

А.А. Калдыбаев^{1*} , Chen Yaning² 

¹ДТОО «Институт ионосферы», Казахстан, г. Алматы

²Государственная ключевая лаборатория экологии пустынь и оазисов,
Синьцзянский институт экологии и географии, Китайская академия наук, Китай, г. Урумчи

*e-mail: azamat.kaldybayev@gmail.com

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОЩАДИ ЛЕДНИКОВ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЖЕТЫСУСКОГО АЛАТАУ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДЗЗ

В статье были исследованы изменения ледников в бассейнах рек Аксу-Биен и Лепсы-Баскан в северной части Жетысуского Алатау за периоды 1956–2001, 2001–2012 и 2012–16 гг. на основе анализа данных Landsat TM/ETM+ и OLI. В 2001 году были обнаружены 245 ледников с общей площадью 197.2 км², к 2016 году они сократились до 232 ледников с общей площадью 165.5 км², что на 31,7 км² меньше, то есть, по 1% за год в течение 15 лет. Также проанализированы скорости сокращения ледников на основе их различий в размерах, высоте и аспекте склонов, а также других топографических параметров в пяти бассейнах (Биен, Аксу, Саркан, Баскан, Лепсы), где сокращение ледников варьировалась от 14,9% до 17,5%. Такая высокая скорость сокращения, вероятно, связана с общей тенденцией повышения температуры и с тем, что небольшие ледники расположены на относительно низкой высоте внешних хребтов Жетысуского Алатау. Однако, по результатам наших исследований, а также по работам других авторов, исследовавших эту территорию, скорость сокращения площади ледников в северной части Жетысуского Алатау по сравнению с другими территориями ниже. Мы пришли к выводу, что оледеневшие районы бассейна рек Аксу-Биен и Лепсы-Баскан расположены в наиболее благоприятных условиях для оледенения, что подтверждается более крупными средними размерами ледников, которые выше, чем в других бассейнах, и в результате показали более низкую скорость сокращения, чем другие оледеневшие районы Жетысуского Алатау с 1956 по 2016 год.

Ключевые слова: Жетысуский Алатау, изменение климата, сокращение ледников, картирование ледников, горные ледники, дистанционное зондирование.

А.А. Kaldybayev^{1*}, Chen Yaning²

¹«Institute of Ionosphere» SLLP, Kazakhstan, Almaty

²State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, China, Urumqi

*e-mail: azamat.kaldybayev@gmail.com

Assessment of changes in the area of glaciers in the northern part of the Zhetysu Alatau based on remote sensing data

The changes of glaciers in the basins of the Aksu-Bien and Lepsy-Baskan rivers in the northern part of the Zhetysu Alatau were studied for the periods 1956–2001, 2001–2012 and 2012–16, based on the analysis of Landsat TM/ETM+ and OLI data. In 2001, 245 glaciers with a total area of 197.2 km² were discovered, by 2016 they had decreased to 232 glaciers with a total area of 165.5 km², which is 31.7 km² less, that is, 1% per year for 15 years. The rate of glacier reduction was also analyzed based on their differences in size, height and aspect of slopes, as well as other topographic parameters in five basins (Bien, Aksu, Sarkan, Baskan, Leps), where the reduction of glaciers varied from 14.9% to 17.5%. Such a high rate of reduction is probably related to the general trend temperature increases due to the fact that small glaciers are located at a relatively low altitude of the outer ridges of the Zhetysu Alatau. However, according to the results of our research, as well as the works of other authors who have studied this territory, the rate of reduction of the area of glaciers in the northern part of the Zhetysu Alatau is lower compared to other territories. We came to the conclusion that the glaciated areas of the Aksu-Bien and Lepsy-Baskan river basins are located in the most favorable conditions for glaciation – which is confirmed by the larger average sizes of glaciers that are higher than in other basins – and as a result showed a lower rate of reduction than other glaciated areas of the Zhetysu Alatau from 1956 to 2016.

Key words: Zhetysu Alatau, climate change, glacier reduction, glacier mapping, mountain glaciers, remote sensing.

А.А. Калдыбаев^{1*}, Chen Yaning²

¹«Ионосфера институты» ЕЖШС, Қазақстан, Алматы қ.

²Шөлдер мен оазистер экологиясының мемлекеттік негізгі зертханасы,
Қытай Ғылым Академиясының Шыңжаң экология және география институты, Қытай, Үрімші қ.
*e-mail: azamat.kaldybayev@gmail.com

ЖҚЗ деректері негізінде Жетісу Алатауының солтүстік бөлігіндегі мұздықтар ауданының өзгеруін бағалау

Landsat TM/ETM+ және OLI деректерін талдау негізінде 1956–2001, 2001–2012 және 2012–2016 жылдар кезеңдері ішінде Жетісу Алатауының солтүстік бөлігіндегі Ақсу-Биен және Лепсі-Басқан өзендері бассейндеріндегі мұздықтардың өзгерістері зерттелді. 2001 жылы жалпы ауданы 197.2 км² болатын 245 мұздық анықталды, 2016 жылға қарай олардың жалпы ауданы 165.5 км² болатын 232 мұздыққа дейін азайды, бұл 31,7 км²-ге аз, яғни 15 жыл ішінде жылына 1%-ға қысқарған. Сонымен қатар, мұздықтар ауданының қысқару жылдамдығын олардың орташа мөлшері, биіктігі мен орналасу аспектісіндегі айырмашылықтары, сондай-ақ бес бассейнің (Биен, Ақсу, Сарқан, Басқан, Лепсі) басқа да топографиялық параметрлері негізінде талданды, мұнда мұздықтардың азаюы 14,9%-дан 17,5%-ға дейін өзгерді. Мұздықтардың мұндай жоғары жылдамдықта қысқаруы жалпы температураның көтерілу үрдісімен және орташа көлемі шағын мұздықтардың Жетісу Алатауының сыртқы жоталарының салыстырмалы түрде төмен биіктіктерінде орналасуымен байланысты болуы ықтимал. Алайда, біздің зерттеулеріміздің нәтижелері бойынша, сондай-ақ осы аумақты зерттеген басқа авторлардың жұмыстары бойынша Жетісу Алатауының солтүстік бөлігіндегі мұздықтар ауданының басқа аумақтармен салыстырғанда қысқару жылдамдығы төмен. Ақсу-Биен және Лепсі-Басқан өзендері бассейнінің мұз басқан аудандары мұздану үшін неғұрлым қолайлы жағдайларда орналасқан – бұл басқа бассейндерге қарағанда мұздықтарының орташа көлемі басқа бөліктеріндегі мұздықтарының орташа көлемінен неғұрлым үлкен екендігі расталды, нәтижесінде Жетісу Алатауының 1956 жылдан бастап 2016 жылға дейінгі басқа мұз басқан аудандарына қарағанда солтүстік бөлігінде мұздықтар ауданының қысқару жылдамдығы аз екендігін көрсетті деген қорытындыға келдік.

Түйін сөздер: Жетісу Алатауы, климаттың өзгеруі, мұздықтардың қысқаруы, мұздықтарды картаға түсіру, тау мұздықтары, қашықтықтан зондау.

