

*В.П. Галахов*

**Численное моделирование ледовых балансов ледников долины Мульты на современном экспериментальном и палеогляциологическом материале\***

*V.P. Galakhov*

**Numerical Modeling of Glacier Balance in the Mul'ta Valley Using Modern Experimental and Paleoglaciological Materials**

Численное моделирование планового положения ледников в верховьях долины реки Мульты подтвердило величину похолодания в стадию Фернау и Аккемскую стадию, полученную по бассейну Актру. Исследования в долине Мульты показали, что изменение термического режима в альпийской зоне Алтая, полученное авторами за вторую половину голоцена по материалам северного склона Северо-Чуйского хребта, достоверно.

**Ключевые слова:** численное моделирование, ледник, долина Мульты.

В результате датирования моренных комплексов и границы леса северного склона Северо-Чуйского хребта нами была получена кривая изменения температур теплого периода за вторую половину голоцена [1–2]. Для проверки полученной кривой мы обратились к материалам наблюдений Алтайской гляциологической экспедиции (руководитель В.С. Ревякин) в долине реки Мульты в период Международного гидрографического десятилетия (МГД) (1969–1973 гг.). Материалы численных экспериментов на примере 1972–1973 балансового года показали, что смоделированный ледовый баланс ледника Томич равен +45 г/см<sup>2</sup>, реально измеренный – +12 г/см<sup>2</sup> [3, с. 49]. Если учесть, что величины абляции и аккумуляции равны 220 и 210 г/см<sup>2</sup>, то ошибка расчета будет составлять 15%.

*Современный экспериментальный материал.* Непосредственные наблюдения за балансом ледника Томич проводились в 1969–1973 гг. Этот период характеризуется положительным ледовым балансом. Если обратиться к бассейнам-аналогам (бассейн Актру), где данные непосредственных наблюдений за балансом ледника М. Актру имеются с 1961–1962 по 1988–1989 балансовые годы [4], то баланс ледника за этот период равен –4 г/см<sup>2</sup>. Для того, чтобы баланс ледника Томич соответствовал этой величине (–6 г/см<sup>2</sup>) при средней

Numerical modeling of planned position of glaciers in the Mul'ta river upper valley confirmed the estimated value of cooling in the Firnaу and Akkem stages for the Aktru basin. The studies carried out in the Mul'ta valley showed that the change of the thermal regime in the Altaic alpine zone obtained for the second half of Holocene from the data on the northern slope of the North-Chuisky ridge is valid.

**Key words:** numerical modeling, glacier, Mul'ta valley.

снежности года необходимо увеличить температуры теплого периода 1972–1973 балансового года на 0,1 °С. Примем эту величину в качестве реперной для различных реконструкций.

Первую проверку можно провести на основе наблюдений за отступанием ледника Томич с начала инструментальных замеров (1969–1973 гг.) по настоящее время. На основе исследований длинного ряда термического режима в Барнауле Н.Ф. Хараламова [5] оценивает современный тренд изменения летней температуры (основной период абляции ледников) в 1 °С за 100 лет. С начала первой топографической съемки ледника Томич (1973) прошло около 40 лет. Естественно, если учесть, что балансовое состояние ледника на определенный временной срез формируется минимум 10 лет, то скорость реакции ледника составляет около 45 лет [6], увеличение средней летней температуры для ледника Томич необходимо принять не 0,4 °С, а применительно к нашим расчетам 0,1 °С. Смоделируем изменение баланса ледника и, соответственно, получим возможное отступление ледника за это время (рис. 1). Как видим, отступление фронта ледника составило в соответствии с моделированием менее 200 м, что хорошо согласуется с инструментальными наблюдениями.

\* Работа выполнена в рамках программы Президиума РАН «Комплексный мониторинг современных климатических и экосистемных изменений в Сибири».

