

Терехов А.Г., Долгих С.А.  
**Спутниковый мониторинг  
состояния снежников  
Северного Тянь-Шаня  
и Джунгарского Алатау  
в период 1993-2014 годов  
по данным LANDSAT 5,7,8**

По данным LANDSAT 5,7,8, за период 1993–2014 годов на 60 тестовых площадках, расположенных в пределах Заилийского Алатау, Кунгей Алатау и Джунгарского Алатау, проведен мониторинг сезонных минимумов площади снежников. Получены однородные ряды данные, диагностирующие многолетнюю динамику снежности высокогорных территорий в период 1994–2014 годов. Регистрируется слабовыраженная тенденция на уменьшение снежности Заилийского Алатау и Кунгей Алатау и отсутствие тренда в Джунгарском Алатау.

**Ключевые слова:** дистанционные методы, спутниковый мониторинг, снимки LANDSAT, высокогорные снежники, снежность горных систем.

---

Terekhov A.G., Dolgikh S.A.  
**Space monitoring of mountain  
snowfield state in northern Tien  
Shanar and Jungar Alatau dur-  
ing 1993-2014 years on base of  
LANDSAT 5,7,8 data**

According LANDSAT 5,7,8 data for period 1993–2014 years the monitoring of season minimum of mountain snowfield was carried out on 60 test site located within northern Tien Shan and Jungar Alatau. The data sets that diagnose the dynamics of mountain snowfall were obtained for the period 1994–2014 years. The weak tendency to reduce snowfall in northern Tien Shan and no trend in Jungar Alatau were recorded.

**Key words:** remote sensing, satellite monitoring, LANDSAT images, mountain snowfield, snowfall mountains.

---

Терехов А.Г., Долгих С.А.  
**LANDSAT 5,7,8 мәліметі  
бойынша 1993-2014 жылдар  
аралығындағы Солтүстік  
Тянь-Шань мен Жоңғар  
Алатауының қарлы жерлерінің  
спутникалық мониторингісі**

LANDSAT 5,7,8 мәліметінің 1993–2014 жылдар аралығы бойынша Іле-Алатау, Кунгей Алатау мен Жоңғар Алатауының қарлы жерлерінің, 60 тесттілік алаңдарының мезгілдік минимум көлемінің мониторингісі жүргізілген. 1994–2014 жылдар аралығы бойынша біркелікті қатарлар деректері шығарылған, олар биік таулардың қарлы жерлерінің серпінінің диагностикасын жүргізеді. Жоңғар Алатауында трендтерінің жоқтылығы байқалған және Іле-Алатау мен Кунгей Алатаудың қарлы жерлерінің азайған тенденциясы тіркелген.

**Түйін сөздер:** дистанциондық әдістер, спутникалық мониторинг, LANDSAT сүреттері, биік таулардағы қарлы жерлер, таулы жүйелерінің қарлылығы.

**СПУТНИКОВЫЙ  
МОНИТОРИНГ  
СОСТОЯНИЯ  
СНЕЖНИКОВ  
СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ  
И ДЖУНГАРСКОГО  
АЛАТАУ В ПЕРИОД  
1993-2014 ГОДОВ  
ПО ДАННЫМ LANDSAT  
5,7,8**

**Введение**

Экономика Центрально-Азиатских стран находится в сильной зависимости от температурно-влажностных условий высокогорной зоны Тянь-Шаня, где формируется основная часть регионального речного стока. Большая часть крупных рек имеет ледовое и снежно-ледовое питание. Величина речного стока зависит от сезонного запаса снега в высокогорных территориях. В маловодные годы возникает существенный дефицит воды для орошаемого земледелия. Трансграничный характер бассейнов основных рек создает ряд проблем, связанных как с системой вододеления между различными странами, так и с системой мониторинга высокогорной гляциальной зоны формирования стока.

Спутниковые методы диагностики состояния высокогорной гляциальной зоны способны давать объективную информацию о проективном покрытии территории льдом и снегом при безоблачной погоде [1-3]. Объектами мониторинга обычно являются горные ледники, динамика которых отражает многолетний климатический тренд [4-6]. Текущий тренд состояния ледников формируется отношением погодных условий последних десятилетий к средним климатическим условиям на временном масштабе полного обновления льда ледником. Для крупных ледников период полного обновления льда занимает сотни лет [7]. Сейчас происходит стаивание осадков попавших в зону аккумуляции еще в 1800-е годы, т.е. во времена последнего малого ледникового периода (1450-1850 гг.) [8]. Температурно-влажностный режим последних десятилетий менее благоприятен для формирования горного льда и снега, чем условия малого ледникового периода, что формирует доминирующий тренд на уменьшение площади горного оледенения Северного Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау [9-11].

