

**Изменения ледника Абрамова (Алайский хребет) с 1850 по 2014 г.**

© 2017 г. А.Н. Мандычев, Р.А. Усубалиев, Э.А. Азисов

Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Кыргызская Республика  
a.mandychev@caiaig.kg**Changes of the Abramov Glacier (Alay Ridge) from 1850 to 2014**

A.N. Mandychev, R.A. Usubaliev, E.A. Azisov

Central-Asian Institute of Applied Researches of the Earth, Bishkek, Kyrgyzstan  
a.mandychev@caiaig.kg

Received May 18, 2016

Accepted January 26, 2017

**Keywords:** *aerial survey, glacier position, glacier tongue, glacier surge, space images.***Summary**

The purpose of this study was to determine the nature and rate of changes of the Abramov glacier over the period from 1850 to 2014. The glacier is located on the Alay Ridge in Kyrgyzstan. Its borders were estimated by means of interpretation and analysis of space images from the satellites Landsat-2, 5, 7, 8, KH-4A and KH-9 (program Corona), Geoeye-1 together with aerial photographs and topographical maps, and with addition of results of the field survey of the glacier's tongue by GPS instruments. As a result, we could find that the longstanding degradation of the glacier continued over the whole period under investigation, and against the background of that there were periods of relative stabilization of the front of the tongue as well as the periods of the glacier advances of different duration and intensity. In 1850, the total area of the glacier accounted for 26.4 km<sup>2</sup>, but by 2014 it reduced by 3.65 km<sup>2</sup>, or 13.8%, and became equal to 22.75 km<sup>2</sup>. Thus, annual reduction of the glacier area was equal approximately to 0.02 km<sup>2</sup> per a year, and its length decreased by almost 2950 m, i.e., the glacier contracted, on the average, by 18 m per a year. It should be noted that changes of the glacier area were similar during both the initial and final periods of observations, and it means that no intensification of anthropogenic impact upon the glacier was observed. Obviously, this fact is indicative of the prevalence of natural factors in the change of the glacier, expressed in irregular duration of cyclic changes.

**Citation:** Mandychev A.N., Usubaliev R.A., Azisov E.A. Changes of the Abramov Glacier (Alay Ridge) from 1850 to 2014. *Led i Sheg. Ice and Snow*. 2017. 57 (3): 326–333. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-326-333

Поступила 18 мая 2016 г.

Принята к печати 26 января 2017 г.

**Ключевые слова:** *аэрофотосъёмка, космические снимки, ледниковая пульсация, положение ледника, язык ледника.*

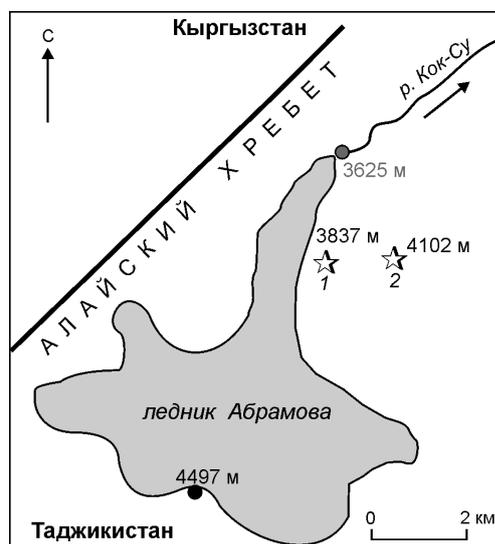
Цель данного исследования – определить характер и скорость изменения ледника Абрамова. Методика определения границ ледника за 1850–2014 г. предусматривала дешифрирование и анализ космических снимков спутников Landsat-2, 5, 7, 8, KH-4A, KH-9 программы Corona, Geoeye-1, аэрофотоснимков и топографических карт, а также съёмку в полевых условиях границ языка ледника с помощью GPS-приборов. В эти годы продолжалась деградация ледника Абрамова, его площадь сократилась на 3,65 км<sup>2</sup>, т.е. на 13,8%. Средняя скоростью сокращения площади ледника составила около 0,02 км<sup>2</sup>/год.

**Введение**

Задача настоящего исследования – определить характер и скорости изменения ледника Абрамова, расположенного в Алайском хребте Кыргызстана (рис. 1), за 1850–2014 гг. на основе данных, полученных в прошлом и в настоящее время. Детальнее всего ледник Абрамова исследовался в 1967–1994 гг. на базе гляциологического стационара «Ледник Абрамова», созданного Среднеазиатским региональным научно-исследовательским институтом (САРНИГМИ). В по-

следние годы исследования ледника вели эпизодически в рамках различных проектов.

