

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.321.61a

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-4(105-115)

ПОЛИТЕРМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЛЕДНИКА ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ТУЮКСУ

Г.А. Носенко, И.И. Лаврентьев, А.Ф. Глазовский, Н.Е. Касаткин\*, А.Л. Кокарев\*

*Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия; gnosenko@gmail.com*

*\* Институт географии Министерства образования и науки Республики Казахстан,  
050010, Алматы, ул. Кабанбай батыра/Пушкина, 67/99, Казахстан*

Представлены результаты полевых исследований Института географии РАН и Института географии Казахстана на леднике Туюксу в 2013 г. Положение современных границ ледника определено с использованием космической съемки. На основе полученных данных наземного радиозондирования и DGPS-съемки построены карты толщины ледника, рельефа его поверхности и ложа. Результаты выполненных исследований подтверждают ранние предположения о политермической структуре ледника Туюксу. Установлено, что теплый влагосодержащий лед занимает более 40 % общего объема ледника.

*Тянь-Шань, ледник Туюксу, радиозондирование, DGPS-съемка, политермический ледник*

THE POLYTHERMAL STRUCTURE OF CENTRAL TUYUKSU GLACIER

G.A. Nosenko, I.I. Lavrentiev, A.F. Glazovskii, N.E. Kazatkin\*, A.L. Kokarev\*

*Institute of Geography, RAS, 119017, Moscow, Staromonetny per., 29, Russia; gnosenko@gmail.com*

*\*Institute of Geography, 050010, Almaty, Kabanbai batyr/Pushkin str., 67/99, Kazakhstan*

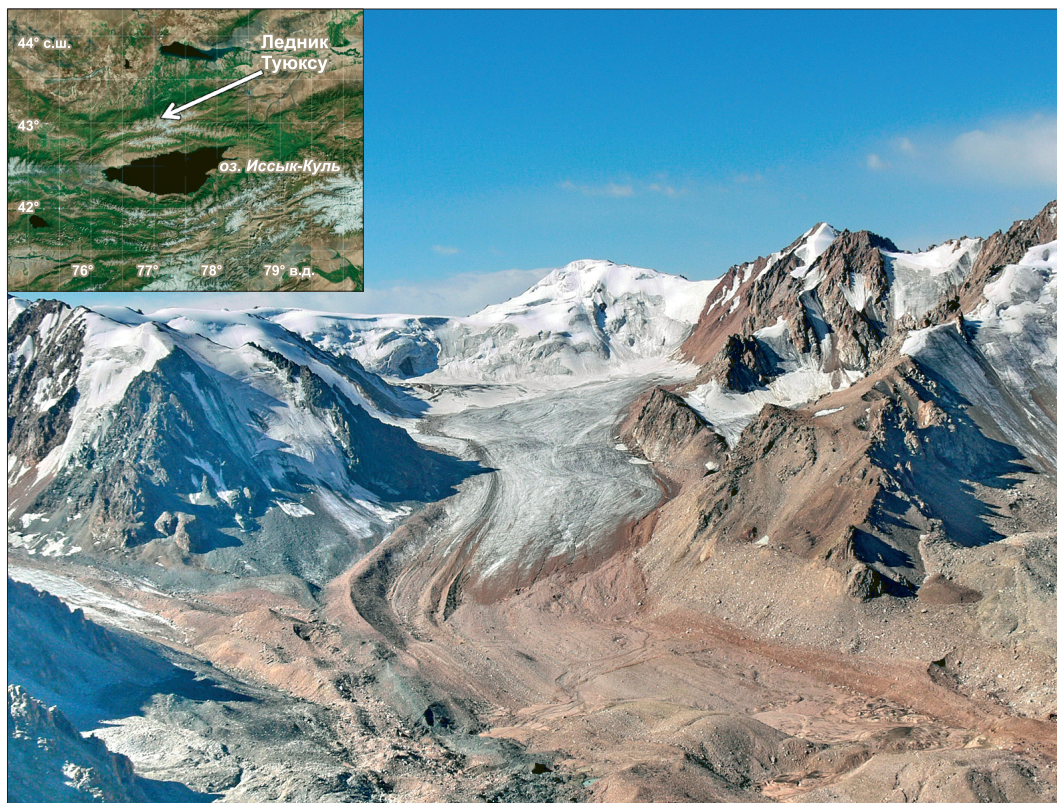
The article presents the results of field research carried out on the Central Tuyuksu glacier in 2013 by the scientists from the Institute of Geography of the RAS and from the Institute of Geography of Kazakhstan. The position of the glacier's contemporary boundaries has been defined using satellite imagery. Based on the obtained data on the terrestrial radio-echo sounding and DGPS-survey, the thickness of the ice has been determined. The ice thickness, the surface topography and the bed of the glacier have been mapped. The results of these studies confirm the previously made assumptions about the polythermal structure of the Tuyuksu glacier. Warm water-containing ice has been determined to occupy more than 40 % of the total volume of the glacier.

*Tien Shan, Tuyuksu glacier, radio-echo sounding, DGPS-survey, polythermal glacier*

ВВЕДЕНИЕ

Долинный ледник Центральный Туюксу (Ту-юксу) расположен на северном склоне Заилийского Алатау (Тянь-Шань) в верховьях р. Малая Алматинка (рис. 1). По своим морфологическим особенностям ледник Туюксу является достаточно типичным для ледниковой системы северного склона хребта. Он имеет северную экспозицию и обладает близкими к средним для этого района размерами, морфометрическими, гипсометрическими и другими показателями. Большая часть его поверхности доступна для проведения разного рода гляциологических исследований, которые были начаты в 1902 г. и продолжаются до сих пор. После проведения Международного геофизического года (МГГ, 1957–1959 гг.) наблюдения стали ежегодными. Исследования затрагивали разнообразные аспекты жизни ледника: режим и строение [Макаревич и др., 1969; Соломина, 1997; Виле-

сов, Уваров, 2001], условия питания, абляцию и баланс массы [Ледники Туюксу, 1984; Макаревич, Касаткин, 2011; Hagg et al., 2004; Eder et al., 2005], ледниковый сток [Макаревич, 1989; Пивень, 2013], температурный режим ледниковой толщи и др. В 1965–1974 гг. в горно-ледниковом бассейне Туюксу под руководством К.Г. Макаревича проводились исследования по программе Международного гидрологического десятилетия (МГД). После их завершения регулярные наблюдения за балансом массы ледника и динамикой его границ были продолжены и в настоящее время исследования на леднике Туюксу и в его бассейне ведутся по Международной гидрологической программе (МГП) и гляциологическому мониторингу. Ледник Туюксу входит в число последних четырех ледников на постсоветском пространстве (два на Кавказе, один на Алтае и один в Казахстане), на которых поддер-



**Рис. 1. Географическое положение ледника Центральный Туяксу.**

Фото В. Виноходова (10.08.2007). На врезке – фрагмент из Google Earth.