Введение

Ледники играют решающую роль в гидрологическом цикле Центральной Азии (Viviroli, 2003: 32; Armstrong, 2010: 20; Sorg, 2012: 725; Kaldybaev, 2016: 11). В частности, ледники Тянь-Шаньского хребта обеспечивают водой низменности Казахстана, Кыргызстана и Узбекистана, которые являются одними из крупнейших орошаемых территорий в мире (Farinotti, 2015: 716).

Население засушливых и полузасушливых низменных районов (оазисов и орошаемых сельскохозяйственных угодий) Центральной Азии во многом зависит от речных вод, поступающих из горных районов (Nagata, 2010: 42). Горные ледники составляют основную часть этих важных водных ресурсов. Ледники собирают твердые осадки зимой и выпускают эти осадки летом в виде талой воды (Hagg, 2007: 40; Nagata, 2010: 42), обеспечивая другие источники надежной водой в засушливые годы. Ожидается, что в последние годы сокращение ледников приведет

к уменьшению речного стока в сухой летний сезон (Hagg, 2007: 40; Li, 2016: 139).

Бассейны рек Ақсу, Биен, Лепсы и Басқан расположены в северной части Жетысуского Алатау, западная и восточная части окружены сухой прибалхашской низменностью и пустынями (рисунок 1), где орошение в период вегетации часто зависит от таяния ледников (Kaser G., 2010: 20; Вилесов Е.Н., Северский И.В., 2013: 12). В этом регионе для орошения интенсивно используются воды рек Ақсу, Биен Лепсы, Басқан и др. В бассейнах этих рек водозабор на орошение почти 200 тыс. га оценивается в 1,3 км³/год (Вилесов Е.Н., Северский И.В., 2013: 12; Вилесов Е.Н., 2017: 41). Несмотря на важность ледников для региональной экономики, информация о фактическом состоянии ледников в Центральной Азии остается скудной. После распада СССР в 1990-х годах регулярные балансовые массы ледников и другие наземные гляциологические измерения в бассейнах рек Ақсу, Биен Лепсы и Басқан, как и во всем горном массиве Жетысуского Алатау, были прекращены.

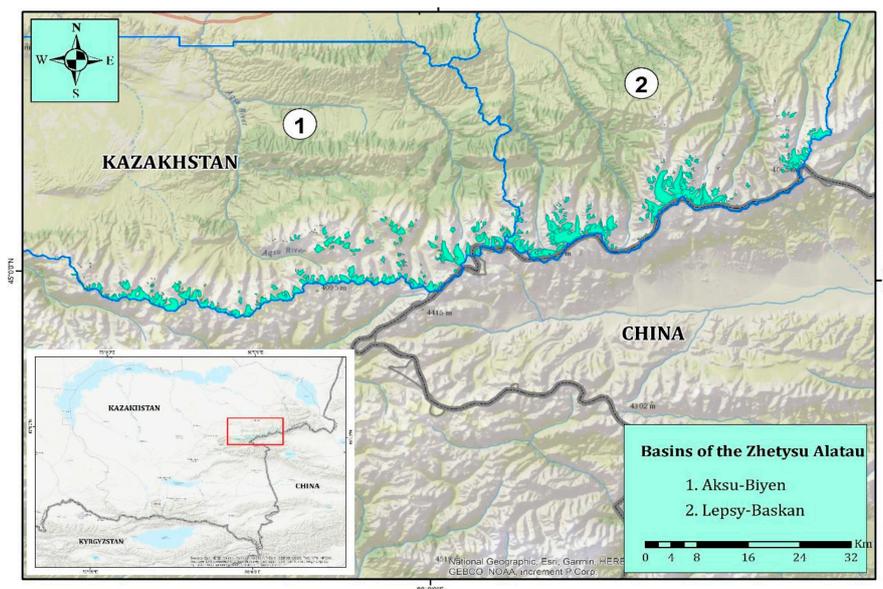


Рисунок 1 – Карта территорий исследования. Карта, основанная на Национальной географической карте мира. Бассейны: 1. Аксу-Биен 2. Лепсы-Баскан

Первая подробная инвентаризация ледников «Каталог ледников» (Каталог Ледников СССР, 1980 г.) была опубликована в 1980 г. и основывалась на аэрофотосъемке 1956 г. Черкасов (2004 г.) составил вторую инвентаризацию ледников с использованием топографических карт на 1: 25 000 масштаб, основанный на аэрофотоснимках, сделанных в 1972 году, и еще два ограниченных исследования ледников, проведенных в 1990-х и 2000-х годах. Эти описи, однако, остались неопубликованными отчетами (Вилесов Е.Н., Северский И.В, 2013: 12).

Тем не менее, анализ изменения ледников для всего Жетысуского Алатау был проведен несколькими авторами, которые в 1956-2000 годах оценивали сокращение площади ледников в бассейне рек Аксу и Лепсы на 34% (Вилесов Е.Н., 2013: 12; Kaldybayev, 2016: 11). Кроме того, Северский и другие (Severskiy, 2016: 382) провели анализ ледниковых изменений для всего Жетысуского Алатау, по исследованиям которых в 1956-2011 годах изменение площади ледников в бассейне рек Аксу, Биен Лепсы и Баскан оценивалось сокращением на 36,69%.

Таким образом, изменения площади поверхности ледников Жетысуского Алатау, в том числе отдельных бассейнов, остаются малоизученными.

Цель данной работы – на основе данных ДЗЗ проанализировать динамику изменения площадей ледников в бассейнах рек Аксу, Биен Лепсы и Баскан в северной части Жетысуского Алатау.

В этой статье представлен наш подробный анализ площади ледников бассейна рек Аксу, Биен Лепсы и Баскан за периоды 1956–2001, 2001–2012 и 2012–2016 годов с использованием хорошо зарекомендовавших себя полупавтоматических методов, основанных на соотношениях полос (Paul, 2013: 171).

Материалы и методы

Жетысуский Алатау (Джунгарский Алатау) – один из крупных и сложных по структуре горных систем, которая простирается с юго-запада на северо-восток вдоль государственной границы между Республикой Казахстан и Китайской Народной Республикой. Протяжённость составляет 450 км, ширина варьируется от 50 до 90 км, максимальная высота – 4622 м. Общая площадь Жетысуского Алатау, включая бассейн реки Боротала на территории Китайской Народной Республики, составляет около 40 000 км² (Вилесов Е.Н., 2013: 39). Продольные долины рек Коксу на западе и Боротала на востоке делят Жетысуский Алатау на два расположенных параллельно друг к другу крупных хребта (Северный Центральный и Южный Центральный). Бассейны рек Аксу, Биен, Лепсы и Баскан расположены в западной и центральной частях Северного Центрального хребта (Каталог ледников СССР, 1970: 84).

Жетысуский Алатау находится далеко от океанов, климат формируется на основе воздушных масс

арктического и умеренного поясов. На его климат влияет холодный арктический и горячий воздух с Туранской равнины. В зимний период арктические воздушные массы, поступающие с севера и северо-запада, приводят к снижению температуры воздуха в горной местности (Вилесов Е.Н., 2013: 12; Kaldybaev, 2016: 11). Умеренные воздушные массы, формирующиеся над территорией Западной Сибири, Казахстана и равниной Туран, круглогодично влияют на климат Жетысуского Алатау. Кроме того, горячие воздушные массы, влияющие на климат Жетысуского Алатау, образуются над равниной Туран, однако проникновение этих воздушных масс в летний период происходит крайне редко.