С 2011 г. в рамках проектов «Вода в Центральной Азии» и «САТКОС» полевые исследования ледника ведёт Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ, г. Бишкек, Кыргызстан) совместно с Центром исследования Земли (г. Потсдам, Германия) и Университетом Фрибурга (Швейцария). Выполняются измерения, необходимые для определения баланса массы ледника, а также его границ и морфологических характеристик. Недалеко от существовавшего ранее, раз-



**Рис. 1.** Местоположение ледника Абрамова:  
1 – расположение и абсолютная высота гляциологического стационара «Ледник Абрамова» до 1994 г.; 2 – расположение и абсолютная высота автоматической метеостанции ЦАИИЗ с 2011 г.

**Fig. 1.** Location of Abramov Glacier.  
1 – position and altitude of the glacier station «Abramov Glacier» till 1994; 2 – site and altitude of automatic meteorostation of CAIAG since 2011

рушенного гляциологического стационара «Ледник Абрамова» установлена и работает автоматическая метеостанция ЦАИИЗ (см. рис. 1). В рамках этих проектов выполнены дешифрирование и анализ космических снимков, аэрофотоснимков, топографических карт, рассмотрены результаты геодезических измерений и уже опубликованные материалы.

### Методика исследований

Основные характеристики снимков приведены в табл. 1. Главный метод оценки корректности относительного положения границ ледника по снимкам и другим данным, полученным в разное время, – сравнение положения границ стабильных элементов рельефа (древних морен, локальных впадин, русел водотоков, гребней и вершин хребтов, скал, глыб), расположенных в основном на относительно пологом рельефе и в непосредственной близости к языку ледника. Кроме того, в позиционировании снимков и схем использован такой критерий, как стабильность во времени боковых границ ледника, расположенных выше конца языка, вне зоны интенсивной боковой абляции.

Границы ледника определяли в программе ENVI с помощью снимков, синтезированных по нескольким спектральным каналам, по пограничным пикселям, наиболее соответствующим согласно спектральной характеристике телу ледника и покрывающей его морене, а также по пикселям ближних инфракрасных каналов (каналы 6, 7), соответствующих наиболее охлажденным поверхностям открытого льда и морен, под которыми залегает лёд. Основное внимание уделяли границе языка ледника, расположенного в области абляции, как наиболее изменчивой части ледника. Границу ледника в области аккумуляции мы рассматриваем как практически неизменную в течение всего периода наблюдений. Это в значительной мере обусловлено преобладающей отрицательной температурой, препятствующей сокращению площади питания ледника, а также крутыми склонами в области питания и ледоразделами, ограничивающими значительное увеличение этой площади.

Основные космические снимки, использованные для определения границы ледника, – это снимки спутников Landsat, полученные с интернет-сервиса Earth Explorer геологической службы США. Снимки этих спутников, как видно из табл. 1, имеют разрешение в основном 15–30 м, реже 60 м с уровнем обработки L1T. Этот уровень обеспечивает определённую точность геопозиционирования на основе использования наземных контрольных точек и цифровой модели поверхности Земли. Данная точность представлена круговой ошибкой геопозиционирования при соответствующей доверительной вероятности (ДВ). Эта ошибка для снимков спутников Ландсат составляет: Landsat-2 < 60 м при 88% ДВ; Landsat-5 < 30 м при 99,5% ДВ; Landsat-7 < 30 м при 99,7% ДВ; Landsat-8 < 30 м при 99,6% ДВ. Для остальных исходных данных, используемых при дешифрировании, аналогичная оценка точности геопозиционирования отсутствует.

Минимальная ошибка дешифрирования всех используемых снимков соответствует величине разрешения снимка. Для результатов дешифрирования основное значение имеет оценка относительной пространственной точности позиционирования, которая выполнялась по измерению разницы в положении границ стабильных форм рельефа на сравниваемом опорном снимке и другом снимке, а также иного вида данных, геопривязанных по опорному снимку. В нашем случае в качестве опорных использованы снимки спутни-

Таблица 1. Космические снимки и аэрофотоснимки, использованные для определения границ ледника Абрамова