Задачи мониторинга и прогноза водности года представляют большой практический интерес в связи с экономической значимостью информации об уровне водообеспеченности аридных территорий Средней Азии. Сезонный запас снега в горах участвует в формировании стока, а его количество зависит от погодных условий сезона в гляциальной зоне [12]. Проек-

тивное покрытие снегом горных территорий может эффективно диагностироваться с помощью спутников. Сезонный минимум проективного покрытия снега в горах Средней Азии наблюдается, примерно в августе-сентябре [13]. Позже весьма вероятны отдельные снегопады, маскирующие остаточные снежники. Время сезонного минимума снежного покрытия в горах совпадает с типичными для этой местности глубокими антициклонами, несущими очень ясную и сухую погоду [13].

Сезонный минимум проективного снежного покрытия в гляциальной зоне в многолетнем аспекте весьма динамичен. Сухие годы перемежаются влажными годами. Динамика горных ледников, вследствие их инертности и значительной задержки в реакции размера площади на погодно-климатические изменения, не может выступать в качестве устойчивого трассера водности года. Эту роль потенциально могла бы играть первая производная скорости изменения объема льда ледника. Однако трудности ее ежегодного измерения [14-15] с достаточной точностью затрудняют практическое использование этого параметра. Другим высокогорным гляциальным объектом, более динамично реагирующим на условия водности года, являются снежники.

Снежники формируются в холодное время года и концу летнего сезона представляют со-

бой скопления снега на границе снежной линии. Часто это скопления снега на гребнях с подветренной стороны, лавинные выносы или скопления фирна на плоских вершинах. В сухой год с повышенным температурным фоном к концу лета снежники полностью исчезают. В холодные, влажные годы они не успевают стаять и перезимовывают, занимая иногда значимую территорию, рис.1. Спутниковый мониторинг сезонного минимума относительной площади снежников может служить инструментом для диагностики текущих условий и многолетних тенденций температурно-влажностных условий высокогорной, гляциальной зоны [16].

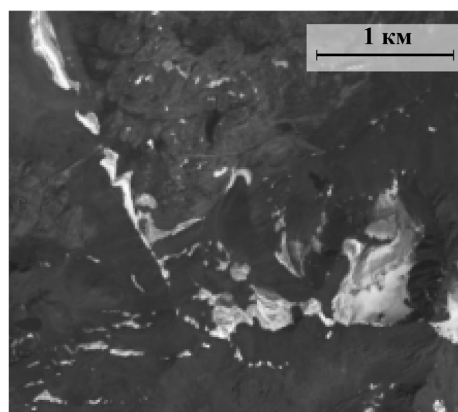
### Исходные данные и методы исследования

Многолетние архивы спектрзональных спутниковых снимков LANDSAT-5,7,8 с пространственным разрешением 30 м (размер сцены 180x180 км), доступные на свободной основе через интернет на сайте министерства геологии США [<http://glovis.usgs.gov>], способны обеспечить относительно регулярной информацией о состоянии снежно-ледового покрытия горных систем Средней Азии в период с 1993 года по текущий момент. Для Северного Тянь-Шаня имела спутниковая съемка в течение 16 лет (1999-2014 гг.), для Джунгарского Алатау – в течение 22 лет (1993-2014 гг.).

LANDSAT-8 (Pan) [разрешение 15 м]



