

Мандычев А., Усубалиев Р., Азисов Э.

Центрально-Азиатского института прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ)

Введение

Целью данного исследования было определение характера и скорости изменения ледника Абрамова, за достаточно длительный период времени, на основе данных, полученных в прошлом и в настоящее время. Ледник Абрамова, местоположение которого в Алайском хребте Кыргызстана показано на рисунке 1, исследовался наиболее детально в период с 1967 по 1994 год на базе метеостанции “Ледник Абрамова”, созданной Среднеазиатским Региональным Научно-Исследовательским Институтом. В последние годы исследование ледника выполнялось эпизодически в рамках различных проектов. Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли (Бишкек, Кыргызстан) в рамках проектов “Вода в Центральной Азии” и “SATCOS” совместно с Центром исследования Земли (Потсдам, Германия), Университетом Фрибурга (Швейцария) осуществляет полевые исследования ледника с 2011 года. В ходе этих работ выполняются измерения, необходимые для определения баланса массы ледника, геодезические измерения для определения границы и морфологических характеристик ледника. Кроме этого, вблизи от бывшей, разрушенной метеостанции, в 2011 году была установлена и работает автоматическая метеостанция. В рамках этих исследований, для получения более полной картины режима изменения ледника было выполнено дешифрирование и анализ космических снимков, аэрофотоснимков, топографических карт, результатов геодезических измерений и опубликованных результатов прошлых исследований.

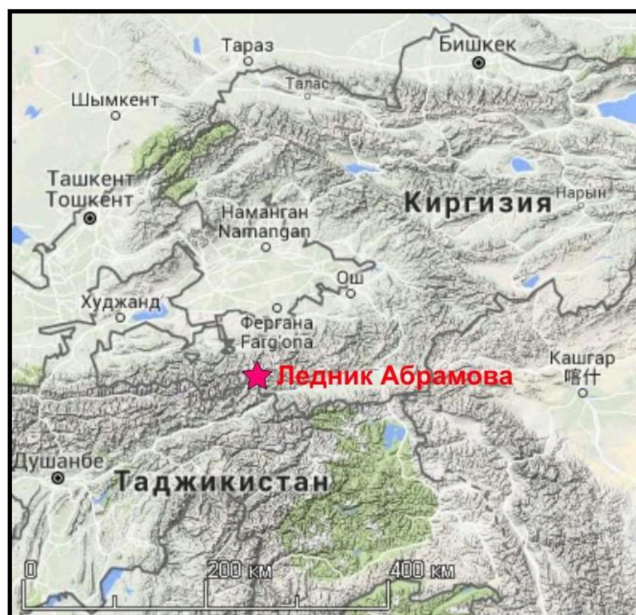


Рис.1

Методика исследования

Методика определения положения в разное время границ ледника Абрамова включала в себя дешифрирование и анализ аэрофотоснимков и космических снимков с различных спутников. Основные характеристики снимков приведены в таблице 1. Кроме результатов дешифрирования снимков, были использованы, определенные в полевых условиях, с помощью приборов GPS, границы языка ледника, а так же топографические карты и опубликованные результаты прошлых измерений положения границы ледника, выполненные разными авторами. Основным методом оценки корректности относительного положения границ ледника, по снимкам и другим данным, полученным в разное время, было

сравнение положения границ стабильных элементов рельефа (границ древних морен, локальных впадин, русел водотоков, гребней и вершин хребтов, скал, глыб), расположенных, в основном, на относительно пологом рельефе, в непосредственной близости к языку ледника. Кроме этого, в позиционировании снимков и схем использован такой критерий, как стабильность во времени боковых границ ледника, расположенных выше конца языка, вне зоны интенсивной боковой абляции.

В процессе дешифрирования границы ледника определялись по снимкам, синтезированным по нескольким спектральным каналам, в программе “ENVI”, по пограничным пикселям, наиболее соответствующим по спектральной характеристике телу ледника и покрывающей его морене и, аналогично, по пикселям ближних инфракрасных каналов (каналы 6,7), соответствующих наиболее охлажденным поверхностям открытого льда и морен, под которыми залегает лед. При дешифрировании снимков, определение положения границы, в значительной мере, основывалось на экспертной оценке, учитывающей особенности строения тела ледника, его структуры, характера и расположения поверхностных морен. Формальный подход в этом случае не эффективен, так как спектральные характеристики поверхности ледника как в видимом, так и инфракрасном диапазоне, особенно в случае наличия морен часто совпадают со спектральными характеристиками влажного грунта вне тела ледника. Основное внимание было сосредоточено на границе языка ледника, расположенного в области абляции, как наиболее изменчивой части ледника. Граница ледника в области аккумуляции, при данной точности изучения, рассматривается как практически неизменная в течение всего периода наблюдений, что в значительной мере обусловлено преобладающей отрицательной температурой, препятствующей сокращению площади ледника, а так же крутыми склонами в области питания ледника и ледоразделами, ограничивающим значительное увеличение площади.

Наибольшее количество космических снимков, использованных для определения границы ледника Абрамова – это снимки различных спутников “Landsat”. Эти снимки, так же как и снимки по программе “Corona” были получены с интернет сервиса “Earth Explorer”, USGS. Снимки спутников “Landsat”, как видно из таблицы 1 имеют разрешение, в основном, 15-30 м/п и реже 60 м/п, с уровнем обработки “L1T”. Этот уровень обеспечивает определенную точность геопозиционирования на основе использования наземных контрольных точек и цифровой модели поверхности Земли. Эта точность представлена круговой ошибкой геопозиционирования (RMSE), при соответствующей доверительной вероятности (ДВ). Эта ошибка для снимков спутников «Ландсат»(L) соответственно составляет: «L 1-5 MSS» <60м при 88% ДВ, «L 4-5» <30м при 99,5% ДВ, «L 7» <30м при 99,7% ДВ, «L 8» <30м 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 сравниваемых опорном снимке и другом снимке и другом виде данных, геопривязанных по опорному снимку. Опорными снимками, в нашем случае, являлись снимок спутника “GeoEye1”, имеющий максимальное разрешение и исходную геопривязку и снимки спутников “Landsat”. При ко-регистрации 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 счет угла съемки и наклона поверхности рельефа. Минимальный временной интервал, используемый для оценки скорости изменения ледника, равен, приблизительно, одному году. Это обусловлено тем, что значительная часть информации по изменению ледника, используемая в данной работе, не имеет более детальной временной характеристики. При этом, большинство используемых для анализа космических снимков получены в период с июля по октябрь. То есть, максимальная ошибка интервала времени между сравниваемыми снимками равна ± 4 месяца.

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

Дата съемки	Спутник, самолет	Сенсор	Разрешение снимков (метр/пиксел)	Уровень обработки, проекция, система координат
19/10/1964	“CORONA” KH-4A	фотокамера	3	Геопривязка, UTM, WGS 84
22/11/1973, 20/08/1980	“CORONA” KH-9	фотокамера	6	Геопривязка, UTM, WGS 84
12/07/1975, 04/08/1981, 18/07/1986	Аэрофотоснимок	фотокамера	1,8;1; 1,6	Геопривязка, UTM, WGS 84
28/09/1977, 14/07/1978	“Landsat – 2”	MSS	60(57x79)	L1T
20/10/1992, 02/08/1998	“Landsat – 5”	TM	30	L1T?
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	L1T
19/07/2007	“Geo Eye 1”	Оптико - электронный	1,2	Орторектификация, UTM,WGS 84
20/09/2007, 05/08/2008, 08/08/2009,	“Landsat – 7”	ETM	15-30	L1T
04/09/2010, 07/09/2011	“Landsat – 5”	TM	30	L1T
03/10/2012	“Landsat – 7”	ETM	15-30	L1T
12/09/2013, 27/06/2014	“Landsat – 8”	OLI_TIRS	15-30	L1T

Результаты исследований и обсуждение

В результате дешифрирования космических снимков спутников “Landsat” с помощью программы “ENVI 4.7” и последующей обработки в программе “MapInfo 10” были получены границы ледника Абрамова в разные годы. Общая картина позиции границ ледника Абрамова за период с 1977 по 2013 год по снимкам спутника “Landsat 2, 5,7,8” показана на рисунке 2. Как видно на этом рисунке, наиболее стабильными являются боковые восточная и западная границы, по ним общий диапазон расхождения выявленных границ составляет, в основном, около 60 метров, а ошибки определения отдельных границ разного времени – менее 60 метров. Относительная точность положения границ возрастает по мере перехода к снимкам “Landsat – 7,8”, за счет наличия панхроматического канала с разрешением 15 м/п.

Границы ледника Абрамова в 1977 и 1978 году, получены по космическим снимкам спутника “Landsat – 2” с разрешением 60 м/п. В целом, из-за относительно низкого разрешения рассматриваемых снимков и наличия на оригинале снимка 1977 года дефектов в виде полос, положение границ определено с ошибкой порядка 60 метров. Расхождение границ опорных элементов рельефа, расположенных вблизи ледника, по этим снимкам, так же составляет около 60 метров.

Границы ледника с 1992 по 2014 год получены по космическим снимкам спутников “Landsat – 5,7,8”, сенсорами “TM”, “ETM”, “OLI_TIRS” с разрешением 30 м/п, по семи спектральным каналам, включая термальный (band 6) и с разрешением 15 м/п по панхроматическому каналу (band 8). В этом случае, так же были получены синтезированные снимки, по которым, при различных комбинациях каналов были определены границы ледника.