| Дата съёмки  | Спутник, самолёт | Сенсор             | Разрешение снимков, м | Уровень обработки, проекция, система координат |
|--|------------------|--------------------|-----------------------|--|
| 19.10.1964   | Corona, КН-4А    | Фотокамера         | 3                     | Геопривязка, UTM, WGS 84                       |
| 22.11.1973; 20.08.1980   | Corona, КН-9     |                    | 6                     |  |
| 12.07.1975; 04.08.1981; 18.07.1986   | Аэрофотоснимок   |                    | 1,8; 1; 1,6           |  |
| 28.09.1977; 14.07.1978   | Landsat-2        | MSS                | 60(57 × 79)           | LIT  |
| 20.10.1992; 02.08.1998   | Landsat-5        | TM                 | 30                    |  |
| 29.08.1999; 16.09.2000; 02.08.2001; 22.09.2002; 24.08.2003; 27.04.2004; 14.09.2005; 17.09.2006 | Landsat-7        | ETM                | 15–30                 |  |
| 19.07.2007   | Geoeye-1         | Оптико-электронный | 1,2                   | Орторектификация, UTM, WGS 84                  |
| 20.09.2007; 05.08.2008; 08.08.2009;  | Landsat-7        | ETM                | 15–30                 | LIT  |
| 04.09.2010; 07.09.2011   | Landsat-5        | TM                 | 30                    |  |
| 03.10.2012   | Landsat-7        | ETM                | 15–30                 |  |
| 12.09.2013; 27.06.2014   | Landsat-8        | OLI_TIRS           | 15–30                 |  |

ка Geoeye-1, имеющие максимальное разрешение и исходную геопривязку, а также снимки спутников Landsat. При сорегистрации снимков, не имеющих оригинальной геопривязки (аэрофотоснимки, снимки Corona), точки привязки выбирались вблизи языка ледника на стабильных, относительно пологих формах рельефа. В этом случае минимизируются геометрические искажения изображения за счёт угла съёмки и наклона поверхности рельефа.

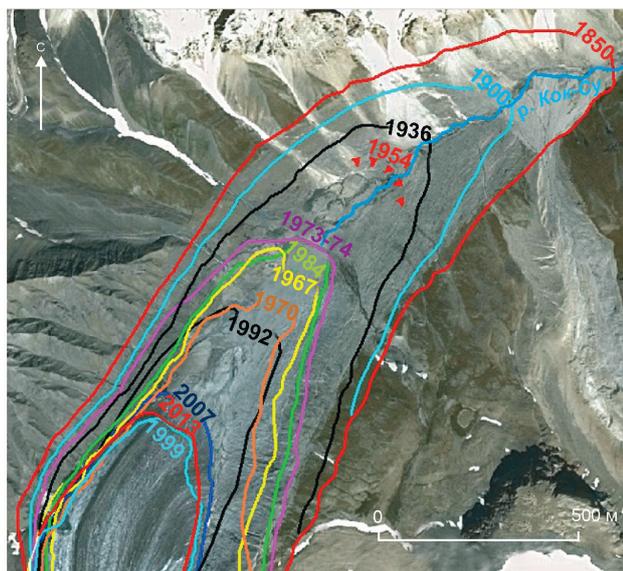
Для детализации границ ледника Абрамова разного времени, кроме снимков спутника Landsat, использовались, как уже упоминалось, космические снимки по программе Corona, полученные спутниками США с августа 1960 по май 1972 г. и с марта 1973 по октябрь 1980 г. (см. табл. 1). Они также получены с интернет-сервиса Earth Explorer, USGS, в разделе Declass 1(1996), 2(2002). Геопривязка этих снимков выполнялась по снимку спутника Geoeye-1 от 19.07.2007 г. с сервиса Google Earth по характерным наземным опорным точкам, расположенным вблизи языка ледника Абрамова. В результате получены границы ледника в 1964, 1973 и 1980 гг. В этом случае ошибка дешифрирования границ за счёт неортогональности снимка, деформации фотоплёнки и неточности геопозиционирования не превышала 50–100 м.

В дополнение к этому, положение языка ледника Абрамова в 1975, 1981 и 1986 гг. определено по аэрофотоснимкам (см. табл. 1), их геопривязка выполнена аналогично упомянутым снимкам Corona. Корректность привязки и относительная линейная ошибка оценивались в тех же пределах, что и для снимков Corona. Кроме этого, граница ледника Абрамова в 1986 г. подтверждена по

топографической карте района ледника масштаба 1:25 000, построенной на основе стереотопографической съёмки 1986 г. и изданной в 1991 г. Кыргызским аэрогеодезическим предприятием Госгеодезии СССР.

С целью получения более полной картины изменения ледника Абрамова и интегрирования ранее полученных материалов в систему современных цифровых данных использованы результаты исследований этого ледника, изложенные в публикации [1], в частности, опубликованный вариант схемы расположения границ ледника с 1850 по 1984 г. Эта схема была масштабирована и геопривязана с точностью не менее 50–100 м по приведённым в ней данным о расстояниях между разновременными границами, характерным контурам рельефа, руслу р. Кок-Су и границам ледника, полученным нами в результате дешифрирования космических снимков. Корректность пропорций схемы и геопривязки подтверждается по границе 1850 г. на рис. 2, которая хорошо вписывается в чётко наблюдаемую на снимке спутника Geoeye-1 (2007 г.) границу следа эрозионного воздействия льда на западный и восточный борта долины соответственно характерного поворота ледника по западной границе на северо-восток, совпадением конфигурации русла р. Кок-Су на схеме и на космическом снимке, а также совпадением обобщённой границы 1973–1974 гг. на схеме с границей 1973 г., полученной нами по снимку Corona.