живается непрерывный ряд масс-балансовых наблюдений на протяжении последних десятилетий. Данные натурных наблюдений за пятилетние периоды регулярно публикуются в выпусках "Fluctuations of Glaciers". Параллельно, с 1988 г. материалы наблюдений за балансом массы ледника за двухгодичные периоды публикуются в выпусках "Glacier mass balance Bulletin". Оба журнала издаются Международной службой мониторинга ледников мира (Цюрих, Швейцария). К настоящему времени библиография по леднику Туяксу включает более 400 наименований.

Благодаря указанным исследованиям и длительному ряду наблюдений ледник Туяксу является одним из наиболее изученных горных ледников Азии. Однако это вовсе не означает, что он утратил свою привлекательность в качестве объекта гляциологических исследований. С одной стороны, продолжение существующих рядов наблюдений позволяет использовать данный ледник в качестве естественного индикатора при решении актуальной задачи определения современных тенденций изменения климата. С другой стороны, накопленные массивы разнообразных данных о его строении и режиме предоставляют возможность отработки новых современных методов и техноло-

гий гляциологических исследований. С этой целью в августе 2013 г. на леднике Туяксу были проведены совместные работы сотрудниками Института географии РАН и Института географии АН Казахстана и получена новая информация о его современном состоянии и структуре, представленная в данной статье.

### ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Во время многолетних исследований ледника Туяксу неоднократно предпринимались попытки определения его толщины разными способами. Для этой цели использовались как расчетные, так и геофизические методы. Первые данные о толщине ледника получены во время МГГ в 1957 г. в результате сейсмических исследований [Берзон и др., 1959]. В 1960–1970-х гг. в ряде точек было выполнено электроразведывание и бурение огнем и термоэлектрическим способами [Боровинский, 1963]. В 1981, 1982 и 1985 гг. на леднике проводились радиолокационные съемки в дециметровом и декаметровом диапазонах на частотах 620, 8 и 720 МГц по нескольким продольным и поперечным профилям [Боброва и др., 1988]. Все эти методы дали вполне удовлетворительные и сопостави-

мые результаты. Механическим бурением льда на одном из профилей было достигнуто ложе на глубине 52.6 м, что соответствовало результатам геофизических измерений [Ледники Туюксу, 1984].

Последовавшие за этим годы были не самыми благоприятными в истории жизни ледника [Вилесов, Уваров, 2001]. Во всем мире отмечалось сокращение размеров оледенения, особенно ускорившееся в последнее десятилетие. Язык ледника Туюксу с 1985 г. по настоящее время отступил на расстояние порядка 600 м [Макаревич, Касаткин, 2011]. Место расположения упоминавшейся выше скважины оказалось за пределами ледника на освободившейся ото льда поверхности ложа. Соответственно, происходило изменение высоты остальной поверхности и сокращение объема ледника. Поэтому основной задачей полевых работ 2013 г. было получение данных о современной толщине ледника путем проведения наземной радиолокационной съемки. В процессе ее решения предполагалось также получить новую информацию о строении ледника.

Ледник Туюксу расположен в области отрицательных среднегодовых температур воздуха, и температура активного слоя льда (15–20 м от поверхности) не достигает 0 °C даже в его концевой части, расположенной на высоте 3500 м [Ледники Туюксу, 1984]. Лишь в самом верхнем слое льда толщиной не более 1 м в период интенсивного летнего таяния наблюдаются нулевые температуры. Вместе с тем результаты измерений температуры в скважинах, расположенных в разных высотных зонах ледника, полученные в 1958 г., показали, что температура льда с глубиной увеличивается. В одной из скважин, расположенной на высоте 3800 м, было зафиксировано ее нулевое значение, сохранявшееся постоянным в течение года на глубине 20 м [Макаревич и др., 1969]. Эти данные свидетельствовали о неоднородном температурном режиме ледниковой толщи и его возможных проявлениях в структуре ледника.

Предположения о наличии второго слоя высказывались позже при обсуждении результатов наземного радиолокационного зондирования ледника аппаратурой РЛС-620 в 1981 г. Однако тогда речь шла в основном о наличии мощного слоя донной морены, лежащей на коренных породах. Признаков политермического строения ледника на полученных радарограммах маршрутной съемки не выявлено [Боброва и др., 1985].

В том же 1981 г. на одном из поперечных профилей в 50 м выше скважины 1958 г. А.В. Эповым был проведен эксперимент по определению скорости распространения радиоволн во льду методом наклонного радиозондирования с использованием РЛС-620. Полученная величина скорости радиоволн на глубинах ниже 40–60 м составляла 0.135 м/нс и существенно отличалась от скорости

в вышележащих слоях (172 м/нс), что соответствует “теплому” льду с влагосодержанием порядка 7 % [Эпов, 1984]. Однако высказанное им предположение о наличии на этих глубинах слоя обводненного льда было признано неверным [Боброва и др., 1985] и регулярные подповерхностные отражения на большей части других профилей интерпретировались как граница раздела “лед–морена”.

В нашем случае технические характеристики радиолокационной аппаратуры ВИРЛ-6 [Мачет и др., 2006] и опыт ее применения при исследовании политермических ледников Арктики [Martín-Español et al., 2013] и Тянь-Шаня [Петраков и др., 2014] позволяли надеяться на обнаружение этих признаков. Дополнительный интерес представляла оценка возможности применения DGPS-съемки для создания цифровой модели поверхности ледника и ее использования при выполнении последующих балансовых наблюдений.