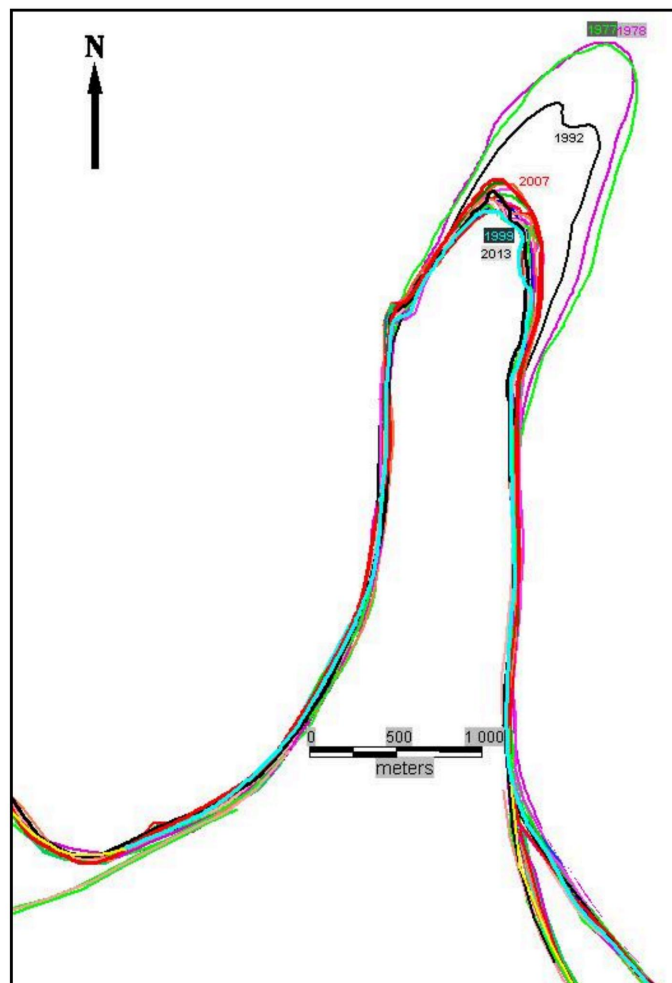


Рис.2 Границы ледника Абрамова с 1977 по 2013 год по снимкам спутников “Landsat 2, 5,7,8”

Наблюдаемое на рисунке 2 расхождение границ 1977, 1978 годов во фронтальной части языка на 15-25 метров с более низким положением границы 1978 года по отношению к границе 1977 года не отождествляется с наступательным движением 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 годов 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 этого, на рисунке 2 видно, что с 1978 года по 1992 год происходило отступление ледника на расстояние около 380 м с линейной скоростью 26 м/год относительно максимально продвинутых вниз по рельефу частей границ. С 1992 по 1998 и 1999 года, отступление ледника продолжалось на расстояния 600 и 680 метров соответственно, при этом средняя скорость отступления значительно увеличилась и составляла около 86 м/год. После этого, как видно на рисунке 3, с 1999 до 2001 года наблюдалась относительная стабилизация границы языка, проявившаяся в замедлении отступления и в тесной группировке границ этого периода времени во фронтальной части, в диапазоне около 20 м. В этом случае, точность определения положения отдельных годовых границ при дешифрирования недостаточна для уверенного определения относительного направления их движения и величины смещения. Поэтому линейные скорости определены приблизительно: с 1999 по 2000 год - отступление со скоростью 20 м/год и с 2000 по 2001 год, возможное, наступание со скоростью 10 м/год.

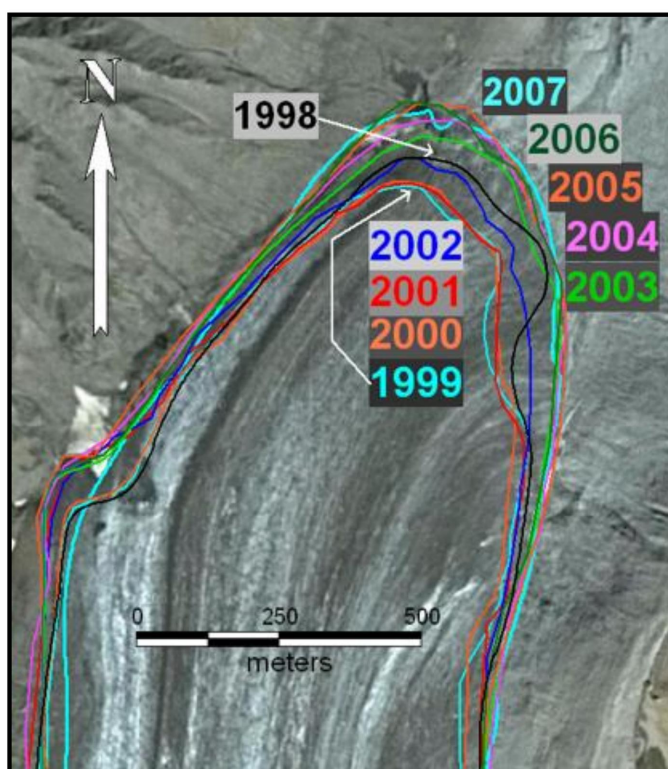


Рис.3 Границы ледника Абрамова с 1998 по 2007 год по снимкам спутников “Geo Eye 1”, “Landsat 5, 7”

С 2001 года началось явное наступание ледника с увеличением его площади (см. рис.3), которое продолжалось до 2005 года. Максимальное линейное продвижение границы языка ледника составило за 2001- 2005 годы около 150 - 160 м., то есть средняя скорость наступления была порядка 30 - 40 м/год. Таким образом, нами, достаточно уверенно зафиксировано непрерывное по времени, значительное по протяженности и площади наступание языка ледника Абрамова в период 2001-2005 года. В данном случае, на рисунке 3 в качестве фонового использован космический снимок спутника “Geo Eye 1” от 19/07/2007 г.,

с сервиса “Google Earth”, имеющий разрешение около 1,2 м/п. По этому снимку определено положение границы ледника в 2007 году. Эта граница расходитя во фронтальной части на $\pm 10 - 15$ м с границей, определенной по снимку “Landsat 7” от 20/09/2007. В последующем, с 2005 по 2007 год наблюдалась относительная стабилизация границы ледника с тенденцией к отступанию по отдельным ее фрагментам в диапазоне до 40 метров. Начиная с 2007 по 2011 год, как видно на рисунке 4, началось явное отступление языка ледника, максимум, на 160 метров, со средней скоростью 40 м/год, определенное по снимкам “Landsat-8”. Изменение границы языка ледника с 2011 по 2014 год по снимку “Landsat-8” показано на рисунке 5. Как видно на этом рисунке, изменение положения отдельных годовых границ за этот период незначительно и находится в пределах максимального разрешения снимков 15 м/п. По этой причине затруднено однозначное определение направления изменения отдельных границ, в частности, наступательный характер положения границы 2012 года во фронтальной части, относительно границы 2011 года требует дополнительного подтверждения. Однако, по рисунку 6 уверенно определяется тенденция отступления с 2012 по 2014 год с линейной скоростью порядка 20 м/год, по границам, положение которых получено инструментальными измерениями с помощью приборов GPS, с точностью позиционирования до 10 м. Здесь так же наблюдается фрагмент языка частично отчленившийся по западной границе ледника от основного тела, сохраняющийся от таяния за счет наличия морены. По этим же границам, линейная скорость отступления с 2007 по 2014 год – около 23 м/год. За этот же период, как видно на рисунках 5, 6, наблюдается уменьшение ширины языка ледника вблизи его концевой части за счет отступления на запад его восточной границы на 70-80 м, с постепенным уменьшением этого сокращения ширины в южном направлении.

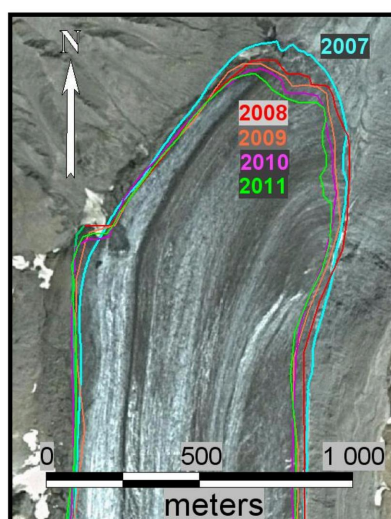


Рис.4 Границы ледника Абрамова по снимкам спутников “Geo Eye 1”, “Landsat 8” с 2007 по 2011 год

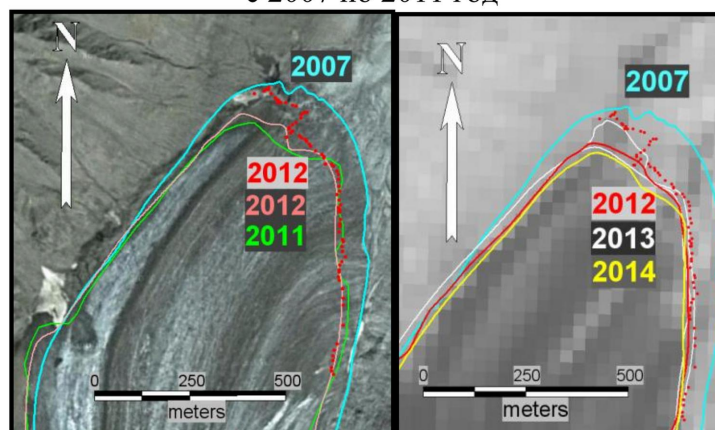


Рис.5 Границы ледника Абрамова с 2007 по 2014 год по снимкам спутников “Geo Eye 1”, “Landsat 8”, в том числе в инфракрасном диапазоне (2014 год) и по полевым измерениям приборами GPS с точностью до 10 м (пунктирные линии).

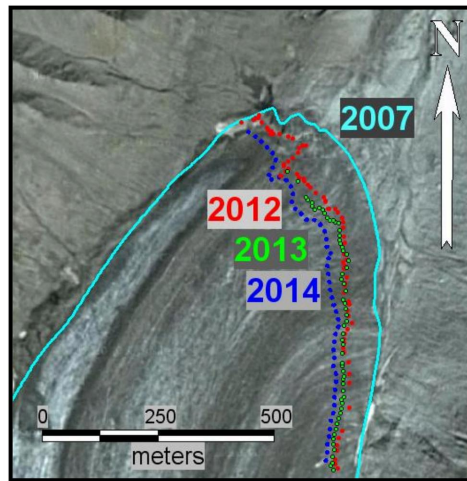


Рис. 6 Границы ледника Абрамова с 2007 по 2014 год по снимку спутника “Geo Eye 1” и по полевым измерениям приборами GPS с точностью до 10 м (пунктирные линии).