В предгорьях сложился более засушливый, континентальный климат. На высокогорных склонах климат умеренный: зима холодная, лето умеренно прохладное, средняя температура воздуха в январе -13° - -14° С. Среднегодовое количество осадков составляет 600-800 мм, аномальное количество осадков наблюдается в юго-восточной части – 400 мм. Специфика пространственного распределения атмосферных осадков на высоте 1800-2200 м над уровнем моря в горной зоне колеблется от 1000 мм до 1600 мм. (Каталог Ледников СССР, 1970: 84).

Мы использовали данные оптических спутников, таких как: Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM+), и Landsat 8 Operational Land Imager (OLI). Мы также использовали изображения высокого разрешения, доступные в Google Earth (спутник QuickBird), для определе-

ния контуров ледников и оценки точности. Все изображения были получены в конце сезона абляции – в период со 10 августа по 25 сентября – когда ледники в основном были свободны от сезонного снега в безоблачных условиях, но некоторые края ледников были скрыты тенями от скал и стен ледникового кара. Всего было использовано три сцены Landsat 7 (ETM+), за 2001–2012 гг., две сцены Landsat 8 (OLI) за 2015–2016 гг.

Изображения Landsat (уровень L1T) с географической привязкой были предоставлены Центром наблюдения и науки о ресурсах Земли (EROS) Геологической службы США и загружены с помощью инструмента EarthExplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Для улучшения качества снимков проведен процесс слияния каналов Pan-sharpening, где в качестве одного из входных данных использован панхроматический канал с разрешением 15 м (таблица 1).

Так как Landsat 8 OLI был выведен в орбиту только в 2013 году, а прибор Scan Line Corrector (SLC) в инструменте ETM+ (Landsat 7) вышел из строя в 2003 году, снимки ETM+ 2012 года требуют предварительную обработку, а именно процесс Gap filling, то есть заполнение пропущенных пикселей. Даная процедура была проведена в ПО ENVI с помощью модуля Gap Fill. В качестве «master file» были использованы снимки 2012 года, в качестве «slave file» – снимки 2011 года (рисунок 2).

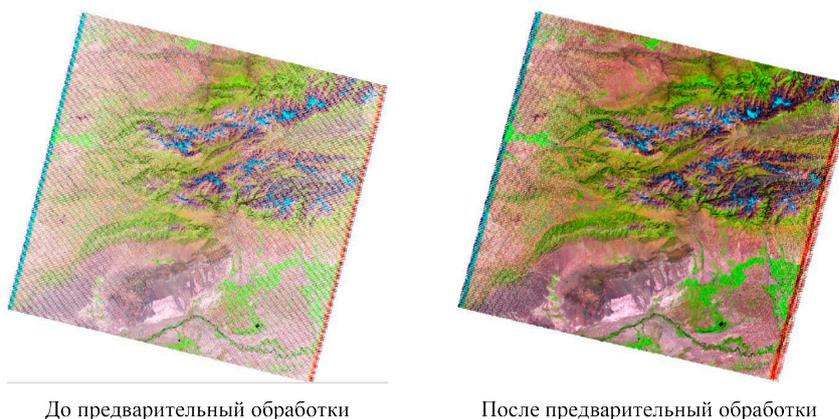


Рисунок 2 – До и после процесса Gap fill (2012)

Кроме того, дополнительно к космическим снимкам Landsat OLI 2016 года использовались снимки Landsat OLI 2015 года из-за улучшенной теневой обстановки, что,

в свою очередь, позволяет более детально картировать ледники.

Спутниковые изображения, доступные в Google Earth для определения контуров ледников,

служили инструментом визуального управления, причем данные поступали в основном с оптических датчиков с высоким разрешением, таких как QuickBird, Worldview, Pléiades 1A и 1B, а также SPOT 6 и SPOT 7 (GoogleEarth 2017), к сожалению, они были доступны не для всех регионов.

ЦМР ALOS PALSAR был использован для извлечения водосборов и топографической

информации для инвентаризации ледников. Также, при анализе динамики изменения площади ледников был использован 2-й выпуск 13-го тома каталога ледников СССР (ледники на территории Жетысуского Алатау) 1969, 1970, 1975 и 1980 годов, опубликованного на основе аэрофотоснимков 1956 года.

Таблица 1 – Список сцен Landsat, использованных в данном исследовании

WRS2 path-row	Даты	Спутник и датчик	Пространственное разрешение (м)	Пригодность сцен	Пригодность сцен
148-029	22 Августа 2001	Landsat ETM+	15/30/60	Главный	
148-029	03 сентября 2011	Landsat ETM+	15/30/60	Дополнительная информация	Заполнение полос
148-029	20 Августа 2012	Landsat ETM+	15/30/60	Главный	
148-029	24 сентября 2016	Landsat OLI	15/30/60	Главный	Сезонный снег, теневые территории
148-029	21 Августа 2015	Landsat OLI	15/30/60	Дополнительная информация	Теневые территории

Ученые использовали различные методы для извлечения границ ледников, включая ручную визуальную интерпретацию, метод порогового значения отношения полос, метод нормализованного индекса снежного покрова и метод порогового значения отношения полос в сочетании с визуальной интерпретацией (Robson, 2016: 67; Racoviteanu and Williams, 2012: 30; Rastner, 2014: 190; Bolch, 2007: 12; Paul, 2004: 4).

Исследования показали, что метод порогового значения отношения полос, основанный на мультиспектральных изображениях дистанционного зондирования в сочетании с визуальной интер-

претацией, относительно точен при выделении границ ледников.

Несколько презентаций на семинаре GLIMS продемонстрировали методы автоматического извлечения чистого или слегка загрязненного ледникового льда.

F. Paul (Paul, 2013: 171) далее провел тщательное сравнение различных методов, включая соотношения полос Landsat ETM +(Band 3 / Band 5, Band 4 / Band 5), Landsat OLI (Band 4 / Band 6, Band 5 / Band 6) (Рисунок 3), а также медианный фильтр и вычитание темных объектов (Paul and Kaab, 2005: 59).

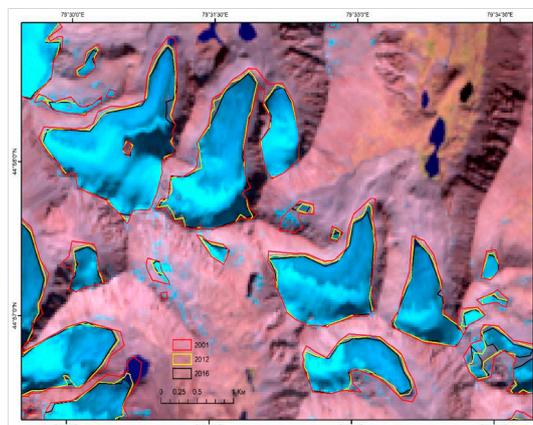


Рисунок 3 – Изменения ледников в бассейне реки Аксу с 2001 по 2016 год (Landsat OLI, 1 сентября 2016)

Согласно его исследованию, соотношения Landsat ETM +(TM 3/5) и Landsat OLI (OLI 4/6) являются надежным, простым и точным методом, отчасти даже лучшим, чем ручное разграничение (т.е. не обобщенным и непротиворечивым для всей сцены). Преимущество этого метода заключается в том, что чистый лед можно идентифицировать даже под тонкими облаками и в теневых областях (Рисунок 4в).