Таким образом были получены в цифровом виде имеющиеся на схеме из публикации [1] границы ледника Абрамова в 1850, 1900, 1936, 1954, 1967, 1970, 1973–1974, 1984 гг. Положение грани-



**Рис. 2.** Расположение некоторых характерных границ ледника Абрамова с 1850 по 2013 г.

**Fig. 2.** Position of some characteristic borders of Abramov Glacier since 1850 for 2013

цы 1954 г. на схеме определено на основе сообщения в публикации [1] о расстоянии в 650 м между границами 1954 и 1967 гг. В целом получено достаточно точное соответствие границ ледника по схеме и космическим снимкам, особенно во фронтальной части языка ледника, и несколько хуже — по боковым границам, особенно по восточной.

Для ещё большей детализации изменения позиции языка ледника в период с 1969 по 1974 г., включающей в себя и известную по публикации [1] значительную наступательную подвижку (пульсацию) ледника в 1972–1973 гг., использована детальная схема из публикации [2]. Эта схема также была масштабирована и геопривязана, и границы ледника на ней практически совпадают с границами, полученными по космическому снимку Corona от 22.11.1973 г. и аэрофотоснимку от 12.07.1975 г. В этом случае получено хорошее совпадение восточной и северной частей границы ледника по схеме с границей ледника по космическому снимку. Некоторое отклонение на восток западной части границы ледника на схеме от границы по космическому снимку, возможно, связано с определением границы ледника при составлении схемы по явному проявлению льда без учёта части ледника, покрытой мореной. Согласно нашему варианту привязки схемы из публикации [1], разница подвижки при пульсации по расстоянию и скорости составляет

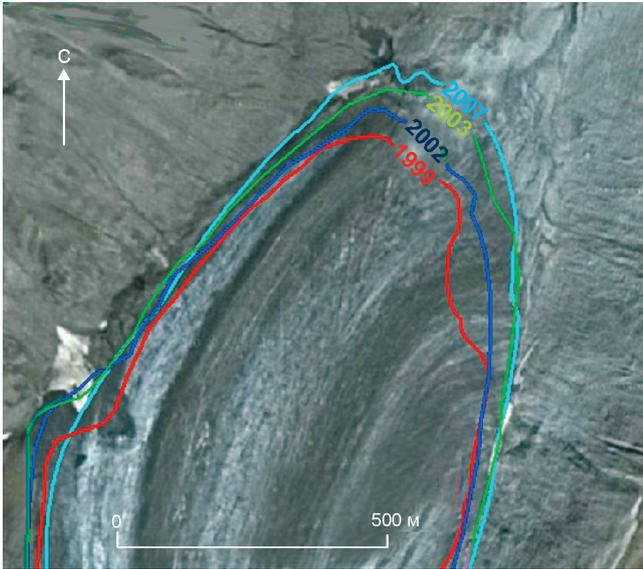
около 14%, что соответствует возможной линейной ошибке позиционирования в пределах 50 м.

Во всех рассмотренных случаях минимальный временной интервал, используемый для оценки скорости изменения ледника, составляет примерно один год. Это обусловлено тем, что значительная часть информации по изменению ледника, используемая в работе [1], не имеет более детальной временной характеристики. При этом большинство космических снимков, используемых для анализа, получены в период с июля по октябрь, т.е. максимальная ошибка интервала времени между сравниваемыми снимками равна  $\pm 4$  месяца.

### Результаты исследований и обсуждение

В результате дешифрирования космических снимков спутников Landsat с помощью программы ENVI 4.7 и последующей обработки в программе MapInfo 10 получены границы ледника Абрамова за период с 1977 по 2013 г. по снимкам спутников Landsat-2, 5, 7, 8. По результатам дешифрирования наиболее стабильны боковые восточная и западная границы ледника. По ним общий диапазон расхождения выявленных границ составляет около 60 м, а ошибки определения отдельных границ разного времени — менее 60 м. Относительная точность положения границ возрастает по мере перехода к снимкам Landsat-7, 8 за счёт наличия панхроматического канала с разрешением 15 м.

