



Широкополосное альbedo и изменения размера ледников массива Ак-Шыйрак в период с 1994 по 2018 гг., Тянь-Шань, Кыргызстан

Рахматилла уулу Зарылбек^{1*}, Усубулаив Рыскул А.¹, Митусов А. В.²

¹Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Кыргызстан

²приглашённый лектор Казахстанско-Немецкого университета, Алматы, Казахстан

*для корреспонденции: zaryl_06_92@mail.ru

МРНТИ 37.29.02

doi: 10.29258/CAJWR/2019-R1.v5-1/1-12.rus

Подана в редакцию: 13 июля 2019; Подана после редактирования: 25 сентября 2019; Принятие к публикации: 27 ноября 2019; Доступ онлайн: 16 января 2019.

Аннотация

Массив Ак-Шыйрак считается одним из главных источников воды рек Нарын (приток Сырдарьи) и Сары-Джаз (приток Аксу и Тарим), в связи с этим, должен исследоваться каждый год в целях прогнозирования водности этих рек на будущее. В данной работе была рассмотрена многолетняя динамика широкополосного альbedo для снега и льда, а также динамика размера таких ледников как Лысый, Давыдов и Сары-Тор массива Ак-Шыйрак (Кыргызстан). В качестве исходных данных были применены серии спутниковых данных Landsat.

Установлено, что отступление языка ледника, начиная с 1994 г. по 2018 г., составляет на Лысом 698 м, Сары-Тор 381 м и 1926 м на Давыдова. Общие потери площади ледников составляют на Лысом 1,7 км² (39,6 %), на Сары-Тор и Давыдове 3,6 км² (30,3 %). Начиная с 2005 г. скорость таяния ледников сильно замедлилась по сравнению с предыдущими годами. Широкополосное альbedo на высотах от 3899 м до 4200 м по результатам значений коротковолновых и видимых полос 2006 г. очень низкое по сравнению с другими космоснимками. Отмечается, что в зоне аккумуляции на высоте 4200 м до 4799 м постоянный снег, поэтому показатели альbedo выше. Среднее значение широкополосного альbedo в период 1994–2018 гг. варьируется от $\pm 0,200$ мкм до $\pm 0,531$ мкм (лето-осень). Особое внимание заслуживает спутниковый снимок 2006 г., на котором показатели альbedo очень низкие. Самый высокий показатель альbedo был зафиксирован в 2018 г. Причиной такого резкого увеличения значения альbedo является недавно выпавший снег на данной исследуемой территории.

Ключевые слова: альbedo ледников, деградация ледников, площадь ледников, абляция ледников.

1. Введение

Ледники состоят из многолетнего фирна и льда, полностью или частично свободного от сплошного моренного покрова. В течение года поверхность ледников покрывают сезонные (зимний/летний) снега. Таким образом, отражательная способность ледника в целом или его отдельных частей относительно приходящей

коротковолновой солнечной радиации зависит от внутригодового пространственно-временного распределения площадей открытого льда, льда под мореной, фирна и сезонного снега [Коновалов В. Г., Рудаков В. А., 2015].

Значения альbedo могут быть получены на основе спутниковых данных, аэрофотосъемок и схем параметризации, прямые наземные данные требуются для калибровки и других методов обработки [Шпунтова А. М., Коваленко Н. В., Петраков Д. А].

В большинстве исследований альbedo вычисляется по формулам коротковолновых и видимых диапазонов электромагнитного спектра [например, Li & Leighton, 1992; Liang et al., 1999; Valiente et al., 1995]. По всему миру проводилось много исследований по изучению многоспектрального в широкополосного альbedo для различных классов земного покрова с использованием различных спутниковых данных для разных сенсоров [Liang et al., 2002; Mishra et al., 2012], таких как: спутник ASTER, (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR), спутник окружающей среды (GEOS Imager), спутник Landsat, многоспектральные сенсоры (MSS, ETM+, TM), спектрорадиометр многоугольной визуализации TERRA (MISR), усовершенствованный широкоугольный сенсор (AWiFS) и др. В 1999 г. был разработан алгоритм, который связывает многоспектральные спутниковые снимки с атмосферными коррекциями (TOA) и позволяет получить широкополосное альbedo на поверхности Земли [Lian et al., 1999].

Использование космоснимков с применением комплекса дистанционных методов и ГИС-технологий с учетом антропогенной составляющей приобретает особую актуальность. Преимущество такого подхода в том, что ДЗЗ охватывает большие зоны ледников и дает хорошую возможность исследовать без выезда на полевые работы. Однако многое зависит от разрешения космоснимка и атмосферных коррекций.

