

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА БАЛАНСА МАССЫ ГОРНЫХ ЛЕДНИКОВ

П.А. Морозова^{1,2}, О.О. Рыбак^{2,3}

¹Институт географии РАН, г. Москва, ул. Вавилова, 39

E-mail: morozova_polina@mail.ru

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

³Сочинский научно-исследовательский центр РАН, г. Сочи, ул. Театральная, 8а

E-mail: orybak@vub.ac.be

В данной работе представлен возможный метод оценки баланса массы горного ледника при климатических изменениях. В качестве исходных данных были использованы результаты динамического даунскейлинга модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM4 [1] региональной моделью HadRM3P для Черноморско-Каспийского региона для современного климата (1971 – 2000 гг.) и климата конца 21 века (2071 – 2100 гг., сценарий RCP 8.5) [2]. Дальнейшее уточнение данных регионального моделирования на сетку масс-балансовой модели для ледников Марух и Джанкуат проводилось с использованием статистических и физических закономерностей. Представлены схемы для осадков, температуры и коротковолновой радиации.

Ключевые слова: баланс массы, даунскейлинг, Кавказ, ледник, осадки, прогноз климата, региональная модель, температура воздуха.

Введение. Оледенение играет значительную роль в хозяйственной деятельности горных территорий – это рекреационная деятельность, водообеспечение, гидроэнергетика, сельское хозяйство, и многое другое. Оледенение Кавказа по оценкам [3] сократилось на 27,5% за первую половину XX столетия, и на 17,7% – за вторую. Дальнейший прогноз эволюции оледенения необходим для стратегического планирования хозяйственной деятельности в регионе, в том числе и оценки риска возникновения опасных природных явлений. Основной целью данного исследования является разработка надежного метода прогнозирования для оценки будущего состояния горного оледенения при изменении климатических условий.

В настоящей работе предложена схема использования данных регионального климатического моделирования (РКМ) для расчетов баланса массы ледников. В первой части статьи изложена методика даунскейлинга данных РКМ на сетку масс-балансовой модели. Далее приведены изменения ключевых метеовеличин для математического моделирования конфигурации ледников: температуры, осадков, коротковолновой радиации. Изменения приведены для ледников Марух (Западный Кавказ) и Джанкуат

(Центральный Кавказ) при реализации сценария эмиссии парниковых газов RCP 8.5 («неблагоприятный» вариант [4]). Также в качестве проверки метода выполнены расчеты поверхностного баланса массы ледника Марух для условий современного и будущего климатов.

Методика регионализации данных РКМ. В данной работе для расчета изменения баланса массы ледника была использована масс-балансовая модель. В основе модели лежит расчет изменения баланса массы (B) в каждой ячейке с начала гидрологического года t (271-й календарный день) в определенный момент времени ($t+\Delta t$):

$$B(t+\Delta t) = B(t) + \Delta t \{ \min(0, -B(t+\Delta t)) \} = B(t) + \Delta t \{ \min(0, -\frac{M}{L\rho}) + P_s \}, \quad (1)$$

где M – количество энергии, поступающей на поверхность и затрачиваемой на таяние; $L=3,34 \times 10^5$ Дж·кг⁻¹ – удельная теплота плавления; ρ – плотность снега или льда; P_s – твердые осадки, $\min(0, -\frac{M}{L\rho})$ – слагаемое, обозначающее абляцию. Поток энергии на поверхности ледника M рассчитывается как:

$$M = Q(1-\alpha) + L_{net} + H_{la} + H_{se}, \quad (2)$$

где Q – суммарная коротковолновая радиация; α – альbedo; L_{net} – баланс длинноволновой радиации; H_{is} – поток скрытого тепла; H_{se} – поток явного тепла.

Для дальнейших расчетов характеристик горного оледенения (изменения площади, объемов) планируется использование совместной масс-балансовой модели и модели течения льда. В этом случае необходимо разрешение первые десятки метров [5, 6]. В качестве входных данных для масс-балансовой модели необходима метеоинформация. Таким образом, при использовании данных регионального климатического моделирования с разрешением 25 км в качестве исходных данных необходимо провести процедуру детализации на сетку масс-балансовой модели с разрешением 25 м.

Подобный подход представлен в ряде работ. Например, в [7] результаты динамического даунскейлинга реанализа региональной моделью REMO с разрешением 18 км интерполировались на сетку масс-балансовой модели с разрешением 100 м. В работе применялись различные схемы интерполяций и простых подсеточных параметризаций. Было показано, что определяющее значение играет именно выбранный метод интерполяции. В целом отмечено хорошее соответствие рассчитанных и измеренных величин баланса массы, а также систематическое занижение величины аккумуляции, связанное с ошибками в воспроизведении поля осадков REMO.