Полевые исследования на леднике Туюксу проводились в конце августа 2013 г., а непосредственные измерения толщины ледника и высоты его поверхности были выполнены в течение последних трех дней – с 27 по 29 августа. Время их проведения было максимально приближено к концу периода абляции данного года. Поэтому большая часть поверхности ледника в момент проведения радиолокационной и DGPS-съемок была уже свободна от сезонного снежного покрова. Исключение составляли верхние участки в области аккумуляции и склоны тылового хребта, ограничивающего ледник с юга. Съемка наиболее крутых участков и зон трещин, закрытых снегом, не проводилась из соображений необходимости обеспечения безопасности работ.

Для измерений толщины ледника был использован радиолокатор ВИРЛ-6 с центральной частотой 20 МГц и цифровой регистрацией радарных и GPS-данных с интервалом 0.2–1.0 с (частота повторения импульсов 20 кГц; выходная мощность 9.6 кВт; длительность импульса 0.5 нс; тип антенны – резистивно нагруженный диполь с входным сопротивлением 600 Ом, длина 5.6 м) [Василенко и др., 2003]. Геодезическая съемка поверхности ледника была выполнена с помощью двухчастотного дифференциального GPS-приемника Topcon GB-500 в кинематическом режиме с интервалом 10 м. Погрешность измерений координат в плане и по высоте не превышала 10 и 15 мм соответственно [Topcon GB-500 Manual, 2007]. Радиолокационное профилирование производилось пешей группой из трех человек, со средней скоростью 2 км/ч. Профили измерений проходили через вехи, используемые ежегодно для наблюдений за балансом массы ледника традиционным гляциологическим методом, координаты которых регистрировались дополнительно.



## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выполненных измерений были получены два массива данных: записи отраженного радиосигнала и координаты точек на поверхности ледника по пройденным профилям в картографической проекции WGS84/UTM зона 43N. За три дня работ пройдено более 25 км поперечных и продольных профилей, покрывающих максимально доступную площадь ледника. Кроме ледниковой поверхности был сделан дополнительный профиль по гребню правой боковой морены для оценки возможности определения наличия и размеров содержащегося в ней погребенного льда. Положения современных границ ледника и маршруты съемок показаны на космическом снимке из Google Earth (рис. 2). Благодаря высокому геометрическому разрешению снимка (сенсор – GeoEye, разрешение лучше 1 м), удачному сочетанию времени съемки (06.09.2012) и погодных условий, на нем хорошо видны особенности морфологии поверхности ледника и границы зон льдообразования.

Следует отметить, что обсуждаемые в статье результаты исследований и количественные оценки относятся только к той части ледника, которая обеспечена данными непосредственных измерений. На космическом снимке (см. рис. 2) видно, что самые верхние профили съемки проходят в непосредственной близости от границы многолетних фирнов, выступающих темной каймой из-под сезонного снега на высоте порядка 3800 м. Таким образом, охваченная съемкой часть ледника включала область абляции и зону ледяного питания. Экстраполяция полученных данных на крутые и разорванные трещинами склоны в области аккумуляции является самостоятельной задачей, и ее решение на данном этапе не предполагалось.

Полученные с помощью DGPS-съемки координаты были использованы для построения цифровой модели поверхности ледника. Обработка выполнялась в программной среде ArcGIS 10.0 с помощью модуля Topo to Raster. Погрешность интерполяции высоты поверхности ледника между профилями не превышала  $\pm 0.5$  м.

Для обработки данных радиозондирования использован пакет программ RadexPro 3.1. [Кульницкий и др., 2001]. При расчетах толщины для теплого и холодного льда принята средняя скорость распространения радиоволн, равная 0.168 м/нс [Мачерет и др., 2006; Глазовский, Мачерет, 2014]. Оценка величины среднеквадратичного отклонения данных о толщине льда, выполненная по точкам пересечения профилей, показала хорошее совпадение ( $\pm 2$  м).

Практически на всех профилях были получены идентифицируемые отражения сигнала от ложа и промежуточного горизонта (рис. 3). Наличие внутреннего отражающего горизонта (ВОГ)

является индикатором политермических ледников, к которым вполне можно отнести и ледник Центральный Туюксу. Возможность выделить границу раздела теплого и холодного льда позволила построить карты распределения их толщин в пределах охваченной съемкой поверхности ледника (рис. 4). Радиозондирование морены, разделяющей ледники Центральный Туюксу и Иглы Туюксу, показало наличие погребенных льдов толщиной до  $(40 \pm 2)$  м (см. рис. 3, в).

Цифровая модель поверхности и результаты радиозондирования использовались для построения карты ложа ледника (рис. 5) и оценки его объема (см. таблицу). Объем льда вычислен с использованием аппроксимации Topo to Raster ANUDEM [Hutchinson, 1989] в программе ArcGIS, учитывающей гидрологическую корректность рельефа ложа. Методика определения погрешности при оценке объема ледника с использованием данных радиозондирования подробно изложена в работе [Martín-Español et al., 2013], ее величина составляет 3.6 %.

Из построенной карты ложа следует, что оно представляет собой поверхность, равномерно с небольшим уклоном (порядка  $8-10^\circ$ ) повышающуюся от нижней границы языка ледника к границе его питания. В то же время она отражает асимметрию области питания ледника и обусловленные ею различия в интенсивности эрозионной деятельности потоков льда – основного ствола ледника и его правой ветви. Ложбина на днище вдоль правого борта, по-видимому, является следствием более высокой активности правого ледяного потока, имеющего до места слияния большую крутизну. О наличии ригеля в области трещин в самом узком месте основного потока льда можно судить по изменению рисунка горизонталей на уровне 3540 м.

Ледник имеет максимальную толщину в области границы питания (см. рис. 4, а). Здесь она достигает 103 м. При движении вниз толщина льда плавно уменьшается до нескольких метров на языке. Еще два локальных максимума с толщиной льда до 90 м наблюдаются на правой ветви. Объем льда в пределах охваченной измерениями площади ( $1.61 \text{ км}^2$ ) составил  $(0.078 \pm 0.003) \text{ км}^3$ .