Целями исследования являются вычисление широкополосного альbedo видимых и коротковолновых диапазонов электромагнитного спектра, а также оценка изменений размеров ледников Лысый, Давыдов и Сары-Тор горного массива Ак-Шыйрак.

2. Район исследования

Массив Ак-Шыйрак расположен в Центральном Тянь-Шане южнее средней части хребта Терской Ала-Тоо в примерных границах между районами ущелий Джеты-Огуз. Средняя высота составляет 4700 метров, высшая точка – 5126 метров над уровнем моря. Хребты ориентированы с северо-востока на юго-запад и разделены крупными продольными долинами. Рельеф внутренней части массива Ак-Шыйрак имеет узкие скалистые водоразделы, крутые стенки, острые вершины и гребни.

Важность изучения ледников массива Ак-Шыйрак состоит в том, что его талые воды питают реки Нарын (приток Сырдарьи) и Сары-Джаз (приток Аксу и Тарим). Воды этих рек используются для орошения сельскохозяйственных угодий в Узбекистане,

Казахстане и Китае. Объектами исследования были ледники Лысый, Давыдов и Сары-Тор (рис. 1).

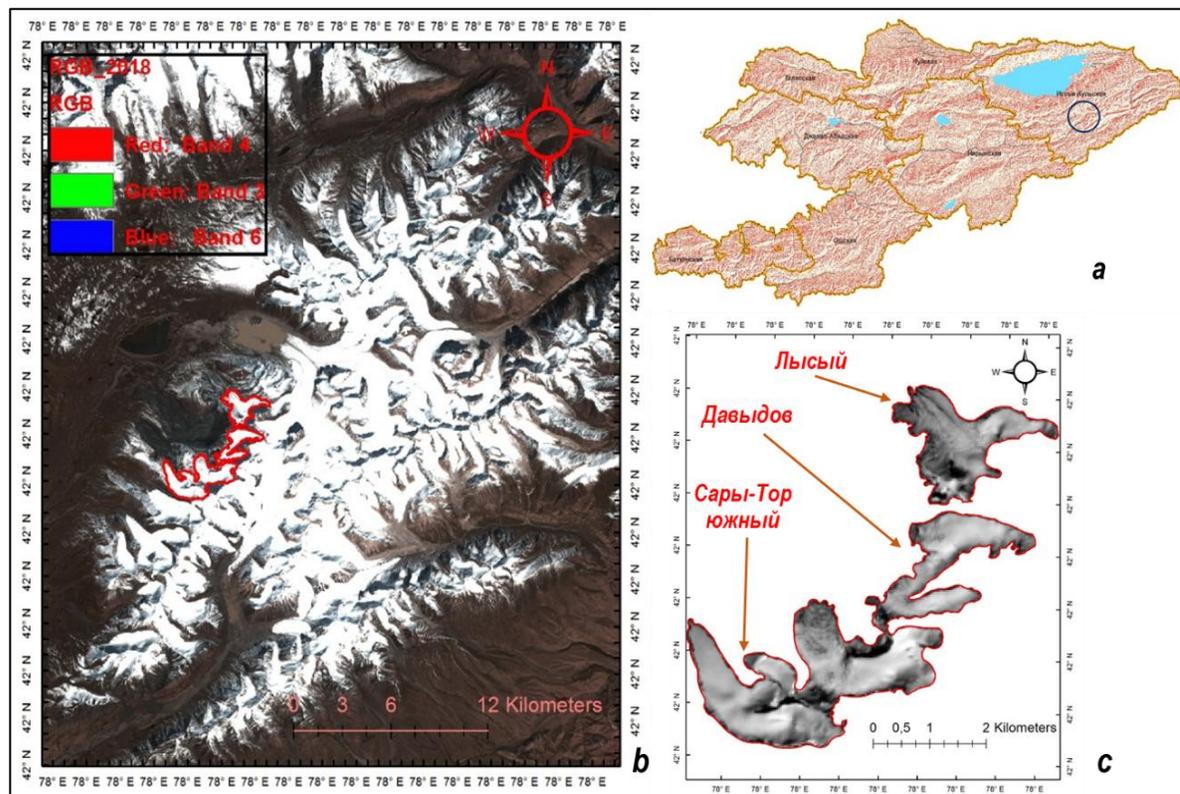


Рисунок 1 – Карта района исследования: а) обзорная, б) массив Ак-Шыйрак, с) ледники Лысый, Давыдов и Сары-Тор.