В данной работе в качестве исходных данных были использованы результаты динамического даунскейлинга модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM4 [1] региональной моделью HadRM3P для Черноморско-Каспийского региона, выполненного в работе [2]. Модель HadRM3P [9] в использованной конфигурации имеет разрешение $0,22^\circ \times 0,22^\circ$, 19 гибридных вертикальных уровней. Данная версия имеет гидростатическое приближение, ряд упрощений при параметризации физических механизмов, учитываемых в моделях прогноза погоды, и используется при длительных климатических экспериментах. В качестве исходных климатических данных в РКМ были использованы поля модели общей циркуляции атмосферы и

океана INMCM4, разработанной в Институте вычислительной математики РАН (ИВМ РАН) [1], рассчитанные для современного климата (1971 – 2000 гг.) и климата конца 21 века (2071 – 2100 гг.) по сценарию эмиссии парниковых газов RCP 8.5 («неблагоприятный» вариант [4]). Модель INMCM4 состоит из двух основных блоков: атмосферного и океанического. Пространственное разрешение атмосферного блока составляет $2^\circ \times 1,5^\circ$ по долготе и широте, по вертикали – 21 сигма-уровень; блок циркуляции океана имеет пространственное разрешение $1^\circ \times 0,5^\circ$, 40 вертикальных уровней, шаг по времени – 2 ч (внутренний шаг для адвекции температуры и солености – 30 мин).

Регионализация данных РКМ на сетку масс-балансовой модели проводилась с использованием цифровой модели рельефа (DEM) и статистических и физических методов.

Приземная температура воздуха. Среднесуточные значения температуры, полученные при интегрировании HadRM3P, интерполировались в точки с координатами ледников Джанкуат ($43,12^\circ$ с.ш., $42,45^\circ$ в.д.) и Марух ($43,22^\circ$ с.ш., $41,25^\circ$ в.д.) из ближайших узлов РКМ. Для приведения интерполированных значений к высоте ячеек масс-балансовой модели использовался высотный градиент, рассчитанный также по данным моделирования.

Оценки величины температурного скачка на границе ледника была проведена по данным наблюдений за летний период 2007 – 2014 гг. Наблюдения включали как экспедиционные измерения в долине Адыл-су (автоматические метеостанции (АМС) на леднике Джанкуат (2950 м), базе МГУ (2690 м) и альплагере Джантуган (2400 м)), так и данные метеостанций Терскол (2200 м) и Чегет (3050 м). Величина температурного скачка оценивалась как разница между температурой, измеренной АМС, расположенной на леднике и расчетной, т.е. приведенной к высоте станции. Для этого использовался градиент в долине Адыл-су (без учета данных АМС на леднике). Анализ данных показал наличие зависимости между баллом облачности и величиной температурного скачка.

Представляется правомерным использовать полученные результаты и для ледника Марух, поскольку оба ледника относятся к одному типу долинных ледников, сформированы в схожих климатических условиях и сопоставимы по площади.

Особенности распределения температуры над поверхностью ледника оценить не удалось, поскольку наблюдения при помощи АМС на леднике представлены одной точкой. В [8] приводятся данные о том, что средний градиент над ледниковой поверхностью Джанкуата составляет всего 0,2 °С/100 м (исследования 1974 – 1975 гг.). По данным исследований на леднике Марух средний высотный градиент над поверхностью ледника составляет около 0,8 °С/100 м [10]. Отмечена связь с температурой воздуха – чем выше температура, тем больше градиент. В [11] приведены значения высотного температурного градиента над поверхностью различных ледников, он составляет 0,3 – 0,4 °С/100 м, в [12] диапазон шире – 0,5 – 1,4 °С/100 м. По данным измерений в Итальянских Альпах [13] – 0,6 – 0,7 °С/100 м. Были выполнены несколько вариантов расчета с различными значениями градиента над ледниковой поверхностью.

С учетом микроклиматических поправок расчет итоговой температуры в каждой ячейке масс-балансовой модели проводился по следующей схеме:

- расчет высотного температурного градиента для каждого шага по времени по 9 ячейкам РКМ (ячейке, в которой располагается ледник и соседним с ней), приведение значений температуры РКМ к высоте нижней точки ледника;

- учет по вышеописанной схеме наличия температурного скачка в период отсутствия устойчивого снежного покрова;

- использование «ледникового» высотного температурного градиента для итогового расчета температуры в ячейке масс-балансовой модели.