С учетом вышеуказанных методов исследования, в данной работе мы использовали соотношение полос в сочетании с методом ручной

корректировки для выделения границ ледников в районе Жетысуского Алатау. Во-первых, бинарные изображения площади ледника были получены с использованием соотношения полос (Landsat ETM +: Band 3 / Band 5, Landsat OLI: Band 4 / Band 6), а после повторных испытаний пороговое значение было выбрано в диапазоне 1,5 ~ 2,1. Между тем, меньшие элементы изображения были удалены с использованием среднего фильтра 3 на 3 (median filter), а затем преобразуется в векторный файл для дальнейшего редактирования (Рисунок 4 а,б,г).

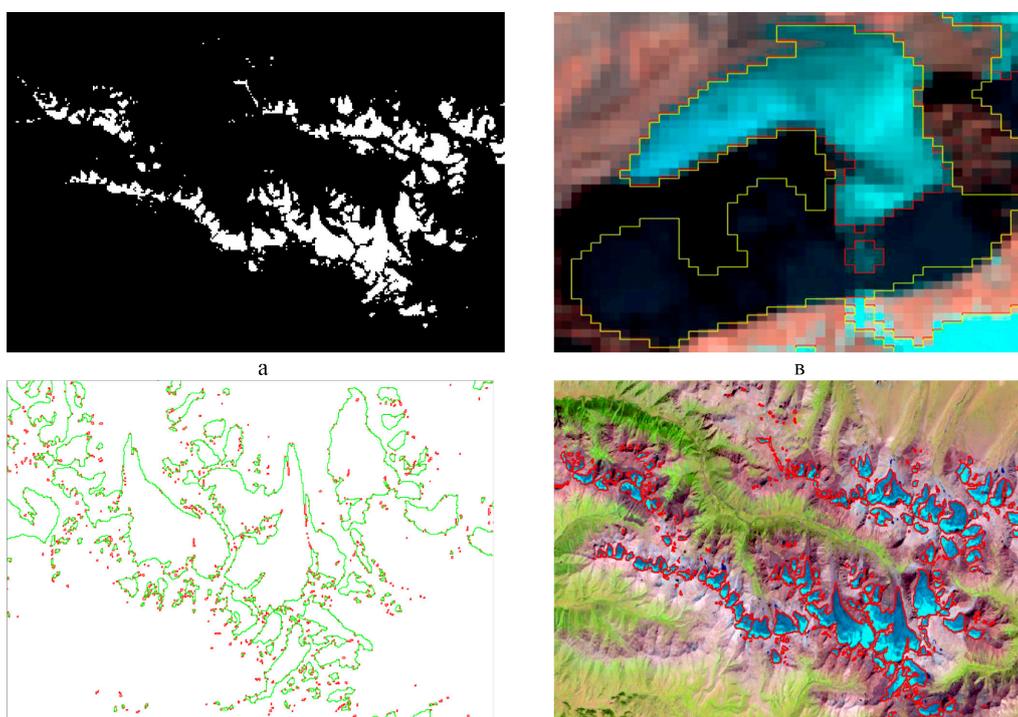


Рисунок 4 – Картографирования ледников с использованием полуавтоматической методики соотношения полос (band ratio). а) *TM3/TM5, OLI4/OLI6*; б) *после фильтрации (median filter 3x3)*, в) *картирование ледников в теневых местах*; г) *преобразование растра в векторный формат*

Из-за спектрального сходства обломков на ледниках и за их пределами до сих пор не существует метода автоматического картирования обломков большого количества ледников с использованием только оптических спутниковых изображений. Таким образом, в нескольких исследованиях были протестированы комбинированные подходы, которые обычно включают топографическую информацию, полученную из DEM и других данных (Robson, 2016: 67; Racoviteanu and Williams, 2012: 30; Ra-

stner, 2014: 190; Bolch, 2007: 12; Paul, 2004: 4). Однако все методы требуют длительной ручной постобработки, а качество результатов в некоторой степени зависит от опыта аналитика (Mölg, 2018: 18).

В данной работе в ходе определения контура языков ледников за 2001 год границы ледников были оцифрованы с помощью термального канала ETM+ (B6) и итоговый вектор был наложен на отмывку, полученную из ЦМР SRTM 1999 года. Так как за 2012 и 2016 годы не было дос-

тупного ЦМР, для оцифровки контура языков ледников был использован только термальный канал ETM+ (B6) и OLI (B10) соответственно. Конечные результаты были наложены в среду Google Earth и еще раз проанализированы.

Для картирования теневых областей мы использовали Band 2 с порогом 7400 (получено вручную) и SRTM HillShade, рассчитанный с использованием азимута солнца и других параметров, как в метаданных снимков Landsat. Мы получили ледники в теневых областях как пересечение $\text{Band } 2 > 7400$ и $\text{Hillshade} \leq 0$ (меньше или равно 0) (рисунок 4в).

Результаты и обсуждение

Характеристики распространения ледников

По данным Landsat за 2016 г. нами выявлено и нанесено на карту 232 ледника площадью более $0,005 \text{ км}^2$ общей площадью $165,5 \text{ км}^2$ из бассейна рек Аксу-Биен и Лепсы-Баскан в северной части Жетысуского Алатау. Из них 127 ледников с общей площадью $77,1 \text{ км}^2$ принадлежат бассейну рек Аксу – Биен, 105 ледников с общей площадью $88,4 \text{ км}^2$ сосредоточены в бассейне рек Лепсы – Баскан (таблица 2).

Таблица 2 - Изменения в количестве и площади ледников

Бассейны северной части Жетысуского Алатау	1956	2001	2012	2016	1956-2001	1956-2016	2001-2012	2001-2016	2012-2016	Средний размер в 2001/2016
	км ²	км ²	км ²	км ²	%	%	%	%	%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Аксу-Биен	140,5 (135)	93,4 (133)	83,1 (127)	77,1 (127)	-33,5 (-0,7)	-45,1 (-0,8)	-11 (-1)	-17,5 (-1,2)	-7,2 (-1,8)	0.70/0.60
Лепсы-Баскан	154 (116)	103,8 (112)	93,7 (111)	88,4 (105)	-32,6 (-0,7)	-42,6 (-0,7)	-9,7 (-0,9)	-14,9 (-1)	-5,7 (-1,4)	0.91/0.83
Общий	294.5 (251)	197.2 (245)	176.8 (238)	165.5 (232)	-33.0% (-0,7)	-43.8% (-0,7)	-10.3% (-0,9)	-16.1% (-1,0)	-6.4% (-1,6)	0,8/0,7,2
Ледники <0.005 км ²	4,8 (94)	2,4 (52)	2,1 (43)	1,7 (40)	-49.7 (-1,1)	-64.6 (-1,1)	-12.2 (-1,1)	-29.6% (-2)	-19.7 (-4,9)	0.04/0.03

Ледники малого и среднего размера многочисленны, но имеют ограниченный общий охват, в то время как меньшее количество крупных и крупнейших ледников составляют основную часть оледеневших районов. Средний размер ледника в бассейне рек Аксу-Биен составил $0,6 \text{ км}^2$, а ледники бассейна рек Лепсы-Баскан – $0,83 \text{ км}^2$, при этом преобладал ледник класса $1,0-5,0 \text{ км}^2$

с общей площадью $85,02 \text{ км}^2$ (рисунок 5а), что составляет $51,4\%$ от общей площади. Ледник размерного класса $0,1-0,5 \text{ км}^2$ имел наибольший показатель при количественном учете (90 ледников) в 2016 г. (рисунок 5б). Было всего четыре крупных ледника площадью от 5 до 10 км^2 , но они составляли $20,3\%$ общей площади оледенения в изучаемом регионе.