Климат исследуемого района характеризуется двумя главными особенностями: низкой температурой воздуха в течение всего года и небольшим количеством дождевых осадков, максимум которых приходится на теплый период года (май-сентябрь). Температура здесь в среднем 5,3 °С. В год выпадает около 378 мм дождевых осадков. Июль – самый теплый месяц года, температура в июле в среднем 18,8 °С. В январе средняя температура составляет –10,6 °С, это самая низкая средняя температура за весь год. Лето обычно сухое, возникают бури с градом, дождем и снегом даже в середине лета на более низких высотах.

3. Материалы и методы

Сенсор Landsat Thematic Mapper (TM 30 м) начал выпускать снимки 1 марта 1984 года Landsat 4 и 5. Landsat 7 (ETM+ 30 м) выведен на орбиту 15 апреля 1999 г. и продолжает работать. Основной целью спутника было обновление глобального архива спутниковых фотографий. Длина волн коротковолновых диапазонов на спутнике Landsat TM и Landsat ETM+ составляет от 0,155 до 1,77 мкм, а видимый диапазон от 0,45 до 0,69 мкм. Landsat 8 Operational Land Imagery (OLI 30 м) оснащён двумя

инструментами: операционным тепловизором земной поверхности (OLI) и тепловым инфракрасным датчиком (Thermal Infrared Sensor, TIRS). Landsat 8 OLI – коротковолновый диапазон составляет от 1,55 до 2,3 мкм, а диапазон видимых волн от 0,43 до 0,67 мкм (<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>). В данной работе были использованы космоснимки Landsat серии OLI, TM, ETM+ и SRTM Dem 30 м для вычисления альбедо таких ледников как Лысый, Давыдов и Сары-Тор. Используемые данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. Спутниковые данные

Спутник	Тип сенсора	Даты	Разрешения и использованные bands
Landsat	TM (Thematic Mapper)	26.07.1994	30 м bands-VIS, NIR, SWIR
Landsat	TM (Thematic Mapper)	06.10.1997	30 м bands-VIS, NIR, SWIR
Landsat	ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)	12.08.2006	30 м bands-VIS, NIR, SWIR
Landsat	ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)	11.09.2011	30 м bands-VIS, NIR, SWIR
Landsat	ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)	01.07.2014	30 м bands-VIS, NIR, SWIR
Landsat	OLI (Operational Land Imagery)	30.09.2018	30 м bands-VIS, NIR, SWIR

Была использована SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM (Digital Elevation Model 30 м) для зональной статистики. На составление зональной статистики применен шейп-файл 2018 г., разделенный по контурам с расстоянием между контурами 100 м. ГИС-программы QGIS 3.4 и ArcGIS 10.5 применены для обработки данных и вычислений формул. Обработка данных в первую очередь опиралась на отношения между отражательной способностью TOA (Top of Atmospheric Reflectance) снимка с землей. Выполняя атмосферную коррекцию, необходимо обратить внимание на метаданные (Metadata), которые включают сбор данных космоснимка, необходимых для обработки Landsat. С помощью модели Semi-Automatic Classification в программе QGIS 3.4 была успешно обработана атмосферная коррекция TOA (Top of Atmospheric Reflectance). Атмосферная коррекция TOA является самой главной задачей, без которой все вычисления будут неправильными, поэтому обработка данных проводилась автоматически с помощью метаданных.

Формулы [Dhiraj K. S et al., 2018 и Liang et al., 2000] для Landsat TM и ETM+ были использованы для вычисления альbedo ледников. Обработка данных с сенсора TM и ETM+ проводилась по формулам 1 и 2 соответственно. Обработка данных с сенсора OLI проводилась по формуле 3. Метод называется преобразование многоспектрального альbedo в широкополосное альbedo для снега и льда.

$$\alpha_{\text{short}} = 0.356 p_1 + 0.130 p_3 + 0.373 p_4 + 0.085 p_5 + 0.072 p_7 - 0.0018 \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{visible}} = 0.443 p_1 + 0.317 p_2 + 0.240 p_3 \quad (2)$$

$$\alpha^{\text{OLI}} = 0.23 p_1 + 0.23 p_2 + 0.21 p_3 + 0.18 p_4 + 0.11 p_5 + 0.03 p_6 + 0.01 p_7 \quad (3)$$

где:

α_{short} , α_{visible} , α^{OLI} – поверхностные альbedo;

p_1 – p_7 – атмосферная коррекция (отражательная способность спутниковых данных) для полос 1 (band) до 7 (band) в космоснимках Landsat.