С целью детализации границ ледника Абрамова разного времени, кроме снимков спутника “Landsat” использовались так же космические снимки по программе “Corona”, полученные спутниками США с августа 1960 г. по май 1972 г. и с марта 1973 г. по октябрь 1980 г.. Они так же получены с интернет-сервиса “Earth Explorer”, USGS, в разделе: Declass 1(1996), 2(2002). Характеристики этих снимков приведены в таблице 1. Геопривязка этих снимков выполнялась по снимку спутника “Geo Eye 1” от 19/07/2007 г. с сервиса “Google Earth” по характерным наземным опорным точкам, расположенным вблизи языка ледника Абрамова. Дешифрирование границ ледника по этим снимкам позволило дополнить картину их изменения в те годы, по которым отсутствуют снимки спутника “Landsat”. Границы ледника по этим снимкам показаны на рисунке 7. Коррекция расположения границы ледника, полученной по снимку “Corona”, включала ее трансформацию в виде горизонтального смещения и поворота векторного слоя, содержащего границу ледника. Критериями корректности трансформации являлись границы стабильных форм рельефа и боковых границ ледника. В этом случае ошибка дешифрирования границ за счет неортогональности снимка, деформации фотопленки, неточности геопозиционирования не превышает 50-100 метров. В результате были получены границы ледника в 1964, 1973 и 1980 годах. В этом случае, интересным фактом, показанным на рисунке 8, является обнаружение на снимке “Corona” от 1964 года, участка разрушения, по – видимому, временным водотоком, возможно селевым (синяя стрелка), западной части языка ледника (красный контур), протяженностью около 440 м. и шириной до 100 м. Этот феномен необходимо учитывать при анализе скорости изменения ледников и истории их развития.

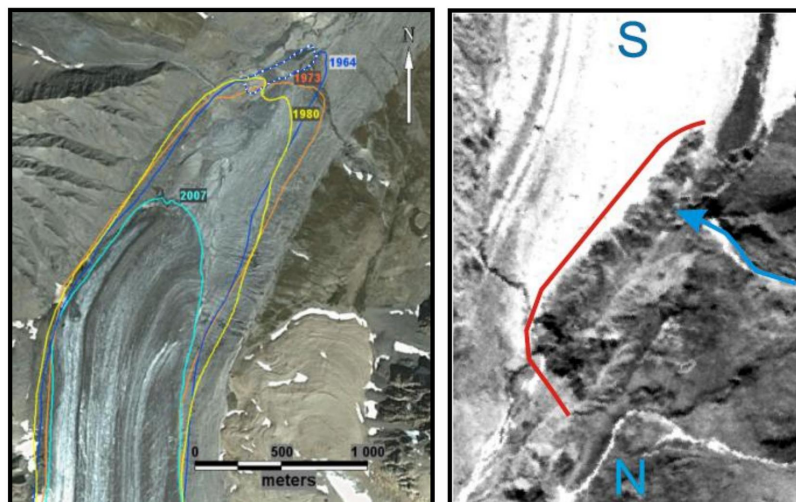


Рис.7 (слева), Рис.8 (справа) Границы ледника Абрамова по снимкам спутника программы “Corona” в 1964, 1973, 1980 годах. Пунктиром на рисунке 7 выделена граница разрушенного фрагмента языка.

В дополнение к этому, положение языка ледника Абрамова в 1981 году определено по аэрофотоснимку от 04/08/1981 года (таблица 1). Его геопривязка выполнена так же, как вышеупомянутых снимков “Corona”. Корректность привязки и относительная линейная ошибка определены по характерным стабильным элементам рельефа, последняя оценивается в тех же пределах, что и для снимков “Corona”. Контуры ледника по снимкам “Corona” и упомянутому аэрофотоснимку на фоне снимка ледника спутника “Geo Eye 1” от 2007 года, показаны на рисунке 9. По результатам сопоставления положения границ 1980 и 1981 года, они имеют расхождение во фронтальной части языка, в северном направлении, порядка 55 метров и последовательность характерную для режима наступления, с более низким положением границы 1981 года, относительно границы 1980 года. Эта ситуация не интерпретируется, как наступание, так как возможна ошибка определения границ. Однако, учитывая конформность этих границ и разные источники получения, можно достаточно уверенно утверждать, что средняя позиция границ ледника в период 1980-1981 годов определена объективно с ошибкой не более 60 м. На этом же рисунке показаны границы 1973, 1977, 1978 годов, полученные по снимкам спутников “Corona”, “Landsat-2”. Их положение свидетельствует о том, что они совместно с границами 1980-1981 годов образуют достаточно компактную группу в общем диапазоне смещений до 100 м и отражают относительную стабилизацию многолетнего движения ледника с конца 1973 по 1981 год.

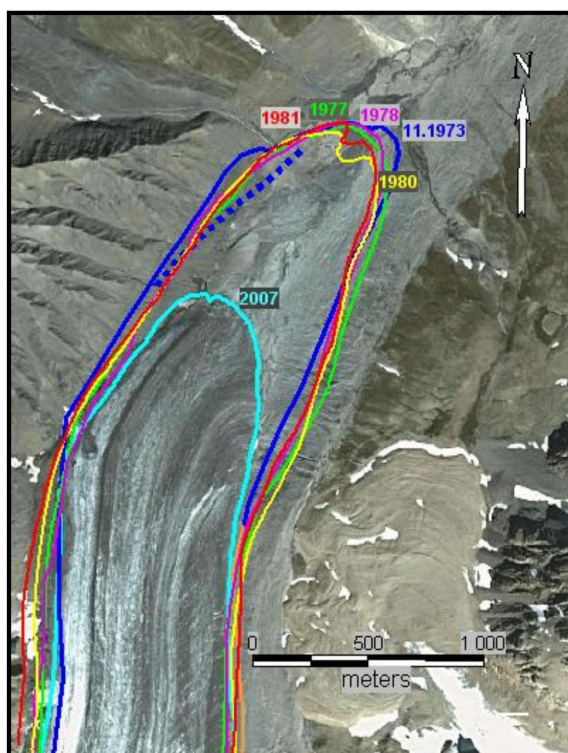


Рис.9

Наряду с космическими снимками и аэрофотоснимками, для ретроспективного анализа изменения границы ледника были использованы топографические карты. Так, для определения границы ледника в 1986 году, использована топографическая карта масштаба 1:25000 района ледника Абрамова, построенная на основе стереотопографической съемки 1986 года и изданная в 1991 году Кыргызским аэрогеодезическим предприятием Госгеодезии СССР. Эта карта в оригинале имеет геопривязку в местной системе координат, поэтому она была геопривязана в системе координат (СК) Пулково 42 по топографической карте масштаба 1:100000, а затем трансформирована в СК WGS 84. В этом случае, коррекция относительного расположения границы ледника в 1986 году выполнена так же, как для космических снимков по границам стабильных элементов рельефа. Кроме этого, корректность границы ледника по карте, подтверждена границей, полученной при дешифрировании аэрофотоснимка от 18/07/1986 года. Положение этой границы, наряду с ранее полученными границами, показано на рисунке 10.

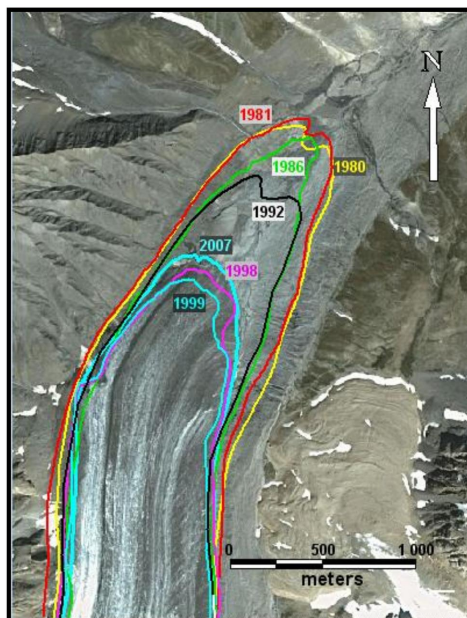


Рис.10

В этом случае следует отметить, что граница 1986 года во фронтальной части тяготеет к показанной выше группе границ 1973-1981 годов (рис.9,10), фиксирующих период стабилизации или замедления изменения ледника, это позволяет предположить, что этот период продолжался, по крайней мере, до 1986 года. В течение периода с конца 1973 года до 1986 года, фронтальная часть границы ледника располагались и перемещались вдоль оси ледника в интервале 80-90 метров. Особенностью формы границы 1986 года является ее клиновидный характер. Эта особенность формы языка наблюдается на фоне дугообразной формы границ в другие годы, как это видно на рисунках 9,10. После 1986 года процесс деградации ледника продолжился, но в 1992 году форма языка ледника приобрела дугообразную форму, которая сохраняется (по имеющимся данным) до настоящего времени. Как будет показано далее, клиновидная форма языка ледника наблюдалась и в другие годы функционирования ледника. Таким образом, за счет привлечения к анализу положения границ ледника, помимо снимков спутника “Landsat”, так же аэрофотоснимков, топографической карты и снимков программы “Согон”, удалось получить более детальную картину изменения границ ледника во времени.