Итоговая формула для расчета температуры на поверхности ледника (T_{ice}):

$$T_{ice} = T_{mod} + T_{grad}(h_{mod} - h_{ice}) + T_{grad_i} \times (h_{ice} - h_{ice}) + T_{chan} \quad (3)$$

где T_{mod} – это температура ячейки РКМ; T_{grad} – высотный температурный градиент,

рассчитанный по соседним модельным ячейкам; T_{grad_i} – высотный температурный градиент над поверхностью ледника; h_{mod} , h_{ice} , h_{ice} – высота ячейки РКМ, нижней точки ледника и ячейки масс-балансовой модели соответственно; T_{chan} – температурный скачок на границе ледника (величина температурного скачка зависит от балла облачности).

Осадки. Расчет осадков производится по той же схеме, что и температуры. На каждом шаге по времени рассчитывается плевометрический градиент по данным соседних к точке ледника ячеек. Поскольку максимальная высота ячеек в окрестности точек ледников в региональной модели ниже высот, на которых расположен ледник, то критическая высота при положительном градиенте осадков задается по данным наблюдений: для Маруха принято – 2700 м [10], для Джанкуата – 3100 м [8].

Коротковолновая солнечная радиация. Для каждой ячейки масс-балансовой модели необходимо рассчитать количество приходящей коротковолновой радиации с учетом экспозиции и затенения. Выходные данные РКМ содержат информацию о различных компонентах приходящей коротковолновой радиации, но для экономии расчетного времени реализуется следующий алгоритм: сначала рассчитывается количество возможной прямой солнечной радиации без учета влияния облачности. Расчет производится для ячеек ледника и окружающего рельефа с использованием модели рельефа высокого разрешения. Для каждого шага по времени в масс-балансовой модели рассчитывается азимут и угол падения солнечных лучей, используются стандартные астрономические формулы для экваториальной системы координат. Затем происходит расчет количества приходящей радиации на горизонтальную поверхность. Вводится поправка на изменение коэффициента прозрачности атмосферы на различных высотах и угол наклона склона. Также определяется, попадает ли ячейка в зону тени или нет. Эти расчеты проводятся в процессе предварительных расчетов для одного календарного года для каждого шага по времени.

Затем уже при работе масс-балансовой модели используются данные РКМ об облачности, влияние облаков на суммарную приходящую радиацию учитывается по полуэмпирической формуле [14] $k_c = 1 - 0,233cl - 0,415cl^2$.

Доля рассеянной радиации рассчитывается также как функция от балла облачности (cl), полученная по данным наблюдений на леднике Марух [10], $f_{dif} = 0,1022e^{0,024cl}$.

Количество приходящей коротковолновой радиации рассчитывается как суммарная радиация, если ячейка не затенена, при затенении учитывается только рассеянная радиация.

Изменение основных характеристик по данным моделирования. При расчете изменения регионального климата использовался так называемый подход временных интервалов (time-slice). Он заключается в сравнении характеристик модельного климата, рассчитанного по сценарию RCP 8.5 для периода 2071 – 2100 гг. с характеристиками

ками модельного же климата контрольного периода (1971 – 2000 гг.). Это позволяет избежать влияния возможных систематических ошибок в модельных полях, исключить влияние на результаты анализа местных факторов (в случае если бы такое сравнение проводилось с данными наблюдений).

Рассмотрим изменения, которые были спрогнозированы в целом для территории Кавказа [2]. Наиболее интенсивное потепление ожидается в летние месяцы – до 6°C, среднегодовая приземная температура воздуха в регионе увеличилась в среднем на 3,5°C. Количество осадков летом практически на всей территории Кавказа уменьшится, причем это уменьшение превышает среднее квадратическое отклонение. Зимой статистически значимые изменения наблюдаются только на склонах юго-западной экспозиции, здесь можно выделить область уменьшения осадков.