После коррекции космоснимков ледников Лысый, Давыдов и Сары-Тор были вырезаны (как на рис. 1) участки с абсолютно одинаковой геометрией с помощью одного шейп-файла, который оцифрован по космоснимку 30 сентября 2018 г. В итоге были получены одинаковые по площади массивы за все рассматриваемые годы. Эти данные использовались для вычисления широкополосного альbedo для снега и льда. Вычисление альbedo проводилось по высотным данным от 3800 м до 4800 м и разделено на контуры с интервалом 100 м.

Для оценки изменения размеров границы ледников космоснимки за каждый год были оцифрованы отдельно. Схема операций для получения исходных данных приведена на рис. 2.

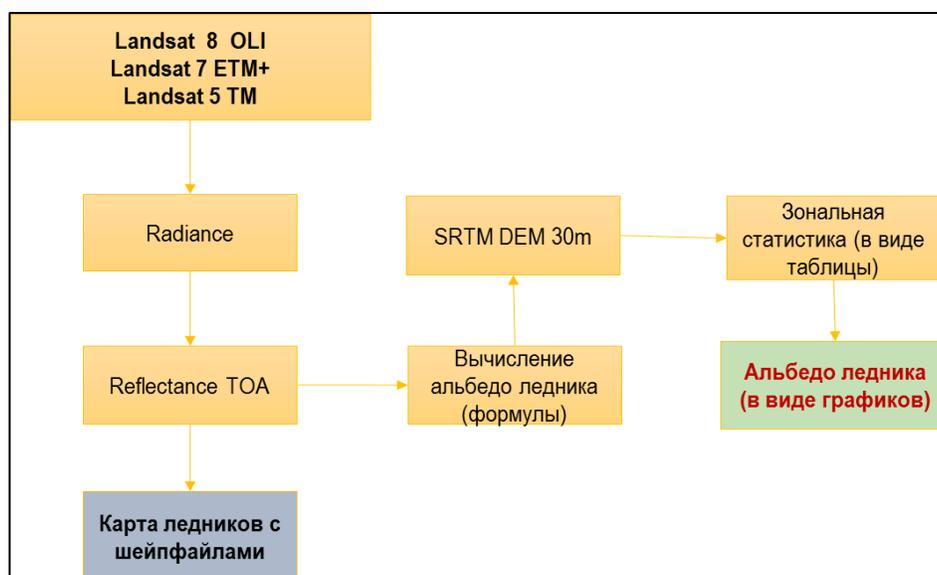


Рисунок 2 – Блок-схема получения финальных данных

4. Результаты

4.1. Широкополосное альbedo для снега и льда

Альbedo для снега и льда на диаграммах показывает резкое уменьшение в 2006 г. и резкое увеличение в 2018 г. На основе средних значений были составлены графики (рис. 3 и 4). Показано, как варьируются средние значения широкополосного альbedo ледников для снега и льда, вычисленные из видимых и коротковолновых полос. Широкополосное альbedo ледников по полученным результатам в 2018 г. достигает среднего значения 0,850 мкм и является самым высоким показателем альbedo ледника для снега и льда. Данные альbedo для снега и льда были вычислены по высотным характеристикам. Высота ледников варьируется от 3899 м до 4799 м. Зона абляции приблизительно охватывает от 3899 м до 4200 м, также зона охвата аккумуляции от 4200 м до 4799 м. Согласно Standard Deviation (STD) значения для коротковолновых и видимых полос варьируются от $\pm 0,029$ мкм до $\pm 0,086$ мкм. Безоблачные космоснимки осеннего и зимнего периода найти было трудно. В таблице 2 показаны все результаты значений – минимальный, максимальный и средние широкополосного альbedo для снега и льда.

Таблица 2. Результаты широкополосного альbedo для снега и льда

Даты	Альbedo для коротковолновых полос (мкм)	Альbedo для видимых полос (мкм)	Среднее (мкм) корот./видим.
26.07.1994г.	мин. $\pm 0,327$, макс. $\pm 0,460$	мин. $\pm 0,335$, макс. $\pm 0,485$	$\pm 0,417/\pm 0,434$
06.10.1997г.	мин. $\pm 0,155$, макс. $\pm 0,353$	мин. $\pm 0,177$, макс. $\pm 0,392$	$\pm 0,271/\pm 0,305$

12.08.2006г.	мин.±0,165, макс.±0,263	мин.±0,189,макс.±0,305	±0,215/±0,249
11.09.2011г.	мин.±0,335, макс.±0,484	мин.±0,383,макс.±0,547	±0,427/±0,487
01.07.2014г.	мин.±0,206, макс.±0,379	мин.±0,193,макс.±0,376	±0,304/±0,299
30.09.2018г.	мин.±0,238, макс.±0,542	мин.±0,243,макс.±0,544	±0,412/±0,417