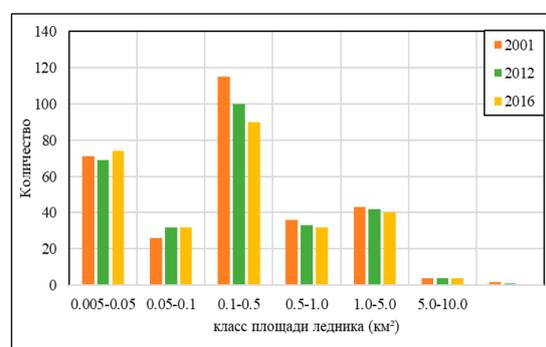
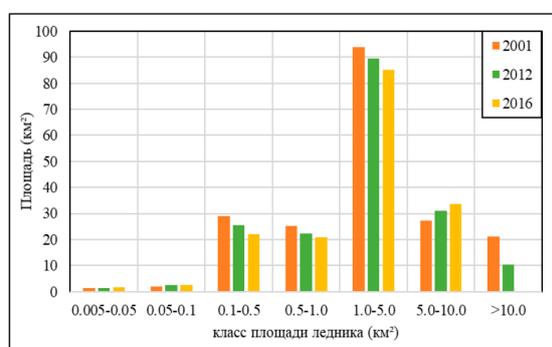


Рисунок 5 – Совокупные значения площади и количества ледников для семи размерных классов в северной части Жетысуского Алатау в 2001, 2012 и 2016 гг.

Распределение ледникового покрова было определено с помощью ALOS PALSAR DEM и показало небольшие различия между регионами. Большинство ледников были ориентированы на север (север, северо-запад и северо-восток) (рисунок 6) и располагались между 3200-4000 м над уровнем моря (рисунок 7). Расположения ледников по аспекту в исследуемой горной зоне более 35,2%

(2012-35,6%, 2001-34,4%) приходится на северную часть, 23,9% (2012-24,4%, 2001- 24,1%) – на северо-восток, 20,8% (2012-22%, 2001-21,5%) – на северо-западную часть. В восточной части расположено 7,2%, на западе – более 6%, на юго-востоке – около 2,5%, а наименее распространенными являются южная (1,7%) и юго-западная (более 2%) части (рисунок 6).

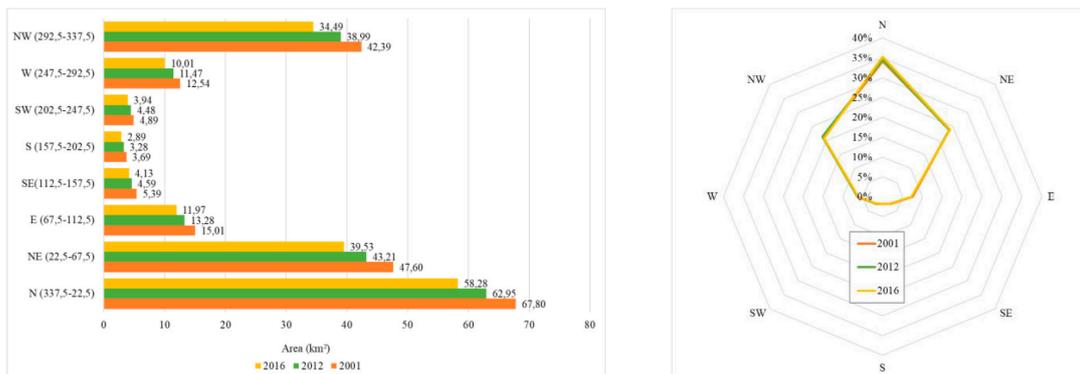


Рисунок 6 – Распределение площадей ледников и их изменение по экспозиции в бассейне рек Аксу-Биен, Лепсы-Баскан за 2001–2016 гг.

Наибольшая площадь ледников располагалась в районе 3400-3600 м над уровнем моря, и большинство из них было сосредоточено в бассейнах рек Саркан Баскан и Лепсы. Средняя высота ледников, которая является подходящим и широко используемым индикатором долгосрочной высоты линии равновесия (ELA) на основе топографических данных (Braithwaite and Raper, 2009: 127), находится на отметке 3550 м над уровнем моря. Ледники на более низких отметках располагались в основном в северо-

западном углу изучаемой территории (бассейн р. Биен), тогда как ледники на самых высоких отметках располагались в центральной части.

Подавляющее большинство ледников в исследуемой зоне сосредоточено в основном на высоте 3200-4000 м. По данным за 2016 год, 38,6% ледников в бассейнах рек Аксу-Биен и Лепсы-Баскан сосредоточены на высоте 3400-3600 м над уровнем моря. Также 27,5% ледников расположены на высоте 3600-3800 м, 15% – на высоте 3200-3400 м (рисунок 7).

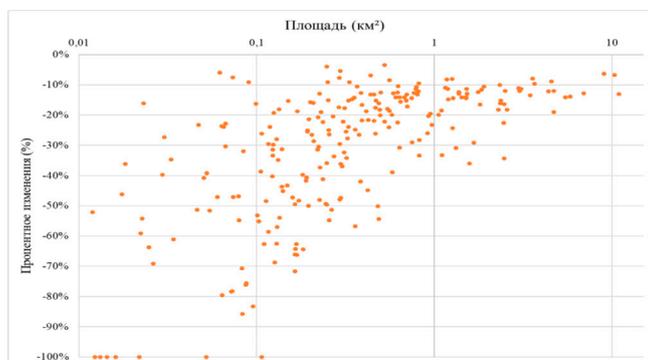


Рисунок 7 – Расположение ледников в зоне исследования на максимальной и минимальной высоте над уровнем моря

Изменения в площади ледников

Нами выявлено 245 ледников в 2001 г., 238 – в 2012 г. и 232 – в 2016 г., которые были занесены в Каталог ледников общей площадью 197,2, 176,8 и 165,5 км² соответственно. Кроме того, выявлены ледники с площадью менее 0,005 км², 52 – в 2001 г., 43 – в 2012 г. и 40 – в 2016 г. общей площадью 2,4, 2,1 и 1,7 км² (таблица 2).

Таким образом, суммарное изменение площади за период 1956–2001 гг., на территории исследования, составило 33%. Изменение площади за 2001–2012 гг. составило 10,3%, а изменение площади за 2012–2016 гг. составило 7,2%; за весь период общая площадь оледенения уменьшилась с 294,5 км² (251 ледник) в 1956 г. до 165,5 км² (232 ледника) в 2016 г., т. е. на 43,8% за 60 лет.