Таблица 1. Изменение основных метеопараметров для ледников Марух и Джанкуат в 2071 – 2100 гг. по сравнению с современным климатом при реализации климатического сценария эмиссии парниковых газов RCP 8.5

Параметр	Ледник	Месяц												Год
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Температура, °С	Марух	2,2	2,2	2,4	1,5	4,1	7,2	5,9	4,6	3,9	3,3	2,7	3,6	3,7
	Джанкуат	3,1	2,9	2,8	2,8	3,5	4,6	5,2	4,6	3,8	3,0	3,5	3,5	3,4
Осадки, мм	Марух	-65	-23	-11	1	-47	-19	-12	-4	-13	-58	41	-46	8%
	Джанкуат	-2	6	2	-38	-21	-85	-40	-9	-11	-6	-5	1	9%
Суммарная радиация, Вт/м ²	Марух	2,2	1,4	1,8	4,3	17,1	26,8	15,0	-3,8	2,7	3,1	0,9	1,6	5%
	Джанкуат	-0,3	0	0	1,2	18,3	21	15,8	2,2	10,7	9,9	2	-0,5	5%

В табл. 1 представлены изменения температуры, осадков и суммарной радиации для ледников Марух (2900 м) и Джанкуат (3100 м), рассчитанные в данной работе. Как и в целом в регионе, более интенсивное потепление ожидается летом и составит около 5°C. Годовая сумма осадков в климате по сценарию RCP 8.5 в районе ледника Джанкуат уменьшится в основном за счет осадков летнего периода, для ледника Марух некоторое уменьшение наблюдается в течение всего года. Однако, это не более 10% годовой суммы.

Масс-балансовые расчеты для лед-

ника Марух показали, что подобные изменения приведут к тому, что высота снеговой линии окажется выше тела ледника (рис. 1). Таким образом, установление такого климатического режима приведет к постепенной деградации оледенения на данных высотах. Основной вклад в подобные изменения внесет повышение температуры, поскольку именно оно повлияет на изменение соотношения площадей абляции и аккумуляции. Также повышение температуры повлияет и на сезон абляции: в среднем он станет длиннее на месяц.

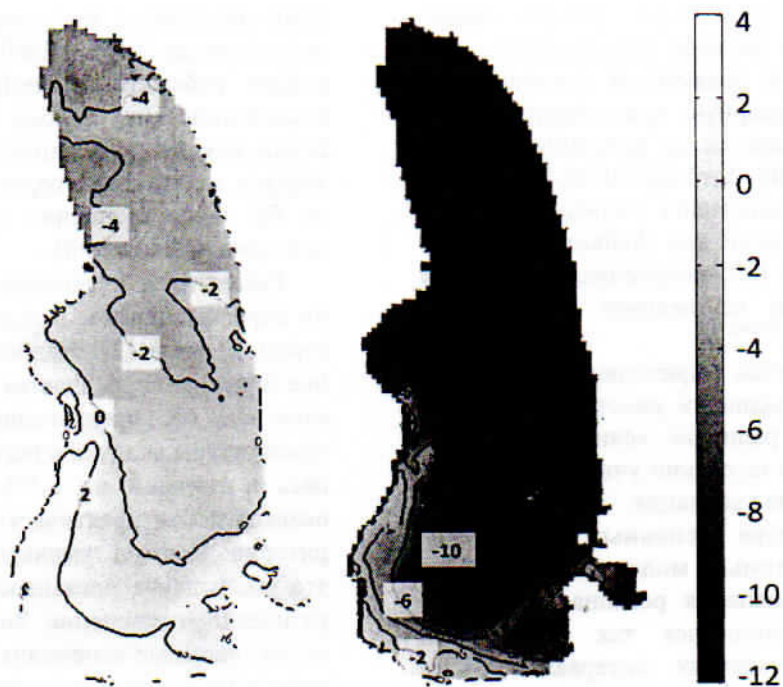


Рис. 1. Баланс массы ледника Марух, рассчитанный для условий современного модельного климата (1971 – 2000 гг.) (слева), климатического сценария RCP 8.5 (2071 – 2100 гг.) (справа), м.в.э/год

Заключение. В данной работе представлена возможная схема расчета баланса массы горных ледников и оценки изменения отдельных метеопараметров для прогноза эволюции горного оледенения при реализации выбранного климатического сценария. Использование метода временных интервалов позволяет, с одной стороны, исключить систематические модельные ошибки, а с другой, в условиях недостаточного обеспечения территории данными прямых наблюдений, избежать ряда неопределенностей, связанных с микроклиматическими эффектами. Стоит отметить, что значения прямых расчетов поля баланса массы ледника Марух по данным регионального моделирования для современного климата соответствует данным наблюдений, представленным в [15]. Это свидетельствует об удовлетворительном качестве воспроизведения РКМ современного климата и адекватности выбранных дальнейших схем даунскейлинга метеопараметров, а также позволяет использовать не только полученные разницы для прогноза, но и непосредственно результаты расчетов (абсолютные значения).