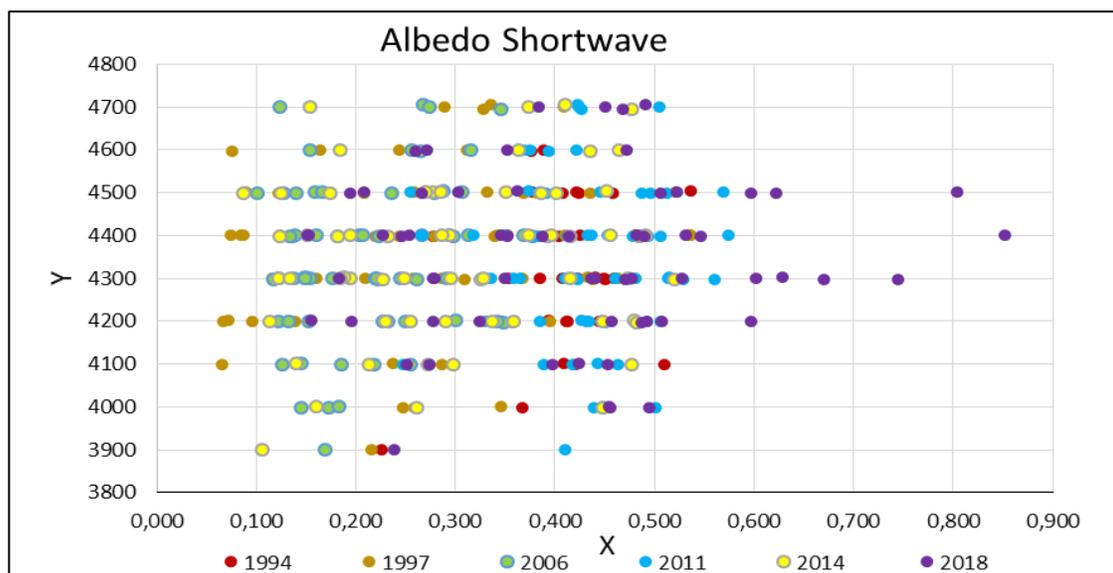


Рисунок 3 – Широкополосное альbedo ледников, вычисленное по коротковолновым (Shortwave) полосам для снега и льда. Ось абсцисс – непосредственно альbedo, ось ординат – высота местности.

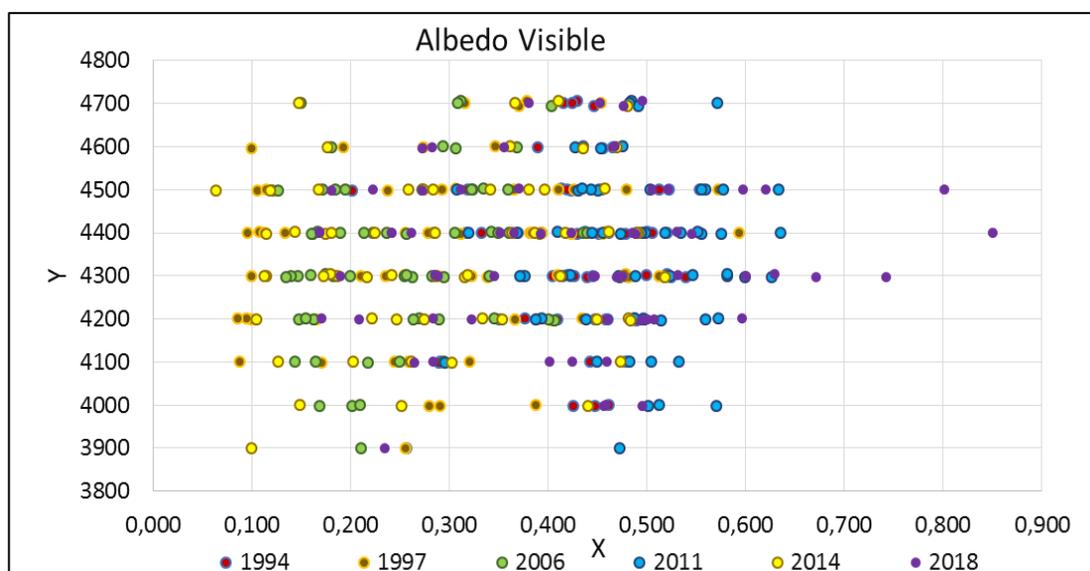


Рисунок 4 – Широкополосное альbedo ледников, вычисленное по видимым (Visible) полосам для снега и льда. Ось абсцисс – непосредственно альbedo, ось ординат – высота местности.