Карты распределения толщин холодного и теплого льда по площади ледника Туюксу имеют более пестрый характер, отражая сложное взаимодействие выхолаживающего влияния атмосферы и воды в теле ледника (см. рис. 4, б, в). Тем не менее с некоторой степенью допущения можно выделить и закономерности в ее распределении. Так, толщина слоя холодного льда, представляющего собой внешнюю оболочку ледника, довольно равномерно распределена вдоль по основному потоку льда. В направлении от языка к области питания ее величина, незначительно увеличиваясь, колеб-



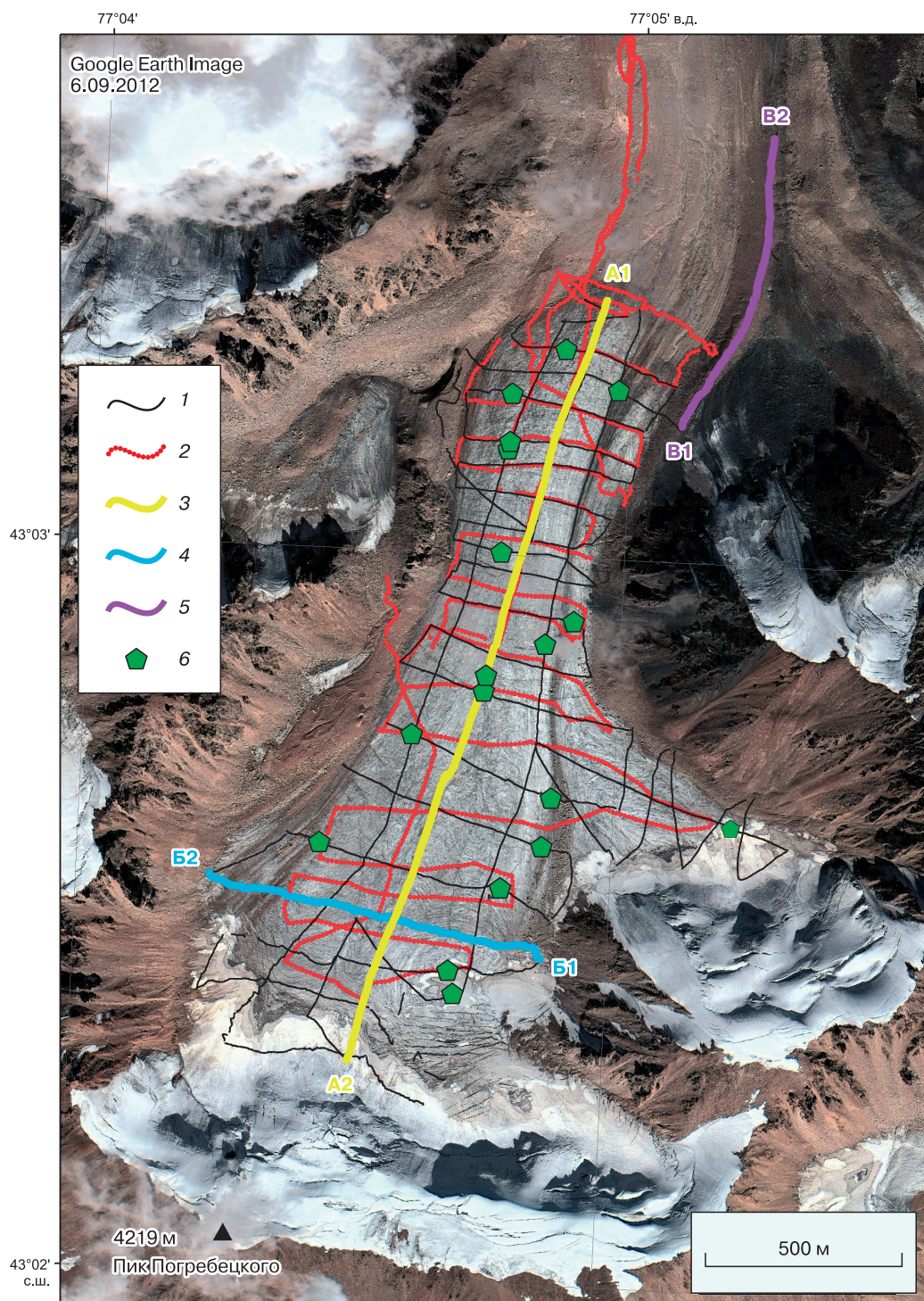
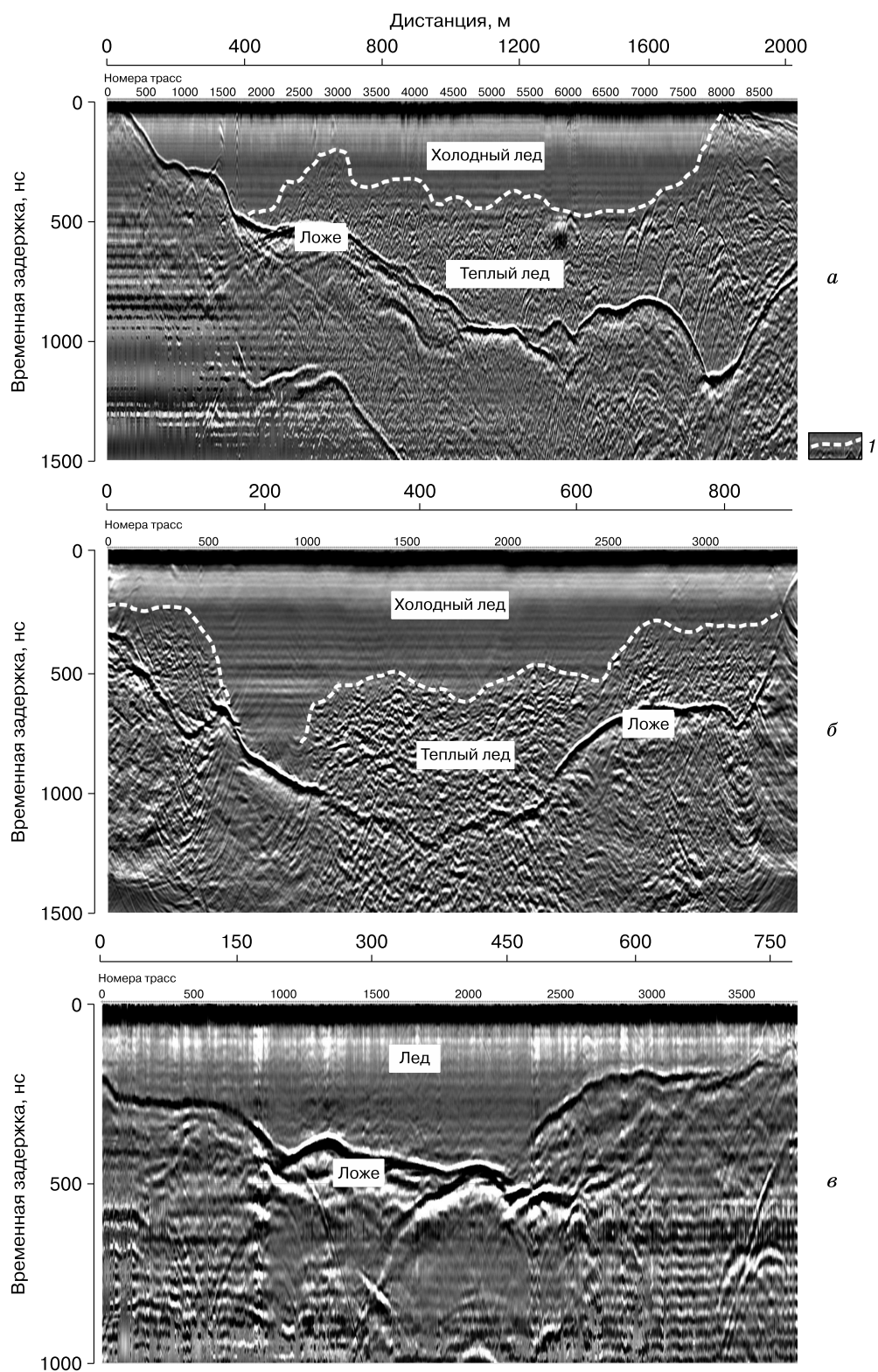