В будущем в рамках данной тематики исследований планируется проведение совместных расчетов с моделью течения льда для учета изменения конфигурации ледника при масс-балансовых расчетах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-05-00567. Авторы благодарят Е.М. Володина (ИВМ РАН, г. Москва), В.В. Ефимова (МГИ РАН, г. Севастополь) за предоставленные результаты математического моделирования климатических изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM4 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 379–400.
2. Ефимов В.В., Володин Е.М., Анисимов А.Е. Моделирование изменений климата в Черноморском регионе в XXI столетии // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 2. С. 3–14.

3. *Современные изменения ледников горных районов России* / В.М. Котляков, Т.Е. Хромова, Г.А. Носенко. М.: КМК Scientific Press, 2015. 288 с.
4. *The next generation of scenarios for climate change research and assessment* / R.H. Moss, J.A. Edmonds, K.A. Hibbard [et al.] // *Nature*. 2010. V. 463. P. 747–756.
5. *Калибровка математической модели динамики ледника Марух, Западный Кавказ* / О.О. Рыбак, Е.А. Рыбак, С.С. Кутузов [и др.] // *Лед и снег*. 2015. № 2 (130). С. 9–20.
6. *Calibration of a higher-order 3-D ice flow model of the Morteratsch glacier complex, Engadin, Switzerland* / H. Zekollari, P. Huybrechts, J.J. Furst [et al.] // *Annals of Glaciology*. 2013. V. 54. P. 343–351.
7. *Calculating distributed glacier mass balance for the Swiss Alps from regional climate model output: a methodical description and interpretation of the results* / H. Machguth, F. Paul, S. Kotlarski [et al.] // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D19106. doi:10.1029/2009JD011775
8. *Ледник Джанкуат (Центральный Кавказ). Водно-ледовый и тепловой баланс горноледниковых бассейнов* / Г.Н. Голубев, М.Б. Дюргеров, В.А. Маркин [и др.]. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 183 с.
9. *Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS* / R.G. Jones, M. Noguer, D.C. Hassell. Exeter (UK): Met Office Hadley Centre. 2004. 40 p.
10. *Ледник Марух (Западный Кавказ). Водно-ледовый и тепловой баланс горноледниковых бассейнов* / А.Н. Кренке, В.М. Меншутин, А.П. Волошина [и др.]. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 254 с.
11. *Oerlemans J. The Microclimate of Valley Glaciers* / Igitur, Utrecht Publishing & Archiving Services, Universiteitsbibliotheek Utrecht. 2010. ISBN 987-90-393-5305-5.
12. *Волошина А.П. Метеорология горных ледников* // *Материалы гляциологических исследований*. 2002. Вып. 92. С. 3–148.
13. *Air temperature variability over three glaciers in the Ortles–Cevedale (Italian Alps): effects of glacier fragmentation, comparison of calculation methods, and impacts on mass balance modeling* / L. Carturan, F. Cazorzi, F. De Blasi [et al.] // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 1129–1146.
14. *Greuell W., Knap W., Smeets P. Elevational changes in meteorological variables along a mid-latitude glacier during summer* // *J. Geophys. Res.* 1997. 102 (D22): 25941–25954
15. *Атлас снежно-ледовых ресурсов мира* / под ред. В.М. Котлякова. М.: Изд-во Российской академии наук, 1997. 392 с.

CALCULATING MOUNTAIN GLACIER MASS BALANCE USING REGIONAL CLIMATE MODEL OUTPUT

P.A. Morozova^{1,2}, O.O. Rybak^{2,3}

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Vavilova St., 39

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

³Scientific Research Center, Russian Academy of Sciences, Sochi, Teatralnaya St., 8a

In this paper, we consider a method for evaluation of future states of mountain glaciation under changing climatic conditions. We use the results of calculations of regional numerical model HadRM3P for Black Sea-Caspian region [2] for two time slices: the present climate (1971 – 2000 years) and climate in the late 21st century (2071 – 2100 years, scenario RCP 8.5). Initial conditions for HadRM3P are provided by a GCM INMCM4 [1]. Further regionalization is achieved by projecting of RCM-generated data to the mass-balance model domain (resolution 25 m) for glacier Marukh and Djankuat by statistical and physical methods. Schemes for precipitation, air temperature, and incoming shortwave radiation are presented. **Key words:** air temperature, Caucasus, climate scenario, downscaling, glacier, mass balance, precipitations, regional model.