С целью получения более полной картины развития ледника Абрамова и интегрирования ранее полученных знаний в систему современных цифровых данных, использованы результаты исследований этого ледника, приведенные в публикации Глазырина Г. и других [1]. В частности, опубликованный вариант схемы границ ледника с 1850 по 1984 годы. Эта схема была масштабирована и геопривязана, с точностью не хуже 50-100 метров, по приведенным в ней данным о расстояниях между разновременными границами, по характерным стабильным контурам рельефа, руслу реки Кок-Су и по границам ледника, полученным в результате дешифрирования космических снимков. Эта схема показана на рисунке 11, на фоне уже упоминавшегося ранее снимка спутника “Geo Eye 1” от 2007 года. Корректность пропорций схемы и геопривязки видна по границе 1850 года, которая хорошо вписывается в явно наблюдаемую на космическом снимке границу следа эрозионного воздействия льда на западный и восточный борта долины, по соответствию характерного поворота ледника по западной границе на северо-восток, хорошим совпадением конфигурации русла реки Кок-Су на схеме и на космическом снимке и совпадением обобщенной границы 1973-74 годов на схеме, с границей 1973 года, полученной нами по снимку “Corona” (рис.7, 11). Таким образом, на рисунке 11 отображены имеющиеся на схеме из публикации Глазырина Г. и др., границы ледника Абрамова в 1850, 1900, 1936, 1954, 1967, 1970, 1973-74, 1984 годах. Положение границы 1954 года на схеме, определено на основе сообщения в публикации [1] о расстоянии в 650 м между границами 1954 и 1967 годов, полученном при дешифрировании аэрофотоснимков. В целом, как видно на рисунке 11,

получено достаточно точное соответствие границ ледника по схеме и космическим снимкам, особенно во фронтальной части языка ледника и несколько худшее по боковым границам, особенно, по восточной. По нашей оценке, расхождение восточных границ по схеме, относительно определенных нами, не отражает их реального положения и требует коррекции путем сдвига в западном направлении в позицию западных границ ледника, полученных при дешифрировании космических снимков. Необходимость такой коррекции хорошо видна на рисунке 10 по положению восточных частей границ 1980, 1981, 1986 года.

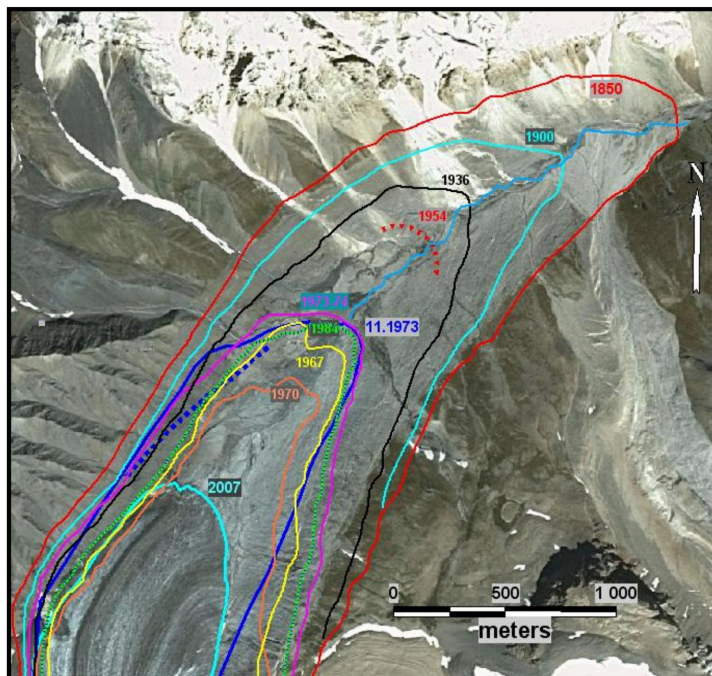


Рис. 11

С целью дальнейшей детализации картины изменения позиции языка ледника в период с 1969 по 1974 год, включающей и известную по публикации [1] значительную наступательную подвижку (пульсацию) ледника в 1972-1973 годах, была использована детальная схема Суслова В.Ф. и др. [3]. Эта схема так же была масштабирована и геопривязана по границам ледника, которые практически совпадают, с полученными по космическому снимку “Corona” от 22/11/1973 года и по аэрофотоснимку от 12/07/1975 года. На рисунке 12 показано положение границ ледника с 1969 по 1975 год по Суслову В.Ф. и др., на фоне снимка “Corona” и полученной при нашем дешифрировании этого снимка границы ледника в 1973 году. В этом случае, обращает на себя внимание 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 учета части ледника, покрытой мореной, которая на рис. 9,11,12 отделена пунктирной линией и отличается более темным цветом. С учетом границ, показанных на схеме Суслова В.Ф. и др., а так же границ ледника по схеме Глазырина Г. и др., а так же границы 1964 года, полученной нами по снимку “Corona”, было получено расположение границ в период с 1964 по 1972 годы (рис.13), предшествовавшее пульсационной подвижке ледника. Следует отметить, что в процессе геопозиционирования схемы Суслова В.Ф. и др., положение границ ледника 1969 и 1972 года, отображенное на ней, было скорректировано путем сдвига в западном направлении, в соответствии с границей 1970 года на схеме Глазырина Г. и др. [1]. Результат этой коррекции, показанный на рисунке 13, обеспечил положение границ схемы Суслова В.Ф. и др., соответствующее наиболее вероятному последовательному унаследованному изменению в плане границы ледника в процессе его изменения.

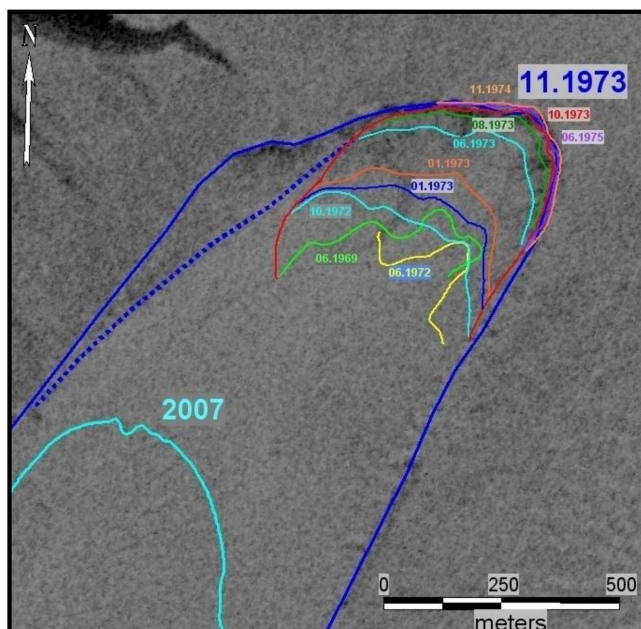


Рис. 12

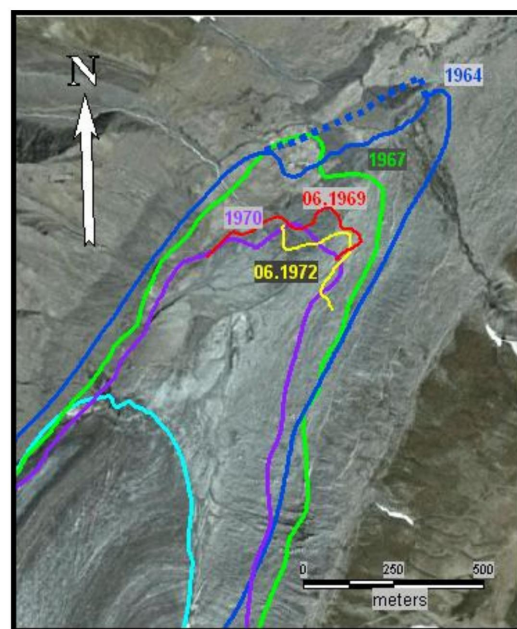


Рис13

В период с 1964 по 1972 год, как следует из публикации [1], с 1967 по 1970 год происходило быстрое отступление ледника на 290 метров, со средней скоростью около 97 м/год. По нашему варианту привязки схемы Глазырина Г. и др., это расстояние составляет 250 м, а скорость соответственно 83 м/год, то есть разница по расстоянию и скорости около 14 %, что соответствует возможной линейной ошибке позиционирования в пределах 50 метров. А в 1969-1972 годах, по схеме Суслова В.Ф. и др., ледник претерпел значительное сужение языка, который приобрел клинообразную форму, по сравнению с формой языка в 1967 году. В этом случае наблюдаются явные признаки усиленной боковой абляции, проявившейся в отступлении на запад восточной границы приблизительно на 100 метров. Из детальной схемы Суслова В.Ф. и др. (рис.12, 13), так же следует, что в период с 1969-1972 год имела место стабилизация концевой части границы языка ледника, при которой происходили разнонаправленные ее изменения в диапазоне около 80 м. Начиная с октября 1972 года, как это видно на рисунке 12, язык ледника приобретает дугообразную форму, вероятно, соответствующую начавшемуся наступательному движению. То есть, основная подвижка ледника началась в конце 1972 года и затем продолжалась до конца 1973 года, достигнув величины порядка 300-350 м, при средней скорости движения льда около 300-350 м/год. По результатам непосредственных наблюдений [4], как это видно на рисунке 14, в этот период максимальная скорость подвижки достигала 530 м/год (1,45 м/сут).

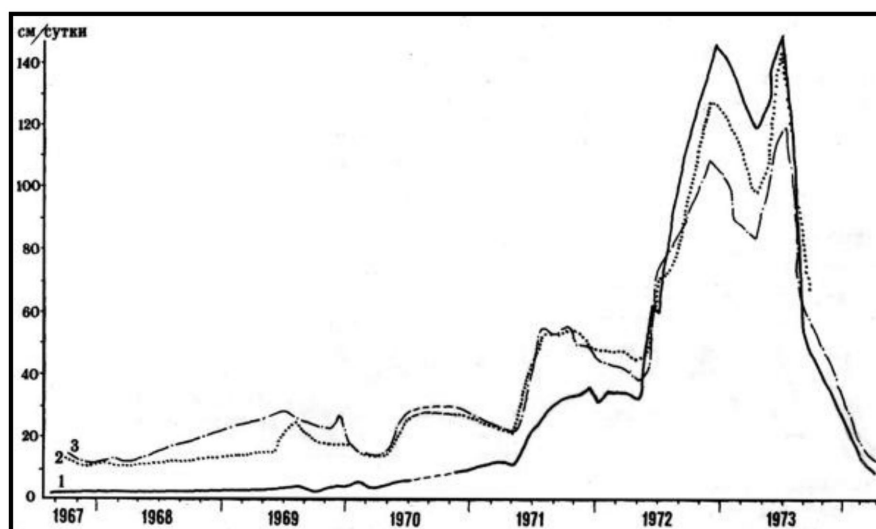


Рис.14 Изменение линейной скорости движения льда ледника Абрамова, в разных его частях (1- конец, 2-середина, 3- начало языка) в период с 1967 по 1974 год.