За период наших исследований не были обнаружены 19 ледников, занесенных в Каталог, и 54 незарегистрированных малых ледника. Все ледники непрерывно сокращались в течение всего периода исследования.

Наши результаты показывают, что потери площади ледников в бассейне рек Аксу-Биен и Лепсы-Баскан в 2001-2016 годах составили 16,1% (-1,07% годовых). В том числе, площадь ледников, расположенных в бассейне рек Аксу-Биен, за период 2001-2016 гг. сократилась на

17,5% (-1,2% годовых), а в бассейне рек Лепсы – Баскан составила 14,9% (-1% годовых).

Как отмечалось выше, в бассейне рек Лепсы и Баскан были самые большие ледники со средним размером 0,91 км², а в бассейне рек Аксу-Биен были самые маленькие ледники со средним размером 0,70 км². Аксу-Биен имел относительно высокую скорость сокращения за период 2001-2016 гг. по сравнению с остальными бассейнами.

Анализ относительного изменения площади по сравнению с начальной площадью ледника указывает на большую потерю ледников меньшего размера (рисунок 8). Однако был большой разброс потерь, особенно для более мелких ледников, в то время как во всех классах размеров были ледники, которые уменьшились лишь незначительно. Абсолютная потеря площади была выше для более крупных ледников (рисунок 9), а средняя высота ледника увеличилась на 25 м, в то время как средняя минимальная высота ледников увеличилась на 28 м – с 3359 до 3397 м над уровнем моря за 2001–2016 гг. На всех высотах отмечено сокращение площади ледников в период 2001–2016 гг. (рисунок 10). Ледники, сосредоточенные в западной экспозиционной стороне, уменьшились на 20,18%, северо-западные – на 18,64%, а северные – на 14% и северо-восточные уменьшились на ±17%.

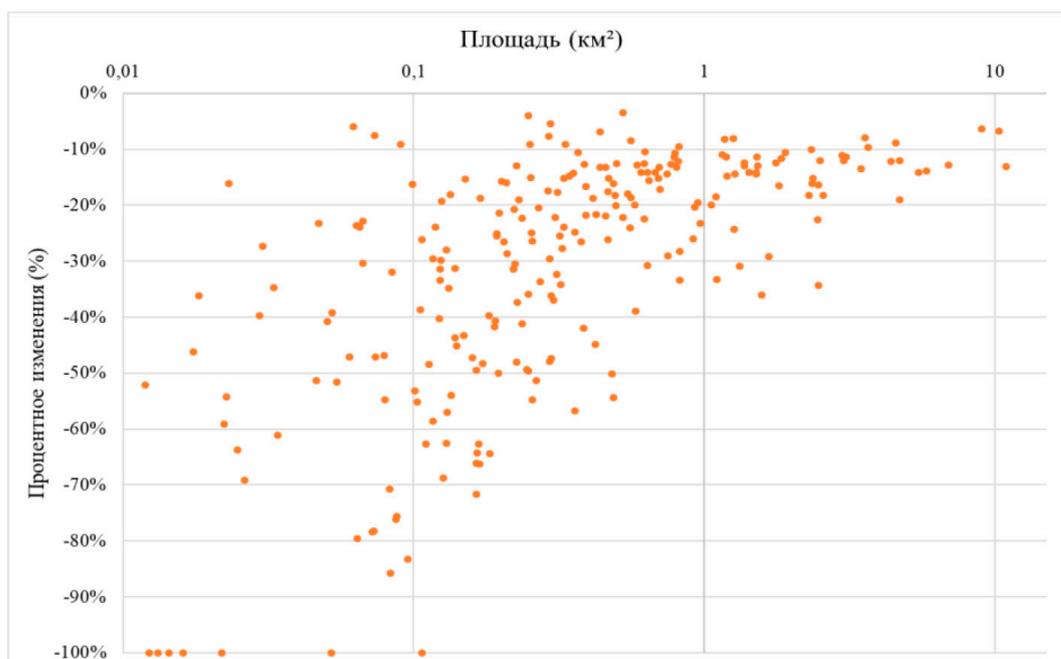


Рисунок 8 – Точечная диаграмма относительных изменений площади ледника по сравнению с первоначальным размером ледника для 245 ледников в период 2001–2016 гг.

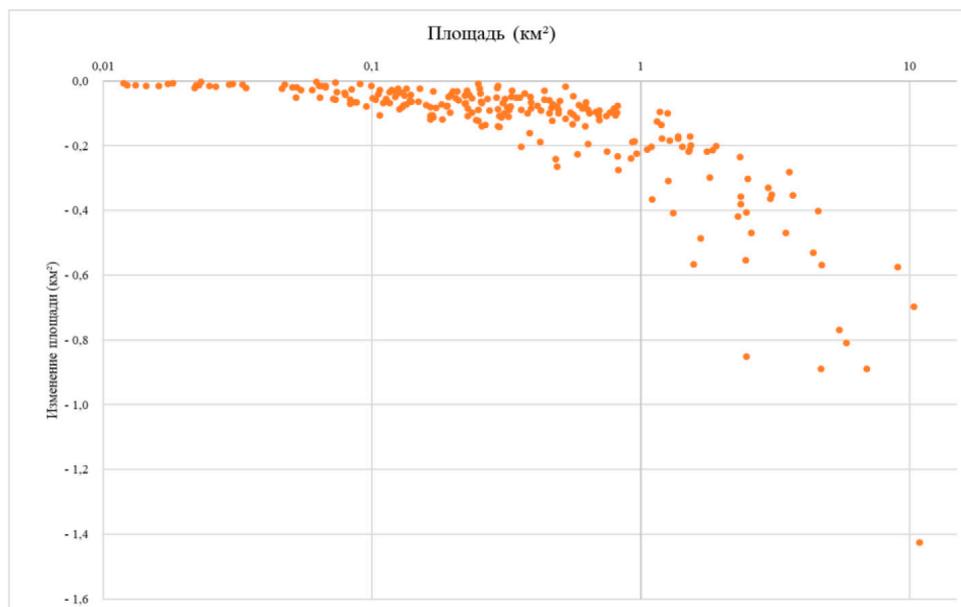


Рисунок 9 – Диаграмма рассеяния абсолютных изменений площади ледника в зависимости от его исходного размера в 2001–2016 гг.