Рис. 2. Маршруты инструментальных измерений ледника Туюксу (в качестве подложки использован космический снимок от 06.09.2012 г. из Google Earth).

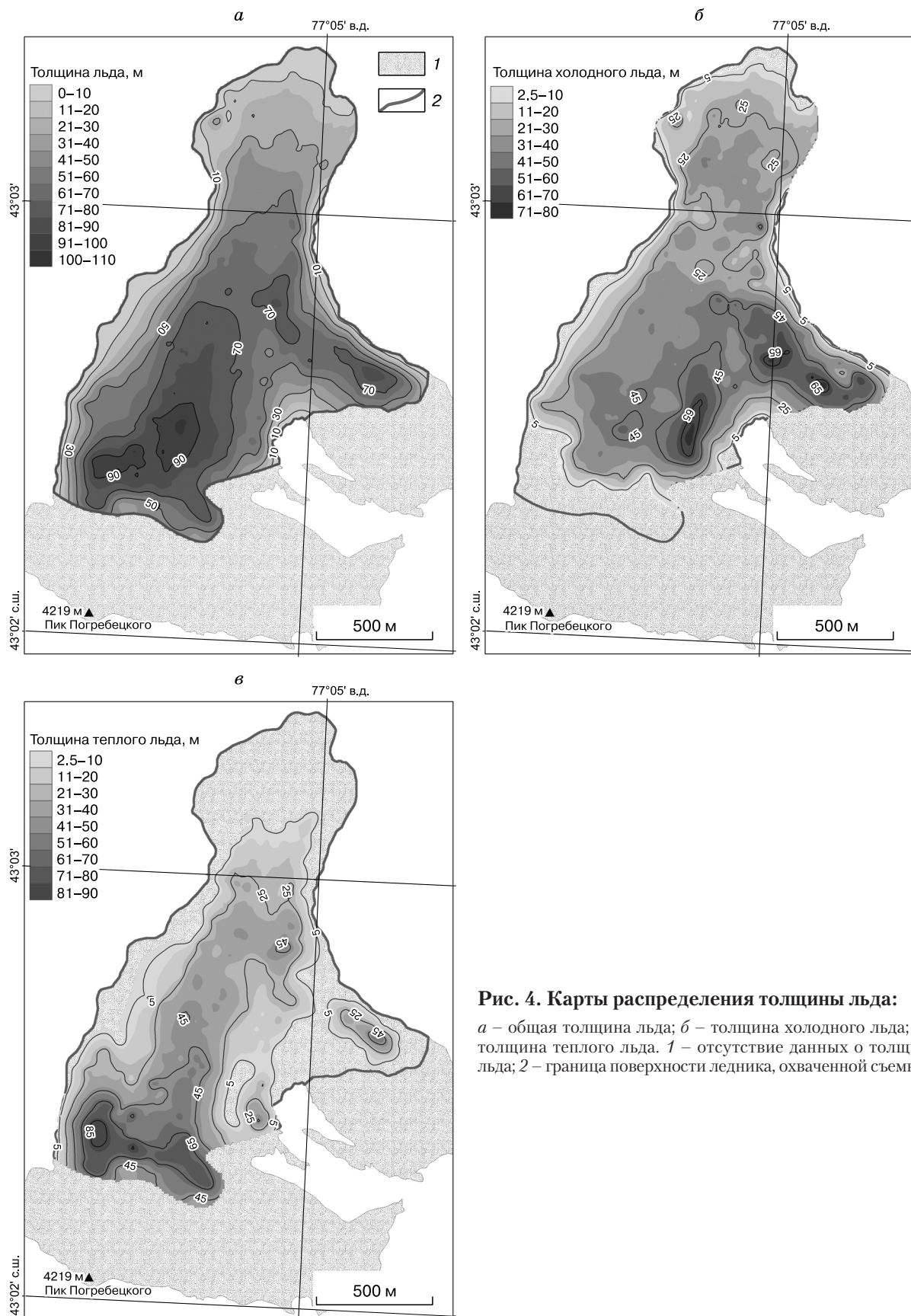
1 – радиолокационная съемка; 2 – DGPS-съемка; 3 – продольный радиолокационный профиль A1–A2; 4 – поперечный радиолокационный профиль B1–B2; 5 – радиолокационный профиль по гребню правой морены B1–B2; 6 – положения ледяных колодцев, сохраняющиеся из года в год.





**Рис. 3. Примеры радарограмм, полученных на профилях ледника Туюксу:**

*a* – продольном А1–А2; *б* – поперечном Б1–Б2; *в* – по гребню правой морены В1–В2. 1 – граница раздела теплого и холодного льда. Верхняя шкала – дистанция, пройденная от начала маршрута, в метрах.