Затем, с 1973 по 1974 год скорость наступания значительно снижается до 40 м/год. В этой последней позиции, как следует их схемы на рисунке 12, граница оставалась до июня – июля 1975 года. Таким образом, относительно быстрая подвижка ледника продолжалась в течение года и сменилась достаточно длительной относительной стабилизацией границы языка ледника. В данном случае, как это видно на рисунках 9, 10, 11, примечательным является сравнительно длительный период стабилизации границы ледника с 1974 до 1986 года, то есть на протяжении 12 лет. На основе схемы Глазырина Г. и др. и наших дополнений разновозрастных границ, можно утверждать, что в пределах этого интервала времени, в общем диапазоне около 50-80 м происходили разнонаправленные изменения границы ледника: с 1975 по 1978 в виде отступления (-13 м/год), с 1978 по 1980 возможно наступание (+47 м/год), 1980-1981 – отступление (-40 м/год), 1981-1984 – наступание (+20 м/год) и 1984-1986 – отступление (-70 м/год). В последующем, как видно на рисунке 10 и было показано на рисунке 2, до 1999 года наблюдается, по имеющимся данным, однозначная деградация ледника. В целом, с 1984 по 2001 год происходит отступление ледника, приблизительно на 1130 м, со средней скоростью 70,6 м/год. Последующее изменение ледника до 2014 года описано выше.

Таким образом, за счет дополнения результатов дешифрирования снимков “Landsat” данными по другим спутникам, картам и опубликованным схемам была получена более детальная картина характера и скорости изменения ледника Абрамова. Общая картина изменения границ языка ледника Абрамова с 1850 по 2013 год показана на рисунке 15.

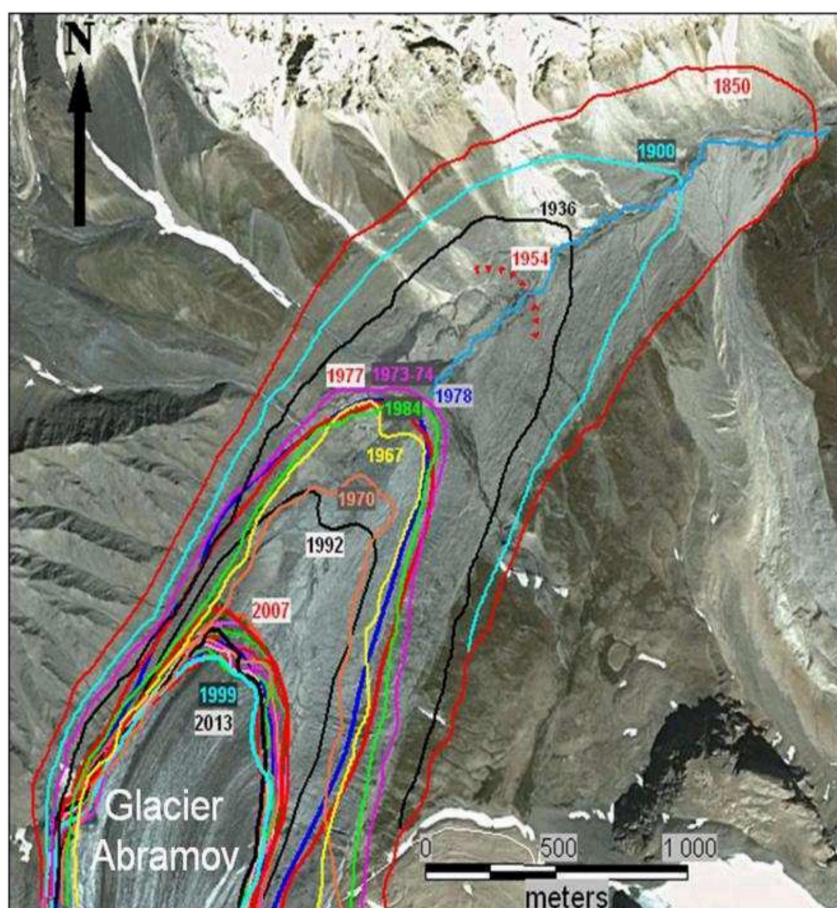


Рис.15

Следует отметить, что рассмотренные выше 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. При этом, как видно из приведенных рисунков, граница часто имеет извилистую форму и, кроме этого, язык ледника может в значительной мере изменяться в боковых частях, сужаясь или расширяясь. По этой причине, изменение

площади языка ледника является более объективным и точным параметром, учитывающим все особенности изменения формы границы. В соответствии с этим, для определенных выше разновременных границ, были вычислены изменения площади и скорость изменения площади в год для соответствующих замкнутых контуров, полученных с помощью общей линии сравнения, проведенной поперек той части языка, где разновременные боковые границы имеют минимальное расхождение. Эти результаты, наряду с ориентировочной оценкой линейной скорости, показаны в таблице 2 и на рисунке 16. Следует подчеркнуть, что при небольшом интервале времени между определением границ ледника, в нашем случае, около одного 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. Факт противоречия в знаке скоростей отражен в таблице 2 для линейных скоростей в виде их величин, заключенных в скобки, эту же причину имеет разница в линейной и площадной оценке времени начала наступательной подвижки ледника в 2000 -2001 году. В этой же таблице красным цветом (1972-1973 годы) выделена относительно быстрая наступательная подвижка ледника без существенного изменения объема льда, которую можно определить, как пульсацию, вероятно, непосредственно слабо связанную с увеличением приходной части баланса ледника и синим цветом (2000-2005 годы) относительно медленное наступательное движение, возможно более зависящее от увеличения приходной части баланса. Необходимо подчеркнуть, что в обеих этих случаях имела место предпосылка для наступательного движения в виде увеличения приходной части баланса массы ледника. Так, из публикации [2], следует, что в 1972 году ледник имел положительный баланс массы на фоне предшествующих и последующих годов с отрицательным балансом (Рис.23). А из публикации [5] следует, что в период с 2000 по 2005 год, два года 2001 и 2002 имели минимальный отрицательный баланс, относительно предшествующих и последующих годов.

Таблица 2

Годы	Изменение площади ΔS (км ²)	Скорость изменения площади $Vs1$ (км ² /год) (Мандычев А.)	Скорость изменения площади $Vs2$ (км ² /год) (Глазырин Г. и др., 1993)	$\Delta \%$ ($\Delta = Vs1 - Vs2$)	Линейная скорость V_L (м/год)
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	0,109	0,109			300 - 350
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
2000-2001	0.0317	0.0317			10
2001-2002	0.032	0.032			49
2002-2003	0.058	0.058			56
2003-2004	0.025	0.025			39
2004-2005	0.016	0.016			27
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 Глазырина Г. и других. **) по схеме Суслова В.Ф. и других.

(-) отступление, (+) наступание ледника.



Рис.16

В таблице 2 приводится сравнение скоростей изменения ледника, полученных ранее (Глазырин Г. и др.,1993), [1] и полученных нами в данной работе. Как видно, максимальное расхождение в оценке скорости - 56 % , с превышением нашей оценки почти в 2 раза, наблюдается для периода 1973-1974 года. Это объясняется вычислением площади в нашем варианте по более детальной схеме Суслова В.Ф.. Средняя разница в оценке скорости изменения площади ледника, без указанного выше экстремального значения составляет 21% для положительного и 20,5 % для отрицательного значения. Следует отметить, что границы 1969 и 1972 года из схемы Суслова В.Ф. не использовались для оценки скорости изменения площади ледника из-за неопределенности положения боковых границ языка.

В целом, при относительно больших временных интервалах, знак и величина изменения площади ледника, приведенные в таблице 2, соответствуют выше рассмотренным изменениям его границ по линейным измерениям. Но, измерение площади позволяют более

полно учесть все особенности изменения формы ледника в плане, в отличие от измерения длины. В частности, примером такого случая, является анализ изменения ледника в период 1984-1986 года. Большая скорость сокращения площади ледника - $0,21 \text{ км}^2/\text{год}$ в период с 1984 по 1986 год, по-видимому связана с тем, что к 1986 году произошло значительное боковое таяние ледника, так, что при небольшом сокращении в длину, его ширина в языковой части значительно уменьшилась. Эта особенность отразилась, как уже ранее упоминалось, в образовании суженной клиновидной формы языка ледника (рис.10). В случае, исключения из расчета границы 1986 года, скорость изменения площади ледника с 1984 по 1992 год составляет $0,06 \text{ км}^2/\text{год}$, то есть не является аномально высокой. Следует отметить, что феномен сужения тела ледника в языковой части не является исключительным, проявившимся только в 1986 году. Аналогичное явление, когда форма языка имела суженный вид, наблюдалось в 1964 году (рис.7), а так же, по схеме Суслова В.Ф. и др. (рис.12, 13) в 1969 и 1972 годах, по схеме Глазырина Г. и др. (рис.11, 13), в 1970 году. В последнем случае, как видно из таблицы 3, значительное изменение площади ($0,37 \text{ км}^2$) в период с 1970 по 1973 год связано с суженной формой языка ледника в 1970 году, так что основное изменение площади около $0,26 \text{ км}^2$ приходится на период 1970 - 1972 год. Таким образом, в отличие от дугообразной формы, заполняющей всю ширину долины, реже наблюдается суженная или клинообразная форма языка ледника, заполняющая только часть долины по ширине. Такая ситуация возможна, в случае преобладания боковой абляции над продольной, то есть, вероятно, при условии временного замедления, прекращения роста или уменьшения среднего годового вертикального градиента температуры воздуха в районе ледника. Как видно на рисунке 23, по данным метеостанции “Ледник Абрамова”, такие условия периодически возникали в районе ледника Абрамова в периоды: 1971-1972, 1973-1974, 1977-1986 год.