Наблюдаемое расхождение границ 1977 и 1978 гг. во фронтальной части языка на 15–25 м с более низким положением границы 1978 г. по отношению к границе 1977 г. не отождествляется с наступательной подвижкой ледника, так как это различие находится в пределах возможной ошибки позиционирования и дешифрирования. В целом можно утверждать, что средняя граница фронта ледника в период 1977–1978 гг. определена достаточно точно, что подтверждается небольшим расхождением годовых границ во фронтальной части языка, несмотря на то, что снимки Landsat этого времени имеют худшие характеристики по разрешению по сравнению с более поздними снимками. Кроме того, по выявленным границам установлено, что с 1978 по 1992 г. произошло отступление ледника на расстояние около 380 м с линейной скоростью 26 м/год относительно максимально продвинутых вниз по рельефу частей границ.



**Рис. 3.** Границы ледника Абрамова с 1999 по 2007 г. по снимкам спутников Geoeye-1, Landsat-5, Landsat-7  
**Fig. 3.** Borders of Abramov Glacier since 1999 for 2007 on images of the satellites Geoeye-1, Landsat-5, Landsat-7

С 1992 по 1998 и 1999 гг. отступление ледника продолжилось на расстояние 600 и 680 м соответственно; средняя скорость отступления при этом значительно увеличилась и составляла около 86 м/год.

После этого, как видно на рис. 3, с 1999 до 2007 г. наблюдалось увеличение площади ледника. Наступание ледника происходило с 2001 по 2005 г. С 1999 по 2001 г. и с 2005 по 2007 г. имели место периоды относительной стабилизации границ языка ледника с их незначительным неоднозначным перемещением в диапазоне от 20 до 40 м соответственно. Максимальное линейное продвижение границы языка ледника за 2001–2005 гг. составило около 150–160 м, т.е. средняя скорость наступания была 30–40 м/год. Таким образом, мы достаточно уверенно фиксируем непрерывное по времени, значительное по протяжённости и площади наступание языка ледника Абрамова с 2001 по 2005 г. В данном случае (см. рис. 3) в качестве фонового использован космический снимок спутника Geoeye-1 от 19.07.2007 г. с разрешением около 1,2 м. По этому снимку определено положение границы ледника в 2007 г. Эта граница расходится во фронтальной части на  $\pm 10 \div 15$  м с границей, определённой по снимку Landsat-7 от 20.09.2007. С 2007 по 2013 г., как видно на рис. 2, началось явное отступление языка ледника максимум на 150 м со средней скоростью 21 м/год, определённое по снимкам

Landsat-8. Таким образом, граница 2013 г. практически совпала с границей 1999 г.

По результатам инструментальных измерений с помощью GPS-приборов с точностью позиционирования до 10 м уверенно определяется тенденция отступления ледника с 2012 по 2014 г. с линейной скоростью порядка 20 м/год. По этим же границам линейная скорость отступления с 2007 по 2014 г. составляет около 23 м/год. В это же время наблюдается (см. рис. 3) уменьшение ширины языка ледника вблизи его концевой части на 70–80 м за счёт отступления на запад его восточной границы с постепенным уменьшением этого сокращения в южном направлении.

Использование всех рассмотренных выше источников информации подтвердило положение некоторых границ и дополнило общую картину изменения ледника Абрамова в 1850, 1900, 1936, 1954, 1964, 1967, 1969, 1970, 1972, 1973–1974, 1975, 1980, 1981, 1984, 1986 гг. Анализ положения границ ледника на снимках со спутника Landsat, снимков программы Corona, аэрофотоснимков, топографической карты и опубликованных схем позволило получить более детальную картину характера и скорости изменения границ ледника Абрамова с 1850 по 2013 г. (см. рис. 2). Из приведённых рисунков видно, что граница языка ледника часто имеет извилистую форму, кроме того, язык ледника может в значительной мере изменяться в боковых частях, сужаясь или расширяясь. Поэтому рассмотренные здесь линейные скорости имеют ориентировочный характер, так как определены по отдельным точкам границ ледника, максимально выступающих вниз по рельефу и не отклоняющихся аномально от общего характера конфигурации границы. В этом случае изменение площади языка ледника — более объективный параметр, учитывающий все особенности изменения формы границы.