**Рис. 4. Карты распределения толщины льда:**

*а* – общая толщина льда; *б* – толщина холодного льда; *в* – толщина теплого льда. *1* – отсутствие данных о толщине льда; *2* – граница поверхности ледника, охваченной съемкой.



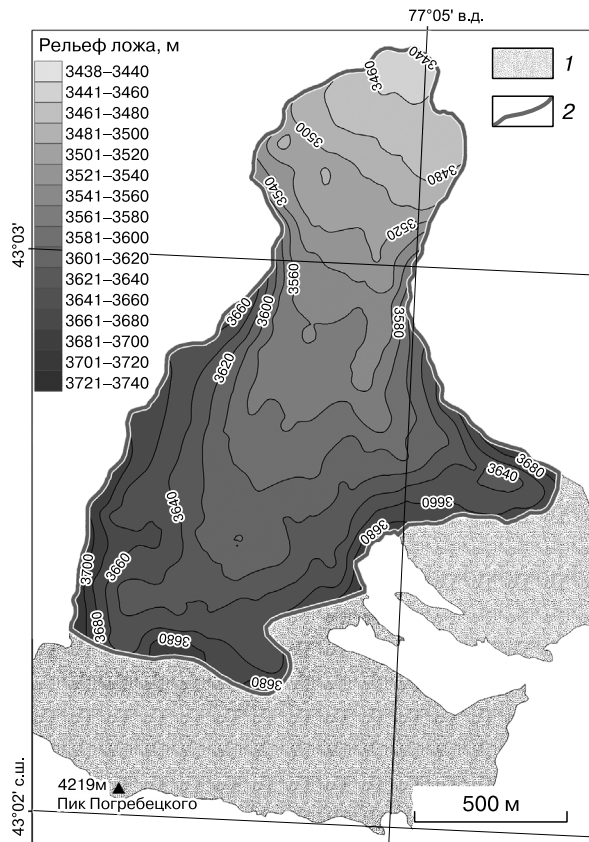


Рис. 5. Карта рельефа ложа ледника Туюксу.

1 – отсутствие данных о толщине льда; 2 – граница поверхности ледника, охваченной съемкой.

лется в диапазоне 25–45 м. Некоторое уменьшение толщины холодного льда наблюдается в зоне ригеля, где этому, вероятно, способствует разорванная глубокими трещинами поверхность. Большие значения толщин смещены к правому борту, где они превышают 65 м. Возможно, эта асимметрия обусловлена общей экспозицией ледника на север и экранирующим эффектом от высокого

Толщина и объем ледника  
по данным радиозондирования

| Объект исследований                     | Площадь, км <sup>2</sup> | Толщина льда, м |            | Объем льда, км <sup>3</sup> |
|-----------------------------------------|--------------------------|-----------------|------------|-----------------------------|
|                                         |                          | макс.           | сред.      |                             |
| Поверхность ледника, охваченная съемкой | $1.61 \pm 0.06$          | $103 \pm 2$     | $47 \pm 2$ | $0.078 \pm 0.003$           |
| Холодный лед                            | $1.41 \pm 0.05$          | $74 \pm 2$      | $27 \pm 2$ | $0.044 \pm 0.002$           |
| Теплый лед                              | $1.12 \pm 0.04$          | $96 \pm 2$      | $20 \pm 2$ | $0.034 \pm 0.001$           |
| Правая морена                           | –                        | $40 \pm 2$      | $24 \pm 2$ | –                           |

горного обрамления правого борта, обеспечивающего более длительное время выхолаживания поверхности ледника в первой половине суток. Это накладывается также на увеличение продолжительности холодного периода года с ростом абсолютной высоты поверхности и способствует проникновению волны холода в глубь ледника.

Рисунок 6 демонстрирует толщину и взаимное расположение слоев холодного и теплого льда на продольном А1–А2 и поперечном Б1–Б2 профилях радиолокационного зондирования (их положения на леднике показаны на рис. 2). Из рис. 6 следует, что нижняя граница холодного льда совпадает с границей языка ледника. На протяжении нескольких сотен метров вверх по леднику холодный лед имеет непосредственный контакт с ложем, и только потом на радарограммах появляются признаки теплого льда и отражения от его раздела с холодным льдом. Верхняя граница холодной оболочки заканчивается на высоте 3800 м. Ее площадь составляет 1.41 км<sup>2</sup>, а объем заключенного в ней холодного льда равен  $(0.044 \pm 0.002)$  км<sup>3</sup>.

Вклиниваясь в пространство между холодным льдом и ложем, слой теплого льда становится все толще вверх по леднику, достигая максимальных значений в области аккумуляции – порядка 100 м. Здесь он выходит на поверхность ледника за пределами верхней границы распространения холодного льда и уходит в зону присклоновых

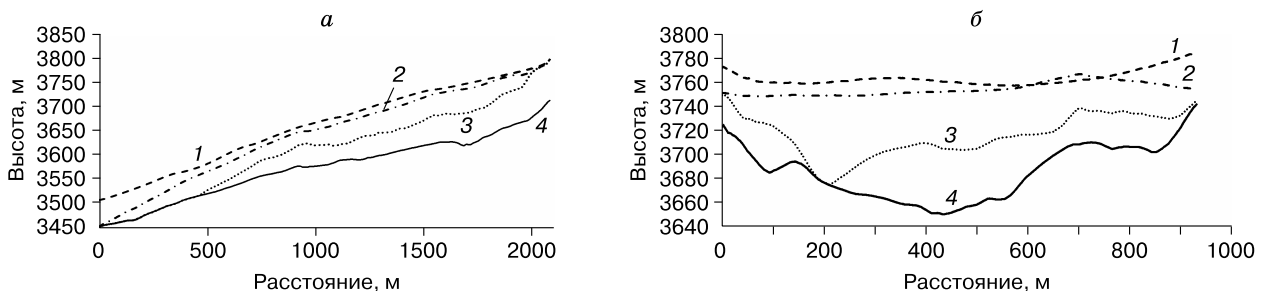


Рис. 6. Изменения высоты положения поверхности ледника, границы раздела теплого и холодного льда и поверхности ложа на продольном А1–А2 (а) и поперечном Б1–Б2 (б) профилях радиолокационного зондирования:

1 – поверхность 1958 г.; 2 – поверхность ледника в 2013 г.; 3 – положение внутреннего отражающего горизонта в 2013 г.; 4 – ложе ледника.