4.2. Отступление ледников во времени

Динамика изменений ледников Лысый, Давыдов и Сары-Тор к 2018 г. заметно отслеживается – языки ледников отступают (рис. 5). Отступления языка начиная с 1994 г. по 2018 г. составляют на леднике Лысый – 718 м, леднике Сары-Тор – 392 м и Давыдова – 1908 м. Площадь ледников в 1994 г. составляла: ледника Лысый – 4,3 км², ледников Давыдов и Сары-Тор – 11,9 км² (общая площадь обоих). Площадь ледников в 2018 году по результатам данных космоснимков составляет для ледника Лысый 2,6 км², для ледников Давыдов и Сары-Тор составила 8,3 км² (общая площадь обоих). За период 1994–2018 гг. на леднике Лысый уменьшение площади составляет 1,7 км² (39,6 %), на ледниках Сары-Тор и Давыдов составляет 3,6 км² (30,3 %). Выявлены изменения общей площади ледников для каждого года спутникового снимка: в 1994 г. общая площадь трёх ледников составляла 16,2 км², в 1997 г. – 15,2 км², в 2006 г. – 11,6 км², в 2011 г. – 12 км², в 2014 г. – 11,2 км² и в 2018 г. – 10,9 км².

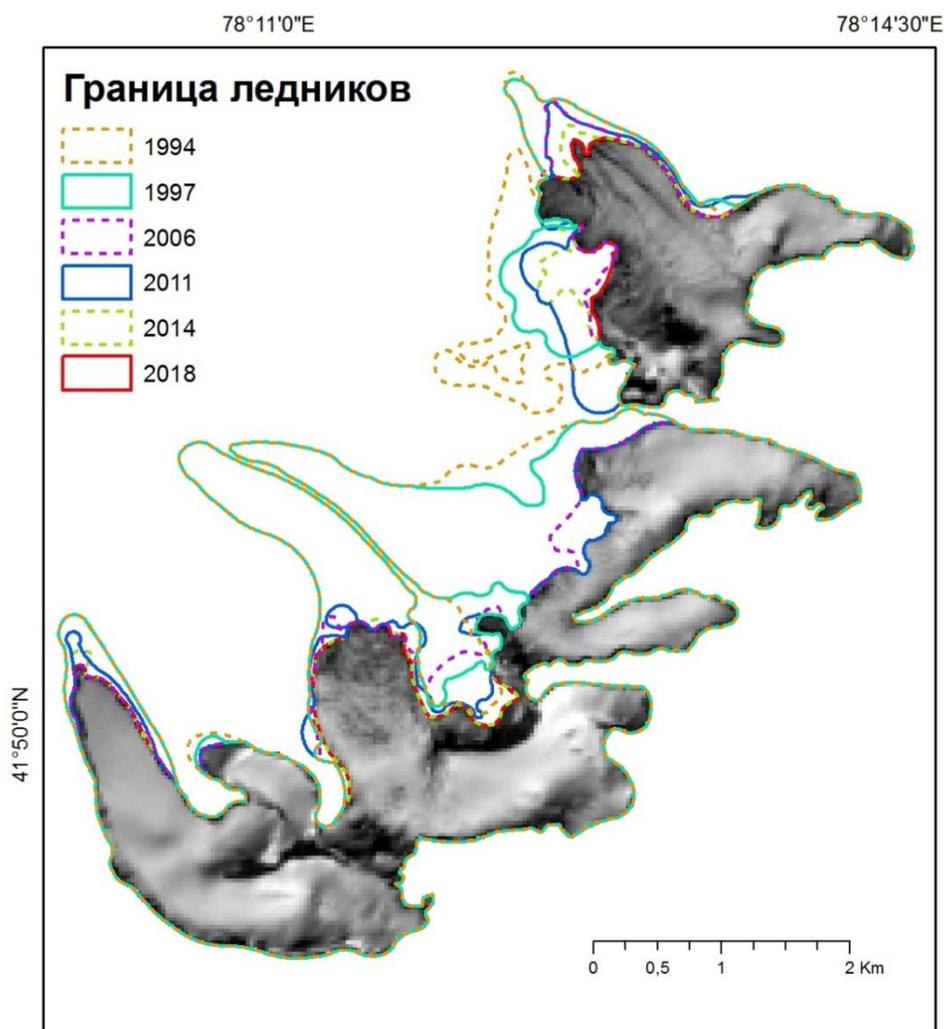


Рисунок 5 – Карта Landsat с границами ледников Сары-Тор, Давыдов, Лысый

5. Обсуждение результатов

5.1. Альbedo

При выпадении сезонных снегов результаты широкополосного альbedo в 2018 г. на диаграммах показывают резкое увеличение. На спутниковом снимке 2018 г. можно увидеть выпавший недавний снег. Обратим внимание на данные 2006 г. По полученным данным все значения коротковолновых и видимых полос широкополосного альbedo для снега и льда очень низкие по сравнению с остальными снимками. На рисунках 4 и 5 видно, что расположение и значение альbedo для снега и льда по мере увеличения высоты очень хорошо объясняется физикой явления. В зоне абляции на высоте от 3899 м до 4200 м альbedo должно быть низким, но не настолько, как на космоснимке 2006 г. – очень низкое по сравнению с другими, там и происходит деградация ледников. В зоне аккумуляции – выше 4200 м и до 4700 м присутствует постоянный снежный покров, что приводит к увеличению показателей альbedo.