30 июля 2013



2 августа 2014

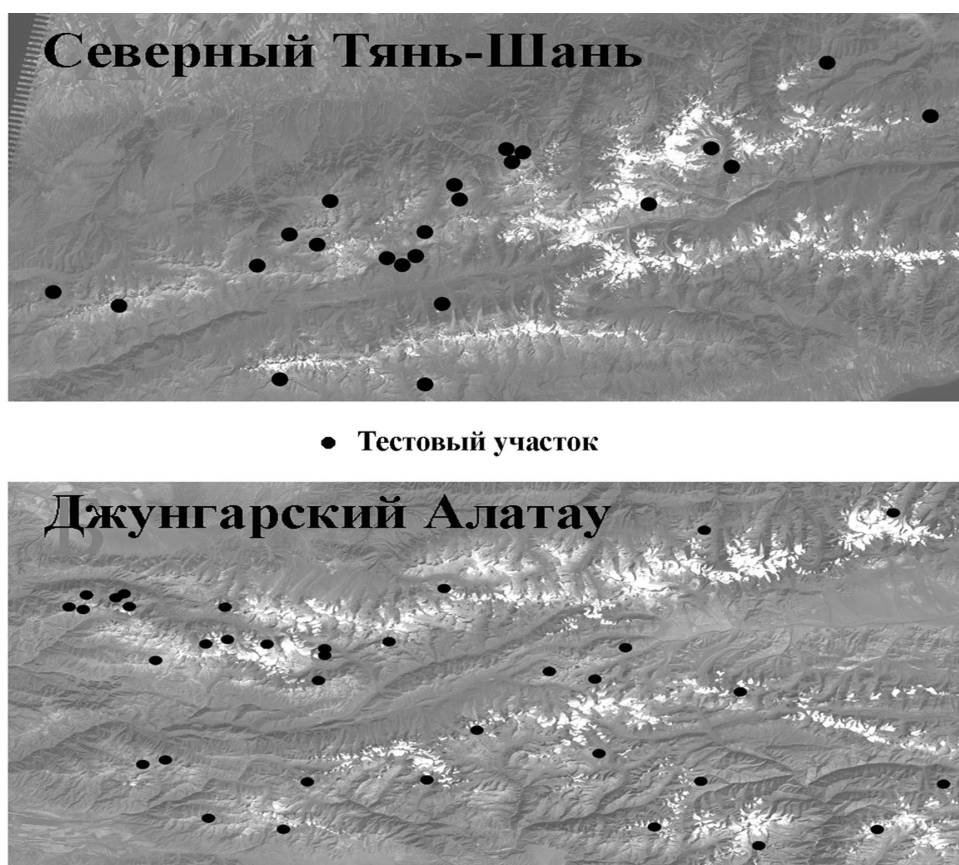
**Рисунок 1** – Примеры сезонного минимума проективного покрытия снегом высокогорных территорий в контрастные по погодным условиям годы. Фрагмент территории Джунгарского Алатау: 2013 – площадь снежников, в среднем, составляла 1,9 многолетних норм. 2014 – площадь снежников в среднем не превышала 0,5 многолетней нормы. Спутниковая информация взята с сайта [<http://glovis.usgs.gov>]

Климатическая особенность Средней Азии характеризуется формированием обширных и устойчивых антициклонов в период августа-сентября. В это время наблюдается сезонный минимум снежного покрытия, что позволяет практически каждый год иметь безоблачную съемку высокогорных территорий для диагностики состояния снежно-ледового покрова. В случае отсутствия безоблачной съемки в оптимальное время (август–сентябрь), по возможности, использовались залеты июля или октября.

*Спутниковые данные.* Спутниковые данные LANDSAT- 5,7,8 с разрешением 30 м взятые с Интернет ресурса [<http://glovis.usgs.gov>] использовались для картирования сезонных минимумов относительных размеров снежников в высокогорной зоне. Привлекались снимки по двум сеновым позициям (WRS-2: path/row): сцена 148/29 – покрывающая западную часть Джунгарского Алатау и 149/30 – покрывающая большую часть Заилийского Алатау и Кунгей Алатау.

По позиции [WRS-2: 148/29] использовался 21 снимок спутников Landsat 5,7,8 периода 1993–2014 гг. Были представлены все года, за исключением 1995 года, для которого подходящая съемка отсутствовала. Календарные даты залетов спутников: 8.08.1993, 11.08.1994, 1.08.1996, 2.09.1997, 22.08.1998, 17.08.1999, 4.09.2000, 22.08.2001, 25.08.2002, 12.08.2003, 14.08.2004, 1.08.2005, 20.08.2006, 31.08.2007, 9.08.2008, 12.08.2009, 31.08.2010, 17.07.2011, 21.08.2012, 30.07.2013, 2.08.2014.

По позиции [WRS-2: 149/30] использовалось 20 снимков спутников Landsat 5,7,8 периода 1999–2014 гг. Представлена съемка для каждого года этого периода. Календарные даты залета спутников: 9.09.1999, 9.07.2000, 26.08.2000, 26.06.2001, 3.10.2002, 20.09.2003, 6.09.2004, 7.07.2005, 11.10.2005, 19.08.2006, 7.09.2007, 1.09.2008, 17.09.2008, 14.10.2009, 22.10.2009, 15.10.2010, 24.07.2011, 12.08.2012, 6.08.2013, 9.08.2014.