трещин и возрастающих уклонов тыловой части. По рисунку изолиний можно предположить, что продолжается это недолго, но установить положение верхней границы теплого льда не удалось из-за необходимости обеспечения безопасности работ.

Нижняя часть зоны аккумуляции является основным источником происхождения теплого льда в теле ледника. Расположенная на дне обширного цирка она представляет собой почти горизонтальную поверхность, что способствует скоплению талых вод в отдельных местах и образованию снежных “болот”. В результатах исследований предыдущих лет отмечалось, что резкое повышение температуры льда, наблюдаемое в области аккумуляции, – следствие воздействия фирновой толщи, мощность которой превышает здесь 3 м, а также влияния талых вод в летний период. Талые воды, проникая от поверхности во все более глубокие и холодные слои снега и фирна, охлаждаются до температуры замерзания и выделяют при этом тепло, способствующее разрушению зимней волны холода и прогреванию этих слоев до нулевой температуры [Ледники Туюксу, 1984].

Развитая дренажная сеть, ускоряющая процесс передачи тепла на более низкие горизонты, существует практически по всей поверхности ледника. Поверхностные воды перехватываются трещинами, количество которых особенно велико выше ригеля, и образуют внутреннюю дренажную сеть. Многие поверхностные водотоки заканчиваются ледяными колодцами, положения которых сохраняются постоянными на протяжении нескольких лет (см. рис. 2, усл. зн. 6).

Распределение теплого льда по площади повторяет особенности строения ложа, поскольку заполняет его, подчиняясь в основном действию силы гравитации. Однако в отдельных местах на его распределение могут оказывать влияние особенности строения дренажной сети, обусловленные рельефом поверхности ледника или неоднородностью ледниковой толщи. Дренажная сеть по определению может не только осуществлять передачу, но и отток влаги и “осушение” отдельных участков, способствующие их промерзанию. Возможно, наблюдаемое на поперечном профиле Б1–Б2 (см. рис. 6, б) проникновение холодного льда до поверхности ложа обусловлено аналогичной причиной.

Для оценки изменения высоты поверхности ледника с момента начала регулярных исследований была выполнена реконструкция ее положения с использованием карты 1958 г. [Gletschergebiet Tujuksu, 1961], которое показано линией 1 на продольном и поперечном профилях радиолокационной съемки (см. рис. 6). В свое время эта карта была создана в масштабе 1:10 000 в местной системе координат, проведенной от одного из старых

строений Алматы. Впоследствии карта была переведена в ту же систему координат, что использовалась при выполнении DGPS-съемки, – UTM WGS84 [Hagg et al., 2004]. Сравнение положения поверхности ледника в 1958 г. с современным говорит о том, что максимальное понижение поверхности (порядка 50 м) наблюдается в области языка. Вверх по леднику разница уменьшается до 10–20 м, долгое время оставаясь почти постоянной, и, наконец, в области границы питания эти поверхности практически совпадают. Разница составляет в отдельных местах несколько метров, что соизмеримо с погрешностью реконструкции. Таким образом, несмотря на отступление языка ледника на протяжении предшествовавшего периода инструментальных наблюдений, высота поверхности в области его питания и соответственно толщина льда оставались практически неизменными.

Последняя оценка объема ледника Туюксу, измеренного от конца ледника до высоты 3800 м, дана в работе [Макаревич, Касаткин, 2011]. В ней приводится цифра 0.095 км<sup>3</sup>. Верхняя граница наших измерений практически совпадает с этой горизонталью. Если учесть, что за прошедшие годы высота поверхности в области зоны аккумуляции мало изменилась, и сравнить эту величину с полученной нами ( $0.078 \pm 0.003$ ) км<sup>3</sup>, то можно сделать вывод, что за 7 лет ледник потерял порядка ( $0.017 \pm 0.001$ ) км<sup>3</sup>.

## ВЫВОДЫ

- Полученные результаты свидетельствуют о том, что ледник Центральный Туюксу имеет политермическую структуру. Внутри наружной оболочки, состоящей из холодного льда, содержится теплый влагосодержащий лед, занимающий более 40 % общего объема ледника.

- Нижняя граница холодного льда совпадает с границей языка ледника и на протяжении нескольких сотен метров вверх по леднику холодный лед имеет непосредственный контакт с ложем. Слой теплого льда вклинивается в пространство между холодным льдом и ложем, его толщина увеличивается вверх по леднику и достигает максимальных значений в области аккумуляции (порядка 100 м). Здесь, за пределами верхней границы распространения холодного льда, расположенной на высоте около 3800 м, он выходит на поверхность ледника и уходит в зону присклоновых трещин тыловой части. Нижняя часть зоны аккумуляции является основным источником происхождения теплого льда в теле ледника.

- В настоящее время ледник Центральный Туюксу продолжает сокращаться. Линия фронта отступает на протяжении всего периода инструментальных наблюдений, начатых в 1956 г. Сравнение высоты поверхности ледника в 1958 г. с со-



временным положением говорит о том, что максимальное понижение (порядка 50 м) наблюдается в области языка. В районе границы питания эти поверхности почти совпадают. Разница составляет в отдельных местах несколько метров, что соизмеримо с погрешностью реконструкции. Таким образом, несмотря на отступление языка ледника, высота поверхности в области питания и толщина льда остаются практически неизменными. Средняя толщина ледника Центральный Туюксу по результатам радиолокационной съемки составляет 47 м, при этом ее максимальное значение, зафиксированное в области границы питания, – 103 м.

Полученные данные о политермической структуре ледника могут быть использованы в дальнейшем для выявления новых показателей его реакции на происходящие изменения климата. В этом отношении представляет интерес организация регулярных наблюдений за положением ВОГ в сочетании с традиционными наблюдениями за балансом массы ледника. На данный момент недостаточное количество сведений о распределении температур в толще ледника и результаты предыдущего радиозондирования не позволили адекватно оценить динамику положения ВОГ за прошедший период наблюдений. Однако полученные в работе количественные оценки и построенные на их основе карты могут служить основой для дальнейшего мониторинга этих параметров.

