ( $\alpha_{ice}$ ). Для определения оптимальных значений были рассчитаны поля суммарной за балансный год аккумуляции и абляции, нормированные на средние значения по области, занятой льдом. Безразмерный нормированный баланс массы рассчитывался как разница между аккумуляцией и абляцией. Далее поля нормировано баланса, рассчитанные в тестовых экспериментах, сопоставлялись с аналогичным полем, рассчитанным по данным наблюдений [1].

Оптимальные значения всех параметров перечислены в таблице 1.

Таблица 1

**Оптимальные значения параметров математической модели**

Параметр	$A_{sl}$	$A_{fl}$	$\rho_i$	$\alpha_{snow}$	$\alpha_{ice}$
Значение	$0,6 \times 10^{-16}$	$1,4 \times 10^{-16}$	880	0,78	0,37

### Благодарности

Работа была выполнена в рамках Проекта 7.4 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Природная среда России: адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата и развития атомной энергетики».

### Литература

1. Кренке А.Н., Меншутин В.М., Волошина А.П. и др. Ледник Марух (Западный Кавказ). Ленинград, Гидрометеоздат, 1988, 255 с.
2. Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Мачерет Ю.Я., Петраков Д.А. Изменения ледника Марух с 1945 по 2011 гг. // Лед и Снег. 2012. №1. С. 123-127.

3. Рыбак О.О., Рыбак Е.А. Алгоритм решения системы уравнений течения льда в трехмерной математической модели // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2010. №6. С. 117-122.
4. Fürst J.J., Rybak O., Goelzer H., De Smedt B., de Groen P., Huybrechts P. Improved convergence and stability properties in a three-dimensional higher-order ice sheet model // Geoscientific Model Development. 2011. V. 4. P. 1133–1149.
5. Nemes J., Huybrechts P., Rybak O., Oerlemans J. Reconstruction of the surface mass balance of Morteratschgletscher since 1865 // Annals of Glaciology. 2009. V. 50. P. 126-134.
6. Oerlemans J. Glaciers and Climate change. Rotterdam, A.A. Balkema Publishers, 2001, 148 p.

### **РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: РАЗРАБОТКА АДАПТАЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ**

Рыбак Е.А., Рыбак О.О.

Сочинский научно-исследовательский центр РАН, г. Сочи,  
Институт природно-технических систем РАН, г. Сочи,  
elena.rybak@gmail.com

Важнейшим критерием устойчивого развития является достижение стратегического баланса между деятельностью человека и поддержанием воспроизводящих возможностей биосферы, тогда такая деятельность не будет приводить к необратимым нарушениям в природе. Переход к устойчивому развитию требует кардинальных преобразований, в центре которых - экологизация всех основных видов деятельности. Переход к устойчивому развитию сопровождается изменениями климата. Необходимо признать факт самих изменений, и то, что любые изменения, позитивные или негативные, потребуют введения мер по приспособлению общества к ним. Адаптация к изменению климата - это приспособление естественных или антропогенных систем в ответ на фактическое или ожидаемое воздействие климата или его последствия, которое позволяет уменьшить вред или использовать благоприятные возможности [1]. Таким образом, меры по адаптации могут быть направлены как на снижение климатических рисков, так и на извлечение потенциальных выгод от изменения климата.

С учетом изменения региональных природно-климатических условий, нами предлагается внедрение поэтапной коррекции адаптационных мер, которая схематически представлена на рис. 1. Стратегия устойчивого