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| . | 1 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | 4 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| 7 | 5 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | a | . | . | X | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | 4 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | 8 | 8 | 4 | 1 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | 1 | 1 | 1 | 4 | 1 | X | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | 2 | 5 | 1 | 1 | 1 | X | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | a | 4 | 1 | 8 | 1 | 1 | X | . | . | . | . | . | . |
| . | . | 8 | 7 | 6 | 8 | . | . | . | . | . | . | . | . | . |

Рис. 1. Смоделированный баланс ледников Томич и №67–68 и их отступление за 1970–2009 гг. Условные обозначения: **1** – от -250 до -100, **2** – от -100 до -50, **3** – от -50 до 0, **4** – от 0 до 50, **5** – от 50 до 75, **6** – от 75 до 100, **7** – от 100 до 150, **8** – от 150 до 250, **9** – от 250 до 350, **a** – более 350 г/см<sup>2</sup>. **X** – исчезнувшие точки по сравнению с 1973 г. Шаг сетки равен 250 м

*Стадия Фернау.* Проверку полученной модели лучше провести на примере стадии Фернау, граница ледников в которой довольно четко фиксируется по космическим снимкам. Для численного моделирования, кроме планового положения ледников, необходимо знать изменение высоты поверхности ледников. На основе материалов радиолокационных съемок ледников [7–8] строится зависимость средней толщины ледника от его площади (рис. 2). При площади ледника Томич в 1970 г. [9], равной 1,6 км<sup>2</sup>, средняя толщина ледника равна 60 м, что подтверждается данными съемки [8]. При площади в стадию Фернау в 2,4 км<sup>2</sup> средняя толщина ледника должна была быть равной 80 м. Однако, если учесть, что зависимость средней толщины от площади получена на стадии деградации ледников, необходимо её увеличить минимум на 10 м. Для численных экспериментов толщина ледника Томич принята равной 90 м. Изменение температуры теплового периода в соответствии с нашими исследованиями [1–2] равно -0,2 °С, осадки приняты современными (рис. 3, табл. 1). Как видим, материалы численного моделирования ледников бассейна Томички подтвердили полученную нами ранее величину похолодания в стадию Фернау (1450–1850 гг.) -0,2 °С, которую мы получили по Северо-Чуйскому хребту.

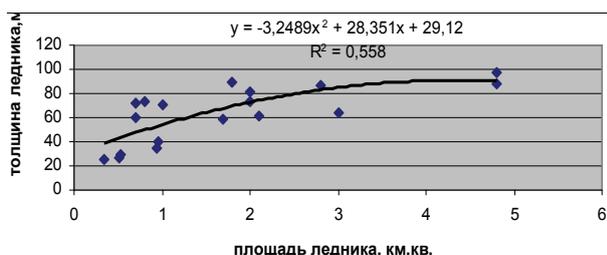


Рис. 2. Зависимость средней толщины ледника от его площади. Построено по материалам съемок Западно-Катунского центра оледенения и Южно-Чуйского хребта (район Иикту)

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | 1 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | 1 | 1 | 1 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | 7 | 4 | a | 1 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| 8 | 7 | 6 | . | 4 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | a | 8 | . | 1 | 4 | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | 1 | 1 | 1 | 1 | . | . | . | . | . |
| . | 9 | 8 | 7 | 6 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | . | . | . | . | . |
| . | . | 7 | 4 | 4 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | . | . | . | . | . |
| . | . | 2 | 7 | 7 | 2 | 4 | 1 | 1 | 1 | . | . | . | . | . |
| . | . | a | 7 | 2 | 8 | 1 | 1 | 2 | . | . | . | . | . | . |
| . | . | 8 | 8 | 8 | 9 | . | . | . | . | . | . | . | . | . |

Рис. 3. Баланс ледников Томич и №67–68 в стадию Фернау. Условные обозначения: **1** – от -450 до -100, **2** – от -100 до -50, **3** – от -50 до 0, **4** – от 0 до 50, **5** – от 50 до 75, **6** – от 75 до 100, **7** – от 100 до 150, **8** – от 150 до 250, **9** – от 250 до 350, **a** – более 350 г/см<sup>2</sup>. Шаг сетки равен 250 м

Таблица 1  
Баланс ледников бассейна реки Томички в стадию Фернау

| Ледник | Площадь, км <sup>2</sup> | Баланс, г/см <sup>2</sup> |
|--------|--------------------------|---------------------------|
| Томич  | 2,50                     | -1,9                      |
| №67–68 | 1,25                     | +1,6                      |

*Аккемская стадия.* Второй характерной климатической точкой является Аккемская стадия (стадия Ларстиг по альпийской хронологии), абсолютный возраст которой можно принять по радиоуглеродному датированию озерных отложений перед мореной около 5 тыс. лет назад (4160 ± 150 – СОАН-7825, 3890 ± 90 – СОАН-7826, радиоуглеродный возраст). Эта стадия достаточно хорошо выражена в рельефе долины Мульты. Собственно положение моренного комплекса Аккемской стадии отмечается в 700 м выше впадения реки Поперечной. В соответствии с исследованиями по бассейну Актру похолодание в этот период составляло 0,9 °С. Принимая осадки современными, рассчитаем баланс ледников в эту стадию (рис. 4, табл. 2).