Важным обстоятельством является и то, что среди политермических ледников часто встречаются пульсирующие, поскольку неожиданное разрушение оболочки холодного льда может служить одним из пусковых механизмов подвижки. Причины разрушения могут быть связаны с изменением соотношения масс холодного и теплого льда в теле ледника, происходящим со временем в результате воздействия как внутренних, так и внешних факторов. Не исключено, что зафиксированные ранее в этом районе подвижки ледников Шокальского, Богатырь и Корженевского были обусловлены их политермической структурой. Поэтому, если до недавнего времени в отношении ледника Центральный Туюксу этот вопрос и не возникал, то его изучение на примере данного ледника может представлять методический и практический интерес в условиях современных изменений климата.

*Авторы выражают благодарность казахским коллегам и руководству Института географии Министерства образования и науки Республики Казахстан (Алматы) за помощь в организации и проведении исследований.*

*Работа выполнена при поддержке Программы Отделения наук о Земле РАН № 11 “Влияние современных изменений климата и окружающей среды на процессы в атмосфере и криосфере”.*

## Литература

- Берзон И.С.** Сейсмические исследования на леднике Туюксу / И.С. Берзон, Л.И. Боканенко, В.С. Исаев. М., Изд-во АН СССР, 1959, 68 с.
- Боброва Л.И., Василенко Е.В., Макаревич К.Г., Мачерет Ю.Я., Меньшиков В.А., Никитин С.А.** Толщина льда и подледный рельеф ледника Туюксу // Материалы гляциол. исслед., 1988, вып. 64, с. 73–75.
- Боброва Л.И., Журавлев А.Б., Макаревич К.Г., Мачерет Ю.Я., Черкасов П.А.** Первый опыт аэrorадиозондирования горных ледников Казахстана // Материалы гляциол. исслед., 1985, вып. 52, с. 46–54.
- Боровинский Б.А.** Изучение ледников Заилийского Алатау геофизическими методами / Б.А. Боровинский. М., Изд-во АН СССР, 1963, 112 с.
- Василенко Е.В., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Наварро Ф.Х., Соколов В.Г., Ширайва Т.** Георадар ВИРЛ для зондирования ледников // Материалы гляциол. исслед., 2003, вып. 94, с. 225–234.
- Вилесов Е.Н.** Эволюция современного оледенения Заилийского Алатау в XX веке / Е.Н. Вилесов, В.Н. Уваров. Алматы, Изд-во Казак Университет, 2001, 252 с.
- Глазовский А.Ф.** Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований / А.Ф. Глазовский, Ю.Я. Мачерет. М., ГЕОС, 2014, 527 с.
- Кульницкий Л.М., Гофман П.А., Токарев М.Ю.** Математическая обработка данных георадиолокации и система RADEXPRO // Разведка и охрана недр, 2001, № 3, с. 6–11.
- Ледники Туюксу (Северный Тянь-Шань)** / Отв. ред. А.Н. Кренке, Н.А. Бочин. Л., Гидрометеоздат, 1984, 172 с.
- Макаревич К.Г.** Оледенение Заилийского Алатау / К.Г. Макаревич, Н.Н. Пальгов, Г.А. Токмагамбетов, Е.Н. Вилесов, П.А. Судаков, Р.Г. Головкова, Т.Я. Денисова, Н.Д. Егорова. М., Наука, 1969, 288 с.
- Макаревич К.Г.** Жидкий сток из бассейна Туюксу в Заилийском Алатау за 1964–84 гг. // Ледники, снежный покров и лавины в горах Казахстана. Алма-Ата, Наука, 1989, с. 68–79.
- Макаревич К.Г., Касаткин Н.Е.** Полувековые исследования баланса массы и морфометрических изменений Центрального Туюксуйского ледника в Заилийском Алатау // Лед и снег, 2011, вып. 1 (113), с. 36–45.
- Мачерет Ю.Я., Берикашвили В.Ш., Василенко Е.В., Соколов В.Г.** Широкополосный импульсный радар для зондирования ледников с оптическим каналом синхронизации и цифровой обработкой сигналов // Датчики и системы, 2006, № 12, с. 2–8.
- Петраков Д.А., Лаврентьев И.И., Коваленко Н.В., Усубалиев Р.А.** Толщина, объем и современные изменения площади ледника Сары-Тор (массив Ак-Шыйрак, Внутренний Тянь-Шань) // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 3, с. 91–100.
- Пивень Е.Н.** Климатические процессы в нивально-гляциальном поясе Заилийского Алатау и их воздействие на горное оледенение и речной сток // Лед и снег, 2013, вып. 53 (2), с. 21–28.
- Соломина О.Н.** Недавняя история ледников Туюксу // Материалы гляциол. исслед., 1997, вып. 83, с. 81–88.
- Эпов А.В.** Метод наклонного радиозондирования при исследовании внутреннего строения ледника Центрального Туюксу // Материалы гляциол. исслед., 1984, вып. 50, с. 165–174.

**Eder K., Geiss N., Rentsch H., Kokarev A., Uvarov V.** Surveying and mapping of the Tuyuksu Glacier Region, Kazakhstan, 1:10,000 // IUGG(CCS) – UNEP – UNESCO. Fluctuations of Glaciers 1995–2000. Vol. VIII. World Glacier Monitoring Service. Zurich, 2005, p. 72–73.

**Gletschergebiet** Tjuksu, Sailiski Alatau. M. 1:10 000 / Institut für Kartographie T.H., Dresden, Germany, VEB Hermann Haack, 1961, Sh. 1.

**Hagg W.J., Braun L.N., Uvarov V.N., Makarevich K.G.** A comparison of three methods of mass-balance determination in the Tuyuksu glacier region, Tien Shan, Central Asia // J. Glaciol., 2004, vol. 50, No. 171, p. 505–510.

**Hutchinson M.F.** A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // J. Hydrol., 1989, No. 106, p. 211–232.

**Martín-Español A., Vasilenko E.V., Navarro F.J., Otero J., Lapazaran J.J., Lavrentiev I.I., Macheret Y.Y., Machío F.** Radio-echo sounding and ice volume estimates of western Nordenskiöld Land glaciers, Svalbard // Ann. Glaciol., 2013, No. 54 (64), p. 211–217.

**Topcon GB-500 Manual** / Topcon Positioning Systems, Inc. 2007. – URL: [www.topcon.com](http://www.topcon.com).

*Поступила в редакцию  
3 ноября 2015 г.*