**Рисунок 2** – Расположение тестовых полигонов в Джунгарском Алатау и Северном Тянь-Шане. В качестве основы использованы безоблачные сцены Landsat 8. Спутниковая информация взята с сайта [<http://glovis.usgs.gov>]



### Район исследования

Мониторинг площадей сезонного минимума снежного покрытия в гляциальной зоне Северного Тянь-Шаня (сцена Landsat [path\row: 149x30]) проводился совместно для горных хребтов Заилийского Алатау и Кунгей Алатау (рис.2). Хребты расположены на территории Казахстана и Киргизии. Фрагмент Джунгарского Алатау, расположенный в пределах сцены Landsat [path\row: 148x29]), относится к территории Казахстана и КНР (рис.2). Обе горные системы имеют существенное региональное оледенение. Площадь ледников Заилийского Алатау и Кунгей Алатау составляет около 600 км<sup>2</sup>, Джунгарского Алатау – около 1000 км<sup>2</sup>.

Разделение снежников от ледников требует тщательного экспертного анализа. Поэтому система мониторинга размеров снежников строилась через анализ отдельных площадок (выделов), на которых снежники являлись доминирующей формой. Система Google-Earth создает хорошие условия для выбора тестовых площадок. Сверхвысокое разрешение базового спутникового покрытия с возможностью контроля абсолютных высот и географических координат позволяет формировать набор тестовых площадок с заданными характеристиками. Джунгарский Алатау был представлен 36 тестовыми площадками, для Заилийского Алатау и Кунгей Алатау было выбрано 24 площадки.

### Методика обработки данных

Многозональные данные спутников LANDSAT-5,7,8 для основных оптических каналов имеют пространственное разрешение 30 м. Каналы 2,3,4 в оптическом диапазоне с характеристиками: 2: 520-600 нм; 3: 630-690 нм; 4: 760-900 нм использовались для построения псевдоцветного композита с RGB-432. Экспертное дешифрирование снежного покрова в рамках тестовых площадок использовалось для картирования снежников и расчете их площади в относительных единицах. Текущий уровень снежного покрытия нормировался на средний многолетний размер снежника выдела в период мониторинга для получения оценок сопоставимых по всем площадкам. В случае помех облачного покрова использовался другой снимок, с близкой датой, при его отсутствии характеристика по проектив-

ному покрытию снежника в данный год для площадки не определялась.

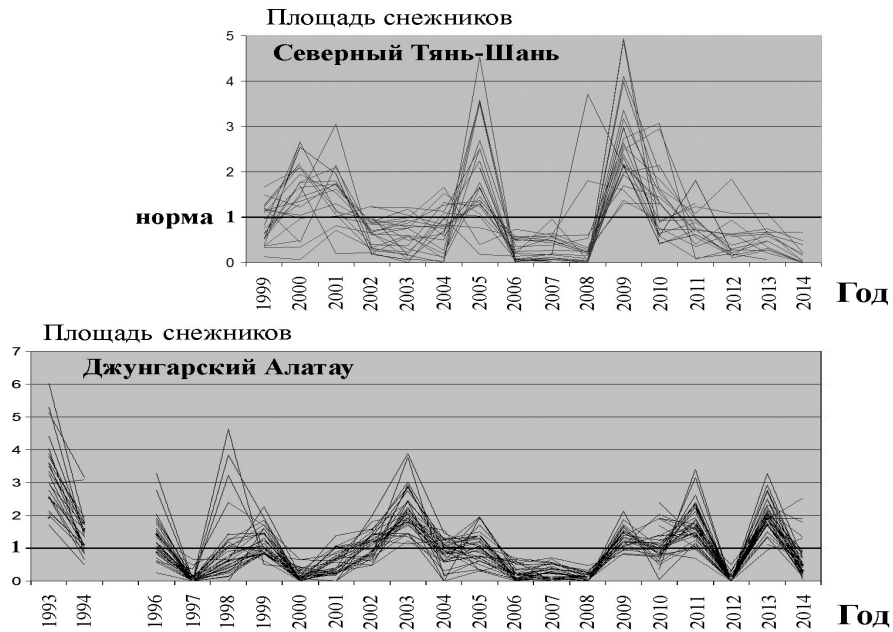
Анализ проводился отдельно для двух горных систем. Заилийского Алатау совместно с Кунгей Алатау, период – с 1999 по 2014 годы, по 24 тестовым площадкам (рис. 2(а)) и Джунгарского Алатау, период – 1993-2014 годы, 36 тестовых площадок (рис. 2(б)).