В соответствии с этим для установленных здесь разновременных границ были вычислены изменения площади и годовая скорость изменения площади для соответствующих замкнутых контуров, полученных с помощью общей линии сравнения, проведённой поперёк той части языка, где разновременные боковые границы имеют минимальное расхождение. Эти результаты вместе с ориентировочной оценкой линейной скорости приведены в табл. 2 и показаны на рис. 4. Подчеркнём, что при небольшом интервале времени между определением границ ледника, в нашем случае около одного

Таблица 2. Скорость изменения площади и длины языка ледника Абрамова

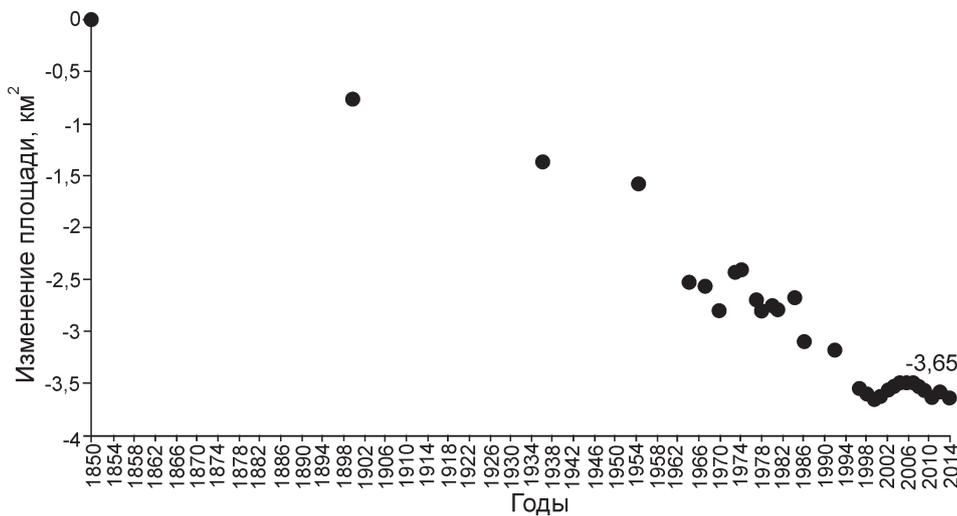
| Годы             | Изменение площади языка ледника, км <sup>2</sup> | Скорость изменения площади языка ледника, км <sup>2</sup> /год |                     | Разница в оценке скорости изменения площади языка ледника Δ, %<br>(Δ = V <sub>s1</sub> - V <sub>s2</sub> ) | Линейная скорость изменения длины языка ледника, м/год |
|------------------|--|--|---------------------|--|--|
|                  |  | V <sub>s1</sub>  | V <sub>s2</sub> [2] |  |  |
| 1850–1900        | -0,762   | -0,015   | -0,014              | 6,7  | -11,2  |
| 1900–1936        | -0,607   | -0,017   | -0,013              | 23,5   | -12,8  |
| 1936–1954        | -0,202   | -0,011   |                     | -  | -13,9  |
| 1954–1964        | -0,953   | -0,095   |                     |  | -34  |
| 1964–1967        | -0,051   | -0,017   | -0,027              | -37  | -103,3   |
| 1967–1970        | -0,215   | -0,072   | -0,077              | -6,5   | -73,3  |
| 1970–1973*       | 0,372  | 0,124  | 0,18                | -31,1  | 116,7  |
| 1972–1973**      | <i>0,109</i>                                     | <i>0,109</i>   |                     | -  | <i>300–350</i>   |
| 1973–1974        | 0,016  | 0,016  | 0,007               | 56   | 40   |
| 1974–1977        | -0,307   | -0,102   |                     | -  | -12,7  |
| 1977–1978        | -0,083   | -0,083   |                     |  | (25)   |
| 1978–1980        | 0,042  | 0,021  |                     |  | 46,5   |
| 1980–1981        | -0,035   | -0,035   |                     |  | -40  |
| 1981–1984        | 0,108  | 0,036  | 0,024               | 33,3   | 20   |
| 1984–1986        | -0,416   | -0,208   |                     | -  | -70  |
| 1986–1992        | -0,077   | -0,0128  |                     |  | -51,7  |
| 1992–1998        | -0,427   | -0,071   |                     |  | -101,7   |
| 1998–1999        | -0,044   | -0,044   |                     |  | -80  |
| 1999–2000        | -0,0037  | -0,0037  |                     |  | -20  |
| <b>2000–2001</b> | <b>0,0317</b>                                    | <b>0,0317</b>  |                     |  | <b>10</b>  |
| <b>2001–2002</b> | <b>0,032</b>                                     | <b>0,032</b>   |                     |  | <b>49</b>  |
| <b>2002–2003</b> | <b>0,058</b>                                     | <b>0,058</b>   |                     | <b>56</b>  |  |
| <b>2003–2004</b> | <b>0,025</b>                                     | <b>0,025</b>   |                     | <b>39</b>  |  |
| <b>2004–2005</b> | <b>0,016</b>                                     | <b>0,016</b>   |                     | <b>27</b>  |  |
| 2005–2006        | -0,0185  | -0,0185  |                     | -  | -20  |
| 2006–2007        | -0,0139  | -0,0139  |                     |  | -20  |
| 2007–2008        | -0,0234  | -0,0234  |                     |  | -60  |
| 2008–2009        | -0,0369  | -0,0369  |                     |  | -30  |
| 2009–2010        | -0,0164  | -0,0164  |                     |  | -25  |
| 2010–2011        | -0,0161  | -0,0161  |                     |  | -30  |
| 2011–2012        | 0,0038   | 0,0038   |                     |  | (-15)  |
| 2012–2013        | -0,0199  | -0,0199  |                     |  | -15  |
| 2013–2014        | -0,0217  | -0,0217  |                     |  | -30  |