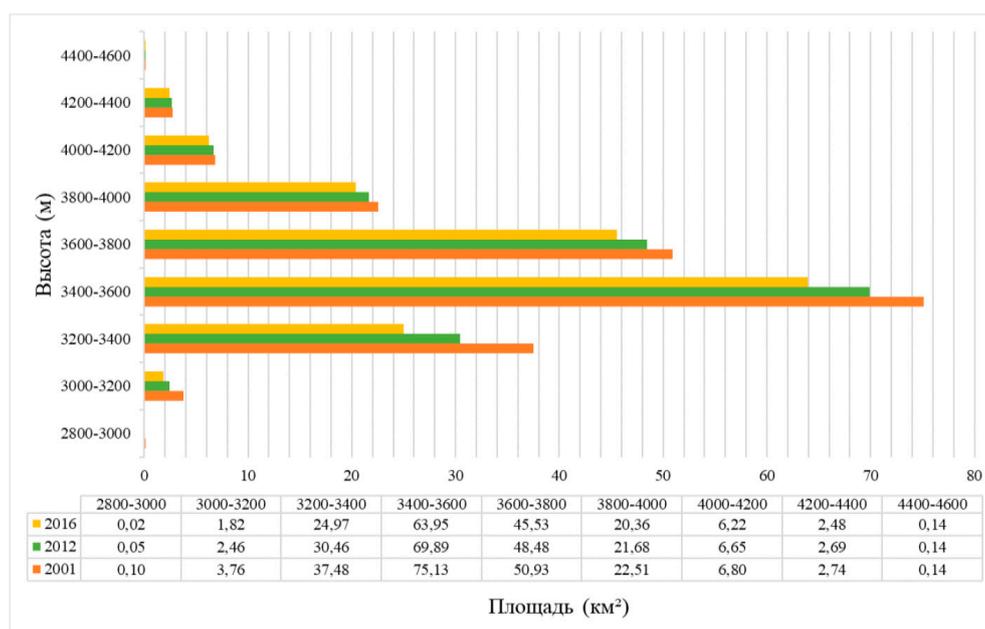


Рисунок 10 – Распределение площадей ледников и их изменение в зависимости от интервала высот в бассейнах рек Аксу-Биен и Лепсы-Баскан

Изменения площади исследованных ледников подтвердили ожидаемую и широко опубликованную тенденцию к сокращению ледников (Sorg и др., 2012; Unger-Shayesteh и др., 2013, He и др., 2015).

Результаты нашего исследования показали, что годовой показатель сокращения площади ледников в бассейне рек Аксу-Биен и Лепсы-Баскан за период 1956-2001 и 2001-2016 годов составил 0,7-1%, данный показатель схож с

другими оледененными районами Жетысуского Алатау (He, 2015: 11; Severskiy, 2016: 382).

Северский и другие (Severskiy, 2016: 382) провели детальные исследования динамики изменения ледникового покрова для всех регионов Жетысуского Алатау за период с 1956 по 2011 год и показали, что скорость годового сокращения ледников в бассейнах рек Аксу-Биен и Лепсы-Баскан составляет 0,7%. При этом было отмечено, что скорость интенсивного сокращения ледников в горной системе наблюдается в основном в бассейнах Южного Жетысуского Алатау, а наименьшая – в орографических закрытых бассейнах.

He и другие (He, 2015: 11) проанализировали динамику изменения ледникового покрова в восточной части Жетысуского Алатау (КНР) в 1990-2012 гг. По их исследованиям, в период с 1989 по 2012 год общая площадь ледников восточной части Жетысуского Алатау уменьшилась на 16%, а скорость годового сокращения составила 0,73%.

Выводы

Это исследование демонстрирует научную ценность подробного многовременного дистанционного анализа изменений ледников в бассейнах рек Аксу-Биен и Лепсы-Баскан, в котором в настоящее время отсутствуют достаточные записи данных наблюдений. Данные, использованные в нашем исследовании, включали спутниковые снимки (разрешение 30 м) и ALOS PALSAR (разрешение 12,5 м). Метод порогового соотношения (TM3/TM5, OLI4/OLI6)

и визуальная интерпретация хорошо зарекомендовали себя для определения границ ледникового покрова в исследуемой области. В бассейне выявлено 245 ледников общей площадью 197,2 км² в 2001 г., которая к 2016 г. уменьшилась до 165,5 км², потеря составляет 31,7 км² (скорость сокращения – 1 % годовых).

Наши результаты показывают более высокие темпы сокращения для изучаемой территории, чем для некоторых других оледенелых районов Тянь-Шаня. Это явление, вероятно, связано не только с расположением исследуемого нами района на периферии Жетысуского Алатау, имевшей менее благоприятные климатические условия, чем внутренние хребты, но и с меньшими размерами ледника при полном отсутствии щебнистого покрова. Различия в сокращении площади ледников между суббассейнами можно объяснить различиями в размерах, ориентации и местных климатических условиях. В период исследований новые ледники не образовывались. Ясно, что сложные взаимодействия ледников и климата нуждаются в дальнейшем изучении.

Благодарность

Данная работа была выполнена в рамках проекта за счет грантового финансирования 2020-2022 КН МОН РК (Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан) «Оценка баланса массы ледников в региональном масштабе и инвентаризация каменных глетчеров Жетысуского Алатау с использованием данных дистанционного зондирования» ИРН AP08856470.

Литература

- Armstrong, R. L. (2010). The glaciers of the Hindu Kush-Himalayan region: a summary of the science regarding glacier melt/retreat in the Himalayan, Hindu Kush, Karakoram, Pamir, and Tien Shan mountain ranges. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD): 20.
- Bolch T (2007) Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote-sensing data. *Global Planet. Change*, 56(1–2): 1–12 (doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.009)
- Braithwaite, R. J., & Raper, S. C. B. (2009). Estimating equilibrium-line altitude (ELA) from glacier inventory data. *Annals of Glaciology*, 50(53): 127-132.
- Вилесов Е. Н., Северский И. В. Деградация оледенения Джунгарского (Жетысу) Алатау во второй половине XX в // Лёд и снег. – 2013. – Т. 53. – №. 2: 12-20.
- Вилесов, Е. Н. Деградация современного оледенения Джунгарского Алатау // Bulletin d'EUROTALENT-FIDJIP 4 (2017): 41-51.
- Вилесов Е. Н., Морозова В. И., Северский И. В. Оледенение Джунгарского (Жетысу) Алатау: прошлое, настоящее, будущее. – Алматы: изд. КазНУ, 2013: 39-41.
- Viviroli, D., Weingartner, R., & Messerli, B. (2003). Assessing the hydrological significance of the world's mountains. *Mountain research and Development*, 23(1): 32-40.
- Kaldybayev, A., Chen, Y., & Vilesov, E. (2016). Glacier change in the Karatal river basin, Zhetysu (Dzhungar) Alatau, Kazakhstan. *Annals of Glaciology*, 57(71):11-19.
- Каталог ледников СССР. Т. 13. Вып. 2. Ч. 6. Бассейны рек Биен, Аксу, Лепсы. – Л.: Гидрометеоздат, 1970:84.