На основе данных по изменению площади ледника из таблицы 2, построен кумулятивный график изменения площади ледника за весь период наблюдения, представленный на рисунке 17. Так как изменение площади ледника связано с изменением объема льда, этот график, приблизительно, отражает, в основном, отрицательный характер баланса массы ледника за весь период наблюдений с учетом того, что пульсационные подвижки ледника, приводящие только к увеличению его площади, непосредственно не связаны с увеличением приходной статьи баланса массы ледника.

График на рисунке 17 свидетельствует о том, что с 1850 по 1954 год средняя скорость отступления ледника была порядка $0,014 \text{ км}^2/\text{год}$. С 1954 года по 1970 скорость отступления значительно увеличилась до $0,061 \text{ км}^2/\text{год}$, а в период 1970-1974 г.г. происходило увеличение площади со средней скоростью порядка $0,07 \text{ км}^2/\text{год}$ и аномально, порядка $0,11 \text{ км}^2/\text{год}$, в период с 1972 по 1973 год (по схеме Суслова В.Ф. и др.), после чего, до 1978 года площадь сокращалась со средней скоростью $0,09 \text{ км}^2/\text{год}$. В 1978-1980 году площадь увеличивалась ($0,021 \text{ км}^2/\text{год}$), в 1980-1981 году уменьшилась ($0,035 \text{ км}^2/\text{год}$), а в 1981-1984 году снова увеличивалась ($0,036 \text{ км}^2/\text{год}$). С 1984 по 2000 год происходило сокращение площади со средней скоростью около $0,068 \text{ км}^2/\text{год}$. Начиная с 2000 года (с 2001г. по вышеприведенным линейным оценкам) до 2005 года происходило увеличение площади ледника со скоростью $0,033 \text{ км}^2/\text{год}$ и затем до 2014 года происходит ее сокращение со скоростью около $0,021 \text{ км}^2/\text{год}$, близкой к скорости в период начала наблюдений и ниже тех величин которые наблюдались в некоторые предшествующие периоды времени. В этом случае, обращает на себя внимание близость скорости изменения площади ледника в начальный период и в конечный период наблюдений, то есть не наблюдается однозначной тенденции увеличения скорости деградации, которая могла быть за счет постоянного усиления антропогенного воздействия. Учитывая, тот факт, что процесс деградации ледника Абрамова начался ранее 1850 года и, что техногенное воздействие на атмосферу, в это время, в регионе Центральной Азии было минимальным, по крайней мере, в течение 100 лет до 1950 года, можно предполагать значительную роль естественных факторов в изменении ледника. А это означает, что возможно наличие, как минимум, 164 - летнего полупериода фазы деградации ледника в его неравномерных по величине периодах циклических изменений в виде поочередной смены фазы регресса - фазой прогресса.

В целом, площадь ледника Абрамова за период с 1850 по 2014 год уменьшилась на

3,65 км² со средней скоростью около 0.02 км²/год. За этот же отрезок времени длина ледника уменьшилась приблизительно на 2950 м. со средней скоростью порядка 18 м/год. На основании вышеупомянутой топографической карты 1991 года издания, масштаба 1:25000 (площадь ледника в 1986 году определена в 23,28 км²) и схемы из публикации [1], общая площадь ледника в 1850 году была около 26,4 км², а в 2014 году она сократилась на 3,65 км² и составляла 22,75 км², то есть, уменьшилась на 13.8%.

Таким образом, на протяжении исследуемого периода с 1850 по 2014 год, в изменении длины, площади и соответственно объема ледника Абрамова наблюдается неравномерность как по величине, так и по знаку при преобладании общей деградации.

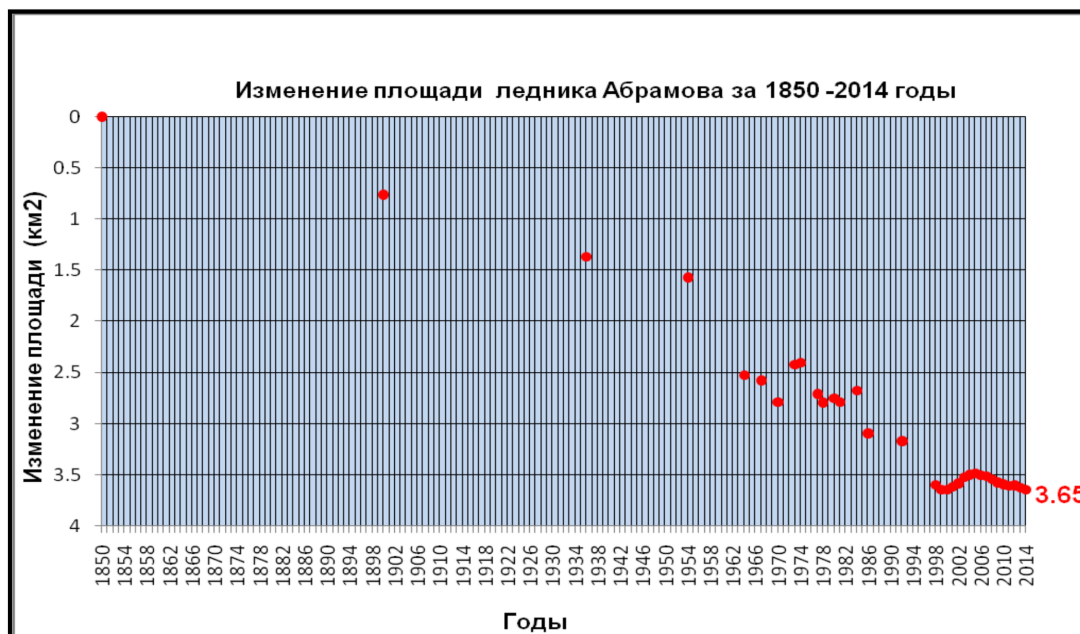


Рис. 17

Основными климатическими факторами, влияющими на знак и величину баланса массы ледника, как известно, являются температура воздуха и величина атмосферных осадков, в районе расположения ледника. Измерения этих параметров непосредственно вблизи ледника Абрамова выполнялись в период с 1967 по 1994 годы на метеостанции “Ледник Абрамова”, созданной Среднеазиатским Региональным Научно-Исследовательским Институтом (САНИГМИ, Узбекистан) и на удаленных от ледника метеостанциях гидрометеослужб Кыргызстана и Таджикистана. Так, по данным метеостанции “Ледник Абрамова” (3837м), метеостанции “Сарыташ”(3155м., ≈ 142 км, расположена восточнее МС “Ледник Абрамова” и метеостанции “Дехавз” (2564 м., ≈124 км, расположена западнее МС “Ледник Абрамова”) температуры приземного слоя воздуха непосредственно вблизи ледника Абрамов и на значительном удалении имеют многолетнюю тенденцию к повышению, как это видно на рисунке 18. Анализ многолетних рядов измерения температуры показывает, что по метеостанции “Ледник Абрамова” градиент повышения температуры по линейному тренду составляет 0,008°С/год и является наименьшим из трех станций, а максимальные амплитуды изменения среднегодовых температур близки по трем станциям и имеют величину порядка 2 °С. В этом случае, обращает на себя внимание высокая степень синхронности изменения среднегодовых температур на вышеупомянутых метеостанциях. Это проявляется в практическом совпадении по времени максимумов и минимумов короткопериодных неравномерных по периодичности колебаний средних годовых температур. Этот факт может свидетельствовать об одинаковых условиях формирования многолетнего температурного режима приземного слоя воздуха в районе расположения трех станций и возможности использования их для взаимного дополнения данных измерений.

Атмосферные осадки по трем рассматриваемым станциям, в многолетнем разрезе, за период с 1934 по 2011 год, так же имеют тенденцию к увеличению, как это видно на рисунке 19.

Максимальный градиент увеличения годовых осадков по линейному тренду зафиксирован по метеостанции “Ледник Абрамова ” (6,5 мм/год), значительно меньше по метеостанции “Сарыташ” (0,9 мм/год) и еще меньше по метеостанции “Дехавз” (0.1 мм/год).
 Причем, для метеостанции “Ледник Абрамова” характерна максимальная амплитуда многолетнего изменения годовых осадков порядка 300 - 400 мм, в то время как по двум другим метеостанциям порядка 200-300 мм.