Исследования по получению поверхностного широкополосного коротковолнового альbedo из изображений Landsat TM опубликованы во многих статьях [например, Duguay и LeDrew, 1992; Gratton et al., 1993; Knap et al., 1999; Liang, 2000]. Wouter H. Knap et al. (1999) разработали полиномиальную формулу второго порядка, основанную на наземных измерениях ледникового льда и снега. Формулы очень хорошо подходят для многих исследований, чтобы сравнить образцы снега и льда, но очень плохо подходят для образцов почвы и растительности. Альbedo снега обычно не очень изменчиво по сравнению с альbedo для льда и имеет высокую пространственную изменчивость на расстояниях всего несколько метров, так как космоснимки значительно различаются от наземных измерений.

5.2. Размер ледников

Изменение динамики ледников очень важно и всегда актуально для исследований массива Ак-Шыйрак. Сравнение результатов космоснимков разных лет дает возможность оценить темп изменения площади ледников. За 24 года границы ледников изменились и площади ледников заметно сократились, что составило – 30,3 % на ледниках Сары-Тор и Давыдов и 39,6 % на леднике Лысый. Сравнения разновременных космоснимков позволяют отследить динамику сокращения площади ледников (рис. 6).

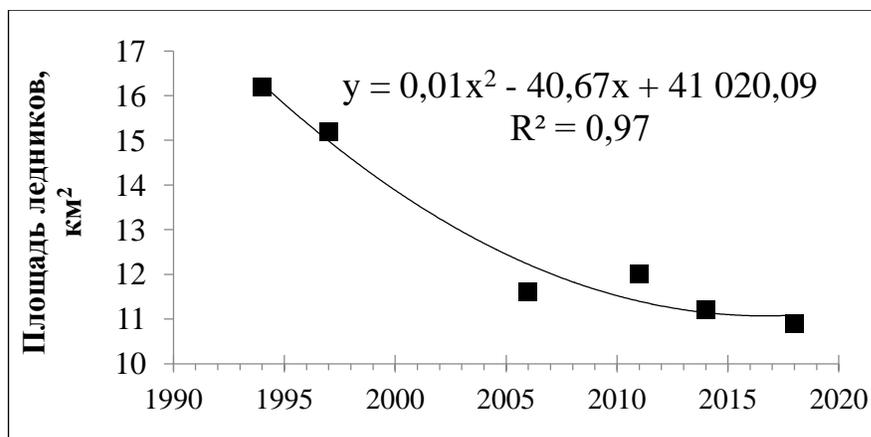


Рисунок 6 – Динамика сокращения суммарной площади ледников Сары-Тор, Давыдов и Лысый

Динамика изменения суммарной площади ледников Сары-Тор, Давыдов, Лысый (рис. 6.) прекрасно описывается кубическим нисходящим трендом. При этом максимальное сокращение площади произошло к 2005–2006 гг. Декада 1995–2005 годов может характеризоваться именно катастрофическим таянием и снижением водных запасов. Напротив, в последующие годы интенсивность уменьшения площади ледников минимальна, хотя отрицательная динамика сохраняется. Причины такой тенденции могут лежать в разных плоскостях и требуют отдельного изучения. Однако данные явно показывают возможное достижение нового баланса между высотной границей ледников и новым климатом.

6. Заключение

В данной работе представлен анализ временных и пространственных изменений широкополосного альбедо для снега и льда и изменение площади ледников на основе полученных космоснимков Landsat 8, TM, ETM+, SRTM Dem 30 м.