- Kaser G, Großhauser M and Marzeion B (2010) Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proc. Natl Acad. Sci. USA (PNAS)*, 107: 20 223–20 227
- Li, K., Li, Z., Wang, C., & Huai, B. (2016). Shrinkage of Mt. Bogda Glaciers of Eastern Tian Shan in Central Asia during 1962–2006. *Journal of Earth Science*, 27(1): 139-150.
- Mölg, N., Bolch, T., Rastner, P., Strozzi, T., & Paul, F. (2018). A consistent glacier inventory for Karakoram and Pamir derived from Landsat: 1807–1827.
- Narama, C., Kääh, A., Duishonakunov, M., & Abdrakhmatov, K. (2010). Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~ 1970), Landsat (~ 2000), and ALOS (~ 2007) satellite data. *Global and Planetary Change*, 71(1-2): 42-54.
- Paul F and others (2013) On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Ann. Glaciol.*, 54(63 Pt 1): 171–182 (doi: 10.3189/2013AoG63A296)
- Paul F., Kääh A. Perspectives on the production of a glacier inventory from multispectral satellite data in Arctic Canada: Cumberland Peninsula, Baffin Island // *Annals of Glaciology*. – 2005. – T. 42: 59-66.
- Paul F, Kääh A, Maisch M, Kellenberger T and Haerberli W (2004) Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, 31(21), L21402. – P. 4. (doi: 10.1029/2004GL020816) data: distribution of debris cover and mapping challenges. *Earth System Science Data*, 10(4): 1807-1827.
- Racoviteanu A., Williams M. W. Decision tree and texture analysis for mapping debris-covered glaciers in the Kangchenjunga area, Eastern Himalaya // *Remote sensing*. – 2012. – T. 4. – №. 10: 3078-3109.
- Rastner P. The local glaciers and ice caps on Greenland: their mapping, separation from the ice sheet and their climate sensitivity: дис. – University of Zurich, 2014: 190.
- Robson B. A. et al. Decadal scale changes in glacier area in the Hohe Tauern national park (Austria) determined by object-based image analysis // *Remote Sensing*. – 2016. – T. 8. – №. 1: 67.
- Severskiy, I., Vilesov, E., Armstrong, R., Kokarev, A., Kogutenko, L., Usmanova, Z., ... & Raup, B. (2016). Changes in glaciation of the Balkhash–Alakol basin, central Asia, over recent decades. *Annals of Glaciology*, 57(71): 382-394.
- Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O., & Beniston, M. (2012). Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2(10): 725-731.
- Farinotti, D., Longuevergne, L., Moholdt, G., Duethmann, D., Mölg, T., Bolch, T., ... & Güntner, A. (2015). Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. *Nature Geoscience*, 8(9): 716-722.
- Hagg, W., Braun, L. N., Kuhn, M., & Nesgaard, T. I. (2007). Modelling of hydrological response to climate change in glacierized Central Asian catchments. *Journal of Hydrology*, 332(1-2). – P. 40-53.
- He, Y., Yang, T. B., Ji, Q., Chen, J., Zhao, G., & Shao, W. W. (2015). Glacier variation in response to climate change in Chinese Tianshan Mountains from 1989 to 2012. *Journal of Mountain science*, 12(5): 1189-1202.

References

- Armstrong, R. L. (2010). The glaciers of the Hindu Kush-Himalayan region: a summary of the science regarding glacier melt/retreat in the Himalayan, Hindu Kush, Karakoram, Pamir, and Tien Shan mountain ranges. *International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD)*: 20.
- Bolch T (2007) Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote-sensing data. *Global Planet. Change*, 56(1–2): 1–12 (doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.009)
- Braithwaite, R. J., & Raper, S. C. B. (2009). Estimating equilibrium-line altitude (ELA) from glacier inventory data. *Annals of Glaciology*, 50(53): 127-132.
- Vilesov Ye. N., Severskiy I. V. Degradatsiya oledeniya Dzhungarskogo (Zhetysu) Alatau vo vtoroy polovine KHKH v // *Lod i sneg*. – 2013. – T. 53. – №. 2:12-20. (In Russian).
- Vilesov, Ye. N. “Degradatsiya sovremennogo oledeniya Dzhungarskogo Alatau.” *Bulletin d’EUROTALENT-FIDJIP 4* (2017): 41-51. (In Russian).
- Vilesov Ye. N., Morozova V. I., Severskiy I. V. Oledeniye Dzhungarskogo (Zhetysu) Alatau: proshloye, nastoyashcheye, budushcheye // *Almaty: izd. KazNU*. – 2013: 39-41. (In Russian).
- Viviroli, D., Weingartner, R., & Messerli, B. (2003). Assessing the hydrological significance of the world’s mountains. *Mountain research and Development*, 23(1): 32-40.
- Kaldybayev, A., Chen, Y., & Vilesov, E. (2016). Glacier change in the Karatal river basin, Zhetysu (Dzhungar) Alatau, Kazakhstan. *Annals of Glaciology*, 57(71):11-19.
- Katalog lednikov SSSR. T. 13. Vyp. 2. CH. 6. Basseyny rek Biyen, Aksu, Lepsy. L.: Gidrometeoizdat, 1970: 84. (In Russian).
- Kaser G, Großhauser M and Marzeion B (2010) Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proc. Natl Acad. Sci. USA (PNAS)*, 107: 20 223–20 227
- Li, K., Li, Z., Wang, C., & Huai, B. (2016). Shrinkage of Mt. Bogda Glaciers of Eastern Tian Shan in Central Asia during 1962–2006. *Journal of Earth Science*, 27(1): 139-150.
- Mölg, N., Bolch, T., Rastner, P., Strozzi, T., & Paul, F. (2018). A consistent glacier inventory for Karakoram and Pamir derived from Landsat: 1807–1827.
- Narama, C., Kääh, A., Duishonakunov, M., & Abdrakhmatov, K. (2010). Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~ 1970), Landsat (~ 2000), and ALOS (~ 2007) satellite data. *Global and Planetary Change*, 71(1-2): 42-54.
- Paul F and others (2013) On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Ann. Glaciol.*, 54(63 Pt 1): 171–182 (doi: 10.3189/2013AoG63A296)
- Paul F., Kääh A. Perspectives on the production of a glacier inventory from multispectral satellite data in Arctic Canada: Cumberland Peninsula, Baffin Island // *Annals of Glaciology*. – 2005. – T. 42: 59-66.

Paul F, Kačub A, Maisch M, Kellenberger T and Haeberli W (2004) Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, 31(21), L21402. – P. 4. (doi: 10.1029/2004GL020816) data: distribution of debris cover and mapping challenges. *Earth System Science Data*, 10(4): 1807-1827.

Racoviteanu A., Williams M. W. Decision tree and texture analysis for mapping debris-covered glaciers in the Kangchenjunga area, Eastern Himalaya //Remote sensing. – 2012. – Т. 4. – №. 10: 3078-3109.

Rastner P. The local glaciers and ice caps on Greenland: their mapping, separation from the ice sheet and their climate sensitivity: дис. – University of Zurich, 2014: 190.

Robson B. A. et al. Decadal scale changes in glacier area in the Hohe Tauern national park (Austria) determined by object-based image analysis //Remote Sensing. – 2016. – Т. 8. – №. 1: 67.

Severskiy, I., Vilesov, E., Armstrong, R., Kokarev, A., Kogutenko, L., Usmanova, Z., ... & Raup, B. (2016). Changes in glaciation of the Balkhash–Alakol basin, central Asia, over recent decades. *Annals of Glaciology*, 57(71): 382-394.

Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O., & Beniston, M. (2012). Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2(10): 725-731.

Farinotti, D., Longuevergne, L., Moholdt, G., Duethmann, D., Mölg, T., Bolch, T., ... & Güntner, A. (2015). Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. *Nature Geoscience*, 8(9): 716-722.

Hagg, W., Braun, L. N., Kuhn, M., & Nesgaard, T. I. (2007). Modelling of hydrological response to climate change in glacierized Central Asian catchments. *Journal of Hydrology*, 332(1-2). – P. 40-53.

He, Y., Yang, T. B., Ji, Q., Chen, J., Zhao, G., & Shao, W. W. (2015). Glacier variation in response to climate change in Chinese Tianshan Mountains from 1989 to 2012. *Journal of Mountain science*, 12(5): 1189-1202.