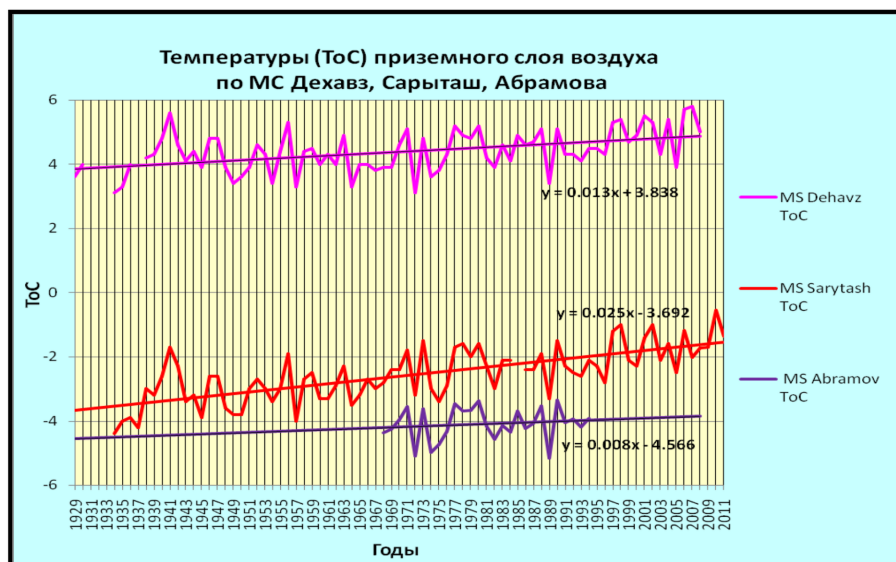


Рис.18

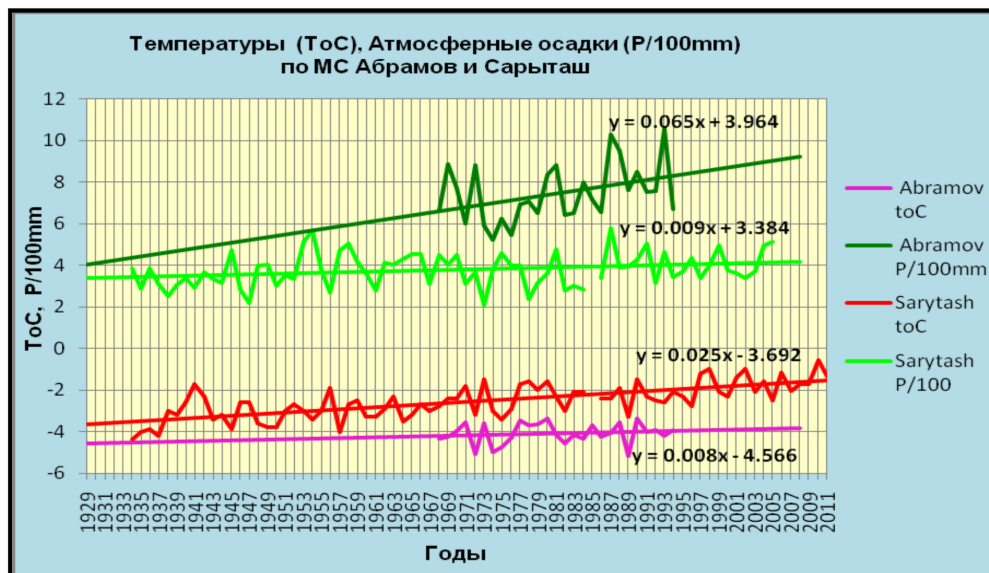


Рис.19

С 2011 года в районе ледника Абрамова начала работать автоматическая метеостанция, установленная в 1,1 км восточнее (N 39.6486°; E 71.5858°) от места расположения бывшей метеостанции “Ледник Абрамова ” на высоте 4102 м. Эта станция создана Центрально-Азиатским институтом прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ) в сотрудничестве с германскими и швейцарскими коллегами в рамках проекта «Вода в Центральной Азии» (CAW) <http://www.caiag.kg/en/departments/departments-3/monitoring-system/monitoring-network/abramov>. Данные по этой станции представлены на рисунке 20. В этом случае, из-за технических перерывов в измерении температур воздуха в 2011, 2012 годах, нет

возможности корректно вычислить среднюю годовую температуру, однако средние месячные температуры, определяются достаточно корректно. Средние месячные температуры по автоматической станции, в сравнении с прежними годами наблюдений на метеостанции “Ледник Абрамова”, показаны на рисунке 21. Из этого рисунка следует, что полученные с помощью автоматической метеостанции температуры воздуха находятся в диапазоне колебаний температур, полученных ранее традиционными методами.

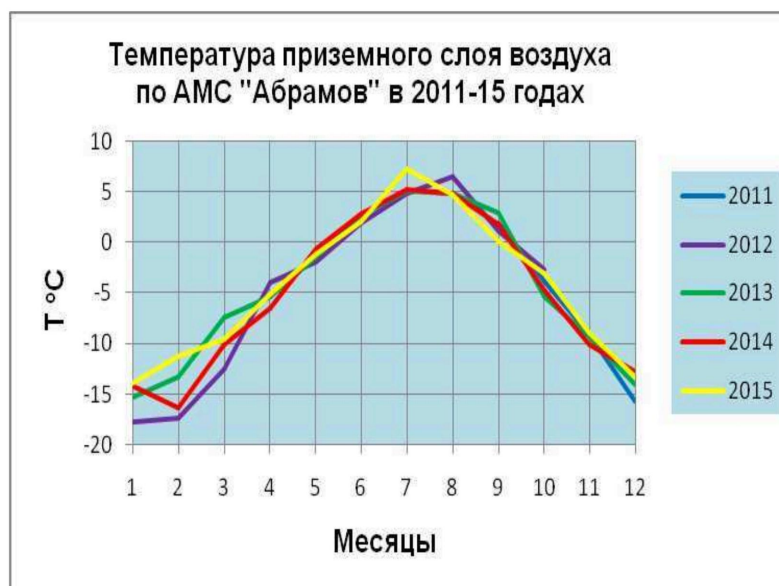


Рис.20

Средние годовые температуры за три года с 2013 по 2015 имеют значения: -4.653 , -5.059 , -4.343 °C, при температурах с 1992 по 1994 год: -3.942 , -4.192 , -3.925 °C. То есть, с 1992 по 2015 год, за 23 года, наблюдается тенденция повышения температуры приземного слоя воздуха в среднем на $4.685 - 4.020 = 0.65$ °C, с градиентом 0.029 °C/год. Эта величина в 3.6 раза больше градиента по МС “Ледник Абрамова” за период 26 лет, с 1968 по 1994 год и близка к градиенту температуры по МС “Сарыташ” (Рис.18). Таким образом, температурный фактор деградации ледника Абрамова усилился в последние десятилетия.

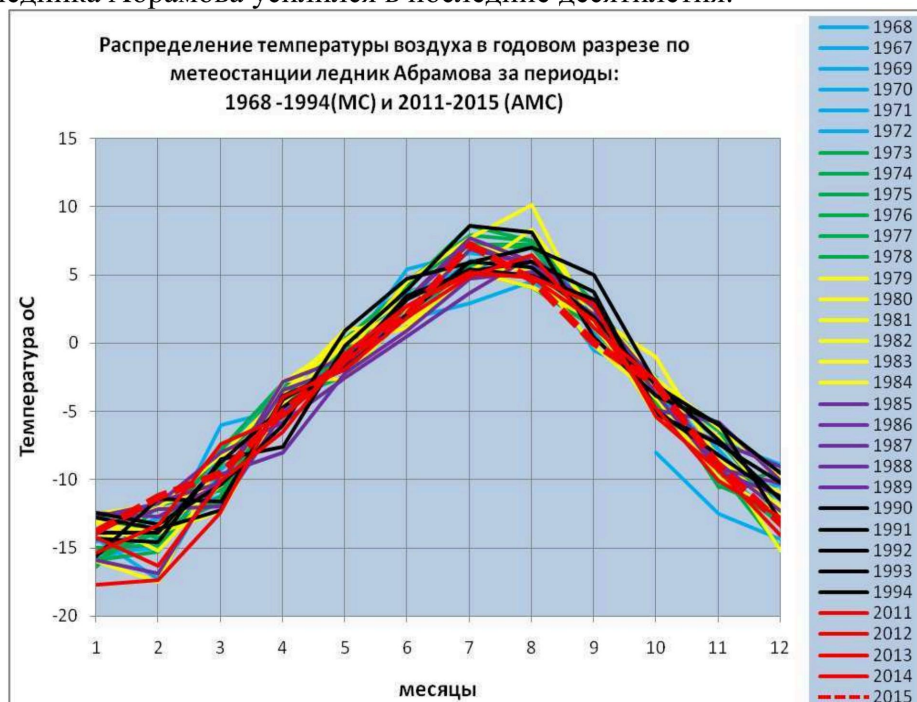


Рис.21

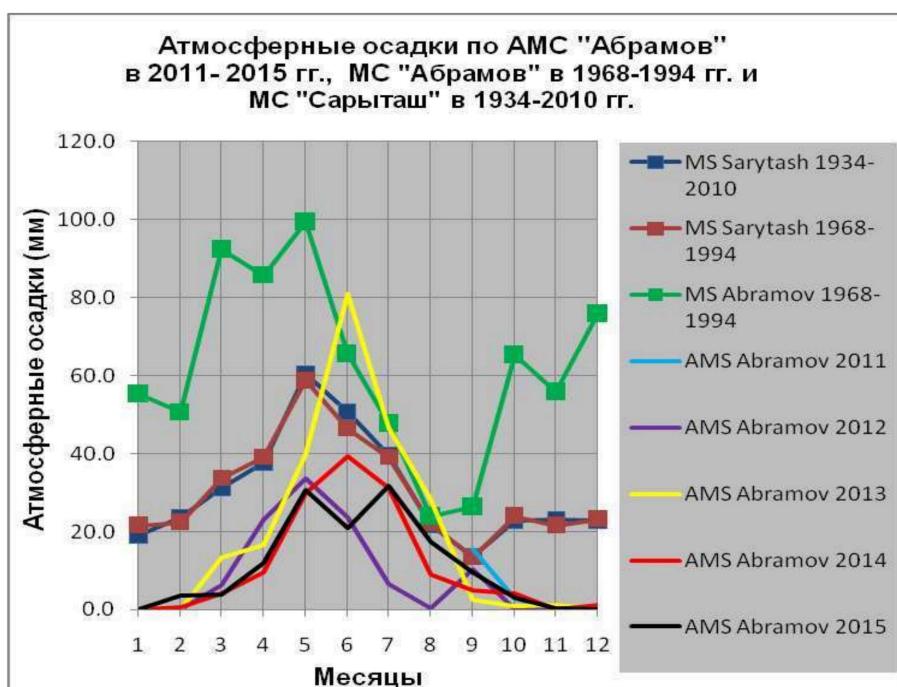


Рис.22

На рисунке 22 представлены месячные атмосферные осадки, полученные традиционными методами на метеостанциях “Ледник Абрамова” и “Сарыташ” за периоды с 1968-1994 и 1934-2010, соответственно и по автоматической метеостанции “Абрамов” за период 2011-2014 год. Как следует из этого рисунка, величины осадков по автоматической станции за период 2011-2015 год существенно отличаются от таковых предшествующих измерений. В первую очередь, обращают на себя внимание очень низкие величины в период отрицательных температур, явно не соответствующие действительности, а в период положительных температур величины осадков значительно меньше характерных для района ледника Абрамова по данным прошлых наблюдений. Эта ситуация, по-видимому, связана с особенностями функционирования автоматического осадкомера, отсутствия у него подогрева и ветровой защиты и требует дальнейшего изучения с целью уточнения измерений и получения объективных данных по осадкам.