Космоснимки действительно могут обеспечить данными широкополосного альбедо поверхности снега и льда. Среднее значение широкополосного альбедо снега и льда ледников Лысый, Давыдов и Сары-Тор в период с 1994 по 2018 гг. варьируется от $\pm 0,200$ до $\pm 0,531$ мкм.

Отступление языка ледников за эти 24 года (1994–2018 гг.) составляет: ледник Лысый – 698 м, ледник Сары-Тор – 381 м и ледник Давыдова – 1926 м. Общее изменение площади составляет для ледника Лысый $1,7 \text{ км}^2$ (39,6 %), ледников Сары-Тор и Давыдов $3,6 \text{ км}^2$ (30,3 %). Важным является то, что интенсивность сокращения площади ледников заметно уменьшалась в последние годы.

В настоящей работе использовались обширные данные спутникового зондирования, позволяющие охватить динамику ледников большого района за много

лет. Авторы надеются, что данная статья ляжет в основу разработки экспедиционных планов для полевых изысканий командами региональных и международных ученых.

7. Благодарности

Статья выполнена при финансовой поддержке РЭЦЦА в рамках конкурса студенческих исследований по устойчивому управлению природными ресурсами в Центральной Азии 2018–2019: Р. Зарылбек являлся стипендиатом этого конкурса, А. В. Митусов был научным тренером в проекте. Авторы благодарны спонсорам и организаторам этого конкурса как за финансовую поддержку, так и за развитие сети международных научных контактов. Кроме того, выражаем особую благодарность коллегам из Центрально-Азиатского института прикладных исследований Земли за ценные консультации в ходе исследований, а также рецензентам журнала за важные комментарии по тексту статьи.

8. Список источников

1. Singh D.K., Gusain H.S., Mishra V.D. and Gupta. N. Automated Retrieval of Snow/Ice Surface Broadband Albedo in Beas River Basin, India using Landsat-8 Satellite images and Validation with Wireless Sensor Network Data // Indian Society of Remote Sensing. 2018.
2. Petrakov D., Shpuntova A., Aleinikov A., Käab A., Kutuzov S., Lavrentiev I., Stoffel M., Tutubalina O. and Usubaliev R. Accelerated glacier shrinkage in the Ak-Shyirak massiv, Inner Tien Shan 2003 – 2013 // Science of the Total Environment. 2016. Vol. 562, pp. 364-378.
3. Konovalov V.G. and Rudakov V.A. Determine of Glacier Characteristics by Remote Sensing Data// Journal of Siberian Federal University, Engineering and Technologies. 2015.
4. Петраков Д.А., Шпунтова А.М., Алейников А.А., Усубалиев Р.А. Изменения площади оледенения массива Ак-Шыйрак (Внутренний Тянь-Шань) в 2003-2013гг. //Материалы Международной конференции "Дистанционные и наземные исследования Земли в Центральной Азии"- Бишкек. 2014. С. 352-358.
5. Петраков Д.А., Лаврентьев И.И., Коваленко Н.В., Усубалиев Р.А. Толщина льда, объём и современные изменения площади ледника Сары-Тор (Массив Ак-Шыйрак, Внутренний Тянь-Шань) // Криосфера Земли. 2014. т. XVIII, № 3. С. 91–100.
6. Kutuzov S. and Shahgedanova M. Glacier retreat and climatic variability in the eastern Terskey–Alatau, inner Tien Shan between the middle of the 19th century and beginning of the 21st century // Global and Planetary Change. 2009. Vol. 69. No. 1-2. P. 59–70.

-
7. Chander G., Markham B. L. and Helder, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113. P. 893-903.
 8. Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms // Remote Sensing of Environment. 2000. Vol. 76. P.213- 238.
 9. Reijmer C.H., Knap W.K. and Oerlemans J. The Surface albedo of the Vatnajokull ice cap, Iceland: A comparison between Satellite derived and Ground-based measurements. 1999.
 10. Liang S., Strahler A. and Walthall C. Retrieval of land surface albedo from satellite observations: a simulation study // Journal of Applied Meteorology. 1999. Vol. 38. P. 712 - 725.
 11. Valiente J., Nunez M., Lopez-Baeza E. and Moreno J. Narrowband to broadband conversion for Meteosat-visible channel and broadband albedo using both AVHRR-1 and -2 channels // International Journal of Remote Sensing. 1995. Vol. 16. P. 1147 - 1166.17.
 12. Li Z. and Leighton H. Narrowband to broadband conversion with spatially autocorrelated reflectance measurements // Journal of Applied Meteorology. 1992. Vol. 31. P. 421 - 432.