### Результаты и обсуждение

Каждая тестовая площадка в период мониторинга ежегодно характеризовалась величиной сезонного минимума площади снежника, выраженной в относительных единицах. Две группы кривых эволюции размеров снежников по тестовым площадкам отдельно для Заилийского Алатау – Кунгей Алатау и Джунгарского Алатау представлены на рис.3. Результирующие данные по динамике средних размеров снежников для анализируемых горных районах в период 1998-2011 показаны на рис.4.

Средний размер снежников в пределах Северного Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау имеет многолетние вариации с размахом до 3 норм, рис.4. Анализ показал, что период 1994-2014 гг. не имел сколько-нибудь выраженного тренда в изменении снежности Джунгарского Алатау (если не брать в расчет аномально влажный 1993 год). В то же время, период 1999-2014 гг. для Северного Тянь-Шаня характеризовался слабо выраженным трендом на уменьшение снежности.

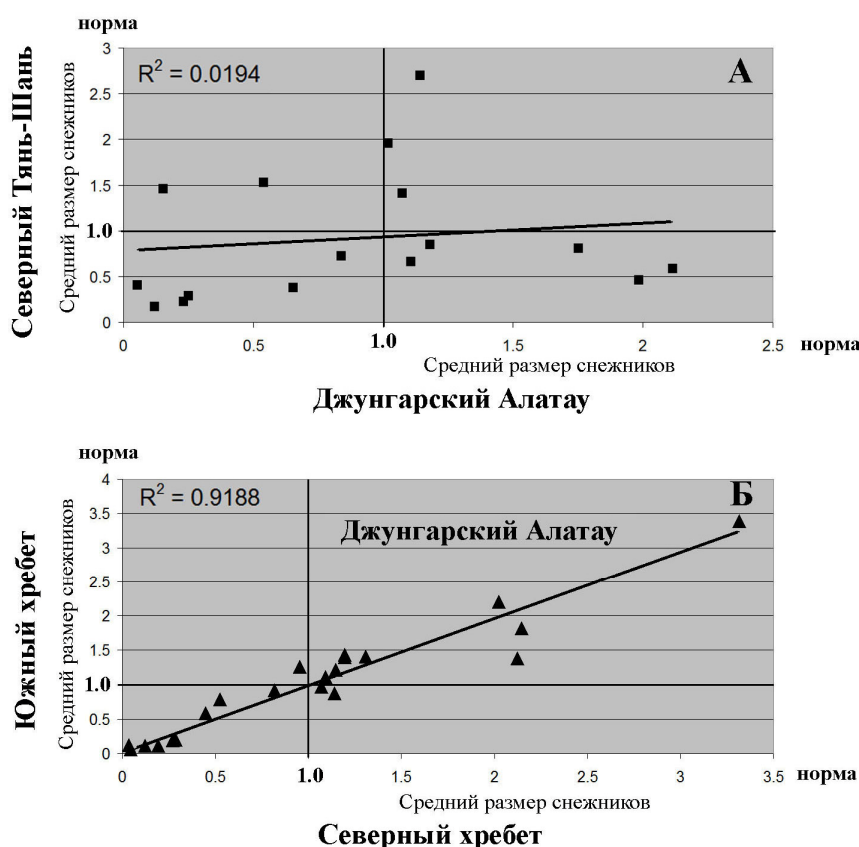
Несмотря на относительно небольшое расстояние между Северным Тянь-Шанем и Джунгарским Алатау (около 250 км), что сопоставимо с размером самих горных стран (Джунгарский Алатау около 450 км, Заилийский Алатау с Кунгей Алатау около 250 км), динамика их снежности существенно не синхронизирована ( $R^2=0.02$ ), рис. 5(а). И это притом, что снежность отдельных хребтов внутри горной системы, например Северный и Южный хребты Джунгарского Алатау, с высокой степенью синхронна ( $R^2=0.92$ ), рис.5(б). По всей видимости, распространение атмосферных фронтов внутри горной страны в этом случае идет иначе, чем между отдельными горными образованиями. Т.е. система горных хребтов Джунгарского Алатау взаимодействует с циклонами и антициклонами, как один объект, несмотря на свои размеры, что приводит к унификации погодных условий сезона.