\*По схеме [2]. \*\*По схеме [4]. Знак минус означает отступление ледника, плюс – наступание; курсив – относительно быстрое наступание ледника без существенного изменения объёма льда; жирный шрифт – относительно медленное наступательное движение, возможно, более зависимое от увеличения приходной части баланса; в скобках – линейные скорости, имеющие иной знак, чем площадные; прочерк – отсутствие информации.



Рис. 4. Скорость (км<sup>2</sup>/год) и знак изменения площади ледника Абрамова с 1850 по 2014 г.

Fig. 4. Speed (km<sup>2</sup>/year) and direction of change of the Abramov Glacier area over 1850–2014



**Рис. 5.** Изменение площади языка ледника Абрамова с 1850 по 2014 г.

**Fig. 5.** Changes of the area of Abramov Glacier tongue over 1850–2014

года, и соответственно небольших линейных изменениях их положения возможно противоречие между знаком линейной и площадной скорости изменения, так как первая не учитывает разницу в положении сравниваемых границ при их взаимном пересечении. В этом случае более точный результат обеспечивает более длительный временной интервал сравнения границ. В целом при относительно больших временных интервалах знак и величина изменения площади ледника соответствуют изменениям его границ по линейным измерениям.

Факт противоречия в знаке скоростей отражён (см. табл. 2) для линейных скоростей в виде их величин, заключённых в скобки; эту же причину имеет разница в линейной и площадной оценках времени начала подвижки ледника в 2000–2001 гг. В табл. 2 выделено относительно быстрое наступание ледника в 1972, 1973 гг. без существенного изменения объёма льда, которое можно определить как пульсацию [1] непосредственно, вероятно, слабо связанную с увеличением приходной части баланса ледника, и относительно медленное наступательное движение в 2000–2005 гг., возможно, более зависимое от увеличения приходной части баланса. В обоих случаях мы видим предпосылку для наступательного движения в виде увеличения приходной части баланса массы ледника. Так, из работы [3] следует, что в 1972 г. ледник имел положительный баланс массы на фоне предшествующих и последующих годов с отрицательным балансом, а согласно публикации [4], в период с 2000 по 2005 г. два года — 2001 и 2002 — имели минимальный отрицательный баланс относительно предшествующих и последующих годов.

На основе описанных здесь и полученных ранее результатов [1] выполнено сравнение скоростей изменения ледника (см. табл. 2). Максимальное расхождение в оценке скорости — 56%, с превышением нашей оценки почти в два раза, наблюдается для периода 1973–1974 гг. Это объясняется вычислением площади в нашем варианте по более детальной схеме из публикации [2]. Средняя разница в оценке скорости изменения площади ледника, без указанного здесь максимального значения, составляет 21% для положительного и 20,5% для отрицательного значения. При этом границы 1969 и 1972 гг., согласно схеме из публикации [2], не использовались для оценки скорости изменения площади ледника из-за неопределённости положения боковых частей этих границ.

На основе полученных результатов построен кумулятивный график изменения площади языка ледника за весь период наблюдения (рис. 5). Поскольку изменение площади ледника связано с изменением объёма льда, этот график приблизительно отражает в основном отрицательный характер баланса массы ледника за весь период наблюдений; при этом учитывается, что пульсационные подвижки ледника, приводящие только к увеличению его площади, непосредственно не связаны с ростом приходной статьи баланса массы ледника. График (см. рис. 5) показывает, что с 1850 по 1954 г. средняя скорость отступления ледника была около  $0,014 \text{ км}^2/\text{год}$ , а с 2005 по 2014 г. — около  $0,021 \text{ км}^2/\text{год}$ , т.е. в последнем случае она была близка к скорости в начале наблюдений и ниже максимальных величин, которые наблюдались в некоторые предшествующие периоды вре-

мени. Этот факт свидетельствует о том, что скорость деградации ледника не возрастает, несмотря на усиление антропогенного воздействия с середины XIX в. По-видимому, за последующие 100 лет, вплоть до 1950 г., главную роль в изменениях ледника играли естественные факторы.