В целом, можно констатировать, что, несмотря на рост годовых атмосферных осадков в районе ледника Абрамова, аналогичный рост температур обеспечивает формирование отрицательного баланса массы ледника, что приводит к продолжению сокращения его площади и объема.

Анализ данных Перцигера Ф.И. и других [2], как видно на рисунке 23, показывает, что наблюдается прямая зависимость водного стока ледника Абрамова, измеренного в прошлом на гидропосту МС “Ледник Абрамова”, на реке Коксу, от среднегодовой температуры приземного воздуха в этом районе. А баланс массы этого ледника находится в прямой зависимости от атмосферных осадков, что наиболее заметно в периоды: 1968-1974; 1981-1988 годов и в обратной зависимости от среднегодовой температуры воздуха и стока с ледника, что особенно явно проявилось в период 1971-1974 годов. В данном случае, водный сток является существенно ледниковым из-за расположения ранее действующего гидропоста в непосредственной близости от ледника (1968 год ≈ 320 м, 1998 год ≈ 1200 м). Линейный характер графика на рисунке 23 используется для наглядности и не интерпретируется как физическая связь годовых параметров.

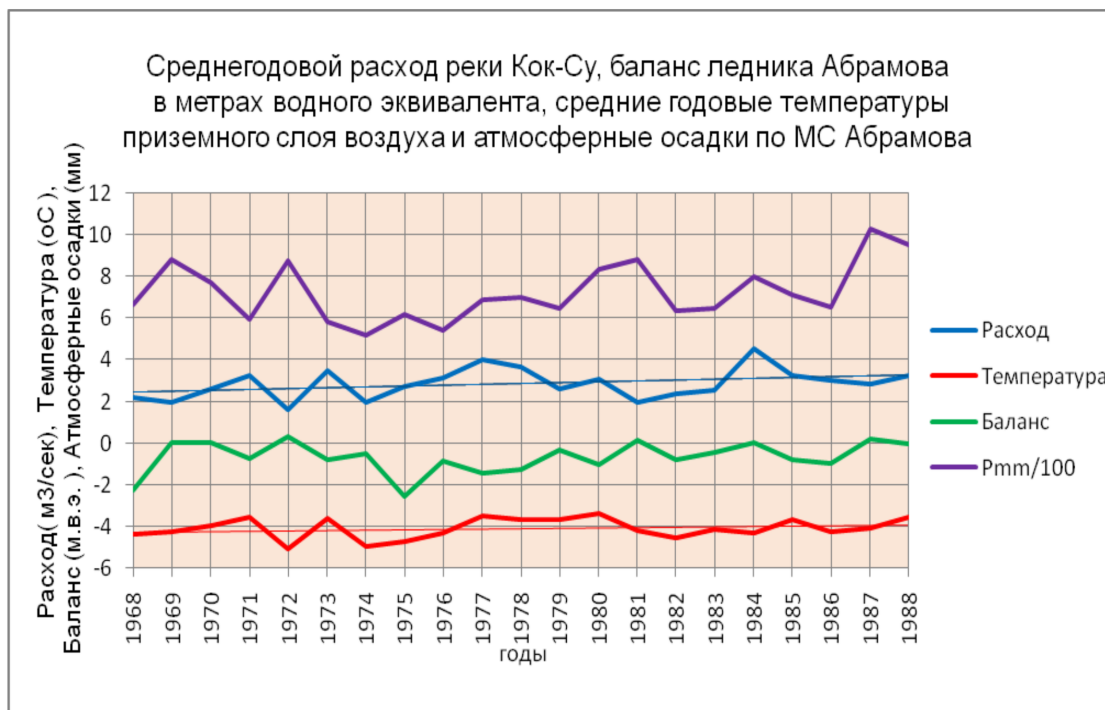


Рис.23

Выводы

Дешифрирование различных космических снимков, аэрофотоснимков, анализ топографических карт, результатов полевых измерений и опубликованных результатов позволил определить границы ледника Абрамова в различные годы и оценить скорость и характер изменений ледника. На основе анализа имеющихся данных, по состоянию на 2014 год, подтверждается продолжение тенденции многолетнего отступления ледника Абрамова, однако на этом фоне наблюдаются периоды относительной стабилизации позиции фронтальной части языка с незначительными движениями одного или разного знака, а так же периоды наступательных подвижек различной длительности и интенсивности. В целом, изменение объема ледника Абрамова происходит неравномерно во времени, что отражается в различии средних скоростей изменений его площади. Медленные изменения ледника, как отступающего, так и наступающего характера, в основном, обусловлены изменением баланса в приходе и расходе льда, а относительно быстрые изменения формы ледника, которые можно определить как пульсации, происходят без существенного изменения массы льда, за счет перераспределения льда, в процессе движения отдельных частей ледника из-за изменения физико-механических свойств льда, неравномерности «накопления – расхода» льда в пределах локальных отрицательных форм рельефа ложа ледника в области питания.

Скорости изменения площади ледника изменяются в пределах: $+0,12 \div -0,1$ км²/год, при средней величине: $+0,036$ и $-0,044$ км²/год, а скорости изменения длины ледника в пределах: $+117$ (экстремальное 350) $\div -103$ м/год, при средней величине: $+42$ (экстремальное 78) и -39 м/год. В случае значительных наступательных подвижек (пульсаций), скорость кратковременно может достигать аномальных значений порядка 300 - 530 м/год (0,8 - 1,45 м/сут). В данном случае, обращает на себя внимание близость величин средних скоростей положительного и отрицательного знака, за исключением аномальных значений.

Общая площадь ледника в 1850 году была около 26,4 км², а в 2014 году она сократилась на 3,65 км², то есть уменьшилась на 13.8%.

Помимо зафиксированной предыдущими исследователями, при полевых наблюдениях в 1972-1973 годах, значительной наступательной подвижки (пульсации) ледника Абрамова, со смещением порядка 350 м., в данном исследовании выявлена наступательная подвижка в 2001-2005 годах, со смещением, в среднем 155 м.

Выявлено сходство скорости изменения площади ледника в начальный период и в конечный период наблюдений, то есть не наблюдается монотонной тенденции увеличения скорости, которая должна была быть за счет постоянного усиления антропогенного воздействия. Этот факт, с учетом очевидного, крайне незначительного влияния промышленного загрязнения атмосферы в Центральном-Азиатском регионе, по крайней мере, в течение 100 лет от начала (1850 год) рассматриваемого периода наблюдений, может свидетельствовать о значительной роли естественных факторов в характере изменения ледника. А так же о наличии, как минимум, 164-летнего полупериода фазы деградации ледника в его неравномерных по величине природных периодах циклических изменений в виде поочередной смены фазы регресса - фазой прогресса.

Установлено, что наряду с дугообразной выпуклой формой языка, полностью заполняющего по ширине ледниковую долину, вероятно, в условиях относительной стабилизации позиции языка, за счет прекращения роста вертикального температурного градиента воздуха, наблюдается преобладание боковой абляции над продольной, с образованием клиновидной формы языка. Кроме этого обнаружен факт изменения формы и размера языка ледника под воздействием временных водных или селевых потоков.

В районе ледника Абрамова основные климатические факторы формирования баланса массы, представленные температурой воздуха и атмосферными осадками, по данным метеорологических станций Узбекистана, Кыргызгидромета, Таджикигидромета и автоматической метеостанции ЦАИИЗа, имеют многолетнюю тенденцию увеличения, причем среднегодовой температурный градиент, в непосредственной близости к леднику, в последние десятилетия, увеличился в 3,6 раза. Наблюдается прямая зависимость ледникового стока ледника Абрамова, измеренного в прошлом на гидропосту МС "Ледник Абрамова", на реке Коксу, от среднегодовой температуры приземного воздуха в этом районе. В то же время баланс массы этого ледника находится в прямой зависимости от атмосферных осадков и в обратной зависимости от среднегодовой температуры воздуха и стока с ледника.

В целом, несмотря на многолетний рост годовых осадков в районе ледника Абрамова, аналогичный рост температур обеспечивает формирование отрицательного баланса массы ледника, что приводит к продолжению сокращения его площади и объема.

Литература

1. Глазырин Г.Е., Камнянский Г.М., Перцигер Ф.И. Режим ледника Абрамова. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1993. 228 с.
2. Перцигер Ф.И. Ледник Абрамова – климат, сток, баланс массы. Ташкент: изд. Технический университет Мюнхена, 1996. 279 с.
3. Сулов 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. Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. 206 с.
4. Емельянов Ю.Н., Ноздрюхин В.К., Сулов В.Ф. Динамика ледника Абрамова в период подвижки 1972-1973 гг. //МГИ.1974. Вып. 24. С. 87-96.
5. Martina Barandun, Matthias Huss, Leo Sold, Daniel Farinotti, Erlan Azisov, Nadine Salzmann, Ryskul Usabaliyev, Alexandr Merkushev, Martin Hoelzle. 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.