Таблица 2  
Баланс ледников бассейна реки Мульты в Аккемскую стадию

| Ледник     | Площадь, км <sup>2</sup> | Баланс, г/см <sup>2</sup> |
|------------|--------------------------|---------------------------|
| Томич      | 4,50                     | +0,5                      |
| Моноледник | 14,75                    | -1,3                      |

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| . | . | . | . | . | . | 1 | 1 | 1 | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | 1 | 1 | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | 1 | 1 | . | . | . | . |
| 9 | a | 8 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | . | . | . | . |
| 9 | 5 | 8 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | . | . | . | . |
| 9 | 9 | 8 | 6 | 2 | . | 1 | 1 | 2 | 3 | 5 | 9 |
| . | . | 8 | 7 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 8 | 8 |
| . | . | 9 | 6 | 3 | 2 | 2 | 2 | 6 | 8 | a | . |
| . | 6 | 9 | 9 | 9 | 6 | 3 | 8 | 9 | 9 | 7 | . |
| . | . | . | 9 | 9 | 7 | 8 | 9 | 9 | 7 | a | . |
| . | . | . | . | 8 | 8 | 9 | 9 | 5 | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | 9 | . | . | . | . |

Рис. 4. Баланс ледника Томич и моноледника долины Мульты в Аккемскую стадию. Условные обозначения: **1** – от -500 до -250, **2** – от -250 до -100, **3** – от -100 до -50, **4** – от -50 до 0, **5** – от 0 до 50, **6** – от 50 до 75, **7** – от 75 до 100, **8** – от 100 до 150, **9** – от 150 до 250, **a** – более 250 г/см<sup>2</sup>. Шаг сетки равен 0,5 км. Ледник Томич помечен курсивом.

Как видим, и в данном случае численное моделирование подтвердило величину похолодания в Аккемскую стадию, полученную по Северо-Чуйскому хребту.

Для проверки полученной нами кривой изменений термического режима теплого периода в альпийской зоне Алтая мы специально взяли бассейн Мульты (Западно-Катунский центр оледенения), который отличается от бассейна Актру существенно большим увлажнением. Материалы численных экспериментов и их сравнение с реальным расположением моренных комплексов в долине Мульты показали, что изменение термического режима в альпийской зоне Алтая, полученное нами за вторую половину голоцена по северному склону Северо-Чуйского хребта, достоверно.

### Библиографический список

1. Галахов В.П., Назаров А.Н., Ловцкая О.В., Агатова А.Р. Хронология теплого периода второй половины голоцена Юго-Восточного Алтая (по датированию ледниковых отложений). – Барнаул, 2008.
2. Галахов В.П., Ловцкая О.В., Назаров А.Н. Статистический прогноз термических изменений ближайшего будущего (по материалам исследований колебаний ледников Центрального Алтая) // Изв. РГО. – 2009. – Т. 141. – Вып. 5.
3. Галахов В.П., Мухаметов Р.М. Ледники Алтая. – Новосибирск, 1999.
4. Нарожный Ю.К. Баланс массы ледников Алтая и их климатическая обусловленность // Материалы гляциологических исследований. – Вып. 72. – М., 1991.
5. Харламова Н.Ф. Изменение климата Алтайского региона в свете концепции устойчивого развития Российской Федерации // География и природопользование Сибири. – Вып. 8. – Барнаул, 2006.
6. Галахов В.П., Назаров А.Н., Харламова Н.Ф. Колебания ледников и изменения климата в позднем голоцене по материалам исследований ледников и ледниковых отложений бассейна Актру (Центральный Алтай, Северо-Чуйский хребет). – Барнаул, 2005.
7. Никитин С.А., Веснин А.В., Карнаух Н.В. Результаты радиолокационных исследований ледников Центрального Алтая // Гляциология Сибири. – Вып. 4(19). – Томск, 1993.
8. Никитин С.А., Веснин А.В., Осипов А.В., Игловская Н.В. Распределение объемов льда в западной части Катунского хребта по данным радиолокационного зондирования // Вестник Томского ун-та. – 2001. – №274.
9. Каталог ледников СССР. Т. 15. Вып. 1: 4. Бассейн р. Катунь. 8. Бассейны рек Моген-Бурен, Каргы. – Л., 1977.