Судя по схеме из публикации [1], площадь ледника Абрамова в 1850 г. составляла 26,4 км<sup>2</sup>; на топографической карте масштаба 1:25 000 издания 1991 г. в 1986 г. она была равна 23,28 км<sup>2</sup>, а к 2014 г. она составила 22,75 км<sup>2</sup>. Таким образом, площадь ледника Абрамова с 1850 по 2014 г. уменьшилась на 3,65 км<sup>2</sup> (или на 13,8%), т.е. площадь ледника сокращалась по 0,02 км<sup>2</sup>/год. За этот же период длина ледника уменьшилась приблизительно на 2950 м, в среднем по 18 м/год.

### Выводы

Дешифрирование космических снимков, аэрофотоснимков, анализ результатов полевых измерений и опубликованных материалов позволил определить границы ледника Абрамова в разные годы и оценить скорость изменения ледника. Подтверждена тенденция многолетнего отступления ледника, однако на этом фоне отмечены периоды относительной стабилизации фронтальной части языка, а также периоды наступательных подвижек разной длительности и интенсивности. Медленные отступления и наступания ледника обусловлены главным образом изменением балан-

са массы льда, а относительно быстрые его изменения представляют собой пульсации, которые происходят без существенного изменения массы льда, а за счёт его перераспределения в процессе движения из-за изменения физико-механических свойств льда и неравномерности его накопления–расхода на ложе ледника.

Площадь ледника изменяется от +0,12 до –0,1 км<sup>2</sup>/год при средней величине +0,036 и –0,044 км<sup>2</sup>/год, а длина ледника – от +117 (экстремальное 350) до –103 м/год при средней величине +42 (экстремальное 78) и –39 м/год. Обращает на себя внимание близость средних скоростей положительного и отрицательного знака, за исключением аномальных значений. В случае значительных продвижений вперёд (пульсаций) скорость кратковременно может достигать 300–530 м/год, или 0,8–1,45 м/сут. Площадь ледника в 1850 г. была равна 26,4 км<sup>2</sup>, а в 2014 г. она сократилась на 3,65 км<sup>2</sup>, т.е. уменьшилась на 13,8%. Помимо известной подвижки ледника в 1972–1973 гг., мы зафиксировали новую подвижку в 2001–2005 гг. со средним смещением в 155 м.

Скорости изменения площади ледника в начальный и конечный периоды наблюдений были одинаковыми. Это означает, что изменения, вызванные антропогенным воздействием, практически отсутствуют. Подобный факт имеет более общее значение: в Центрально-Азиатском регионе в развитии природы подавляющую роль играют естественные факторы, а антропогенное воздействие пока пренебрежимо мало.

### Литература

1. Глазырин Г.Е., Камнянский Г.М., Перцигер Ф.И. Режим ледника Абрамова. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 228 с.
2. Суслов В.Ф., Акбаров А.А., Емельянов Ю.Н., Ноздрюхин В.К., Кислов Б.В., Иногамова С.И., Арапов П.П., Харитонов Г.Г., Герасимова З.А., Неупокоев В.А., Алиев О. Ледник Абрамова. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 206 с.
3. Перцигер Ф.И. Ледник Абрамова – климат, сток, баланс массы. Ташкент, 1996. 279 с.
4. Barandun M., Huss M., Sold L., Farinotti D., Azisov E., Salzmann N., Usabaliev R., Merkushkin A., Hoelzle M. Re-analysis of seasonal mass balance at Abramov glacier, 1968–2014 // Journ. of Glaciology. 2015. V. 61. № 230. P. 1103–1117. doi: 10.3189/2015 JoC14j239.

### Reference

1. Glazyrin G.E., Kamnaynskiy G.M., Pertsiger F.I. *Rezhim lednika Abramova*. Regime of glacier Abramov. Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat, 1993: 228 p. [In Russian].
2. Suslov V.F., Akbarov A.A., Emelyanov Yu.N., Nozdrukhin V.K., Kislov B.V., Inogamova S.I., Arapov P.P., Kharitonov G.G., Gerasimova Z.A., Neupokoev V.A., Aliev O. *Lednik Abramova*. Abramov Glacier. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980: 206 p. [In Russian].
3. Pertsiger F.I. *Lednik Abramova – klimat, stok, balans massy*. Abramov Glacier – climate, runoff, mass balance. Tashkent, 1996: 279 p. [In Russian].
4. Barandun M., Huss M., Sold L., Farinotti D., Azisov E., Salzmann N., Usabaliev R., Merkushkin A., Hoelzle M. Re-analysis of seasonal mass balance at Abramov glacier, 1968–2014. Journ. of Glaciology. 2015, 61 (230): 1103–1117. doi: 10.3189/2015 JoC14j239.