**Рисунок 3** – Многолетняя динамика сезонного минимума относительного проективного покрытия снежниками тестовых площадок Северного Тянь-Шаня (24 тестовые площадки) и Джунгарского Алатау (36 тестовых площадок). Построено на основе дешифрирования спутниковых снимков Landsat-5,7,8 [<http://glovis.usgs.gov>].



**Рисунок 4** – Многолетняя динамика средних сезонных минимумов относительного проективного покрытия снежниками Северного Тянь-Шаня (усреднено по 24 тестовым площадкам) и Джунгарского Алатау (усреднено по 36 тестовым площадкам). Построено на основе дешифрирования спутниковых снимков Landsat-5,7,8 [<http://glovis.usgs.gov>].



**Рисунок 5** – Взаимосвязь между уровнями сезонных минимумов снежности высокогорных территорий:

А – Северный Тянь-Шань (24 тестовые площадки) и Джунгарский Алатау (36 тестовых площадок) в период 1999-2014 гг. Б – Джунгарский Алатау: Северный хребет (18 тестовых площадок) и Южный хребет (18 тестовых площадок) в период 1993-2014 гг.

## Выводы

Таким образом, многолетняя динамика сезонного минимума проективного покрытия снежниками высокогорных территорий на масштабе нескольких десятилетий может диагностироваться с помощью спутниковых снимков Landsat 5,7,8. Полученные данные по Северному Тянь-Шаню (Заилийский Алатау и Кунгей Алатау) и Джунгарскому Алатау показывают наличие слабо выраженного тренда на уменьшение снежности в Северном Тянь-Шане (период: 1999-2014 гг.) и отсутствие тенденции в Джунгарском Алатау (период: 1994-2014 гг.).

Следует отметить, что сезонный уровень снежности гляциальной зоны различных горных регионов, даже близко расположенных, может существенно различаться. Это усложняет прогноз водности крупных трансграничных рек с ледовым и снежно-ледовым питанием, поскольку требуется информация о сезонных погодных условиях для всех хребтов формирующих сток. Например, для трансграничной реки Иле, основной сток которой формируется на хребтах Внутреннего Тянь-Шаня, Джунгарского Алатау и Заилийского Алатау необходима информация по всем этим трем горным странам.

## Литература

1 Bamber J.L., Rivera A. A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination; Global and Planetary Change. – Vol.59. – Issue 1-4, 2006. – p. 138-148.

2 Коновалов В.Г. Каталогизация горных ледников и генерализация их распределения по материалам дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. – Т. 7. – № 2. – С. 43-54.

- 3 Raup B, Racoviteanu, A, Jodha, S., Khaisa, S., Heim, C., Armstrong, R., Arnaud, Y. The SLIMS geospatial glacier database. A new tool for studying glacier change. *Global and Planetary Change*. 56(1-2), 2007. – P.101-110.
- 4 Aizen, V.B., Kuzmichenok V.A., Surazakov A.B., Aizen E.M. Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data *Annals of Glaciology*, 43, 2006. – P.202-213.
- 5 Вилесов Е.Н., Уваров В.Н. Колебания горных ледников как индикатор изменения климата // *Гидрометеорология и экология*. – Алматы, 1997. № 3. – С.165-174.
- 6 Boich T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan / Kyrgyzstan) using remote sensing data // *Global and Planetary Change*, 56, 2007. – P.1-12.
- 7 Glazyrin G., Braun L.N., Shchettinnikov A.S. Sensitivity of mountain glacierization to climate changes in central Asia // *Zeitschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie* 38, 2002, P.71-76.
- 8 Имбри Д., Имбри К. Тайны ледниковых эпох / под. ред. Г.А. Авсюка. – М.: Прогресс, 1998. – 262 с.
- 9 Вилесов Е.Н., Морозова В.И. Деградация оледенения гор Южной Джунгарии во второй половине XX века // *МГИ*, 2005. – Вып.98. – С. 201-206.
- 10 Вилесов Е.Н., Уваров В.Н. Эволюция современного оледенения Заилийского Алатау в XX в. – Алматы: Казахский государственный университет, 2001. – 252 с.
- 11 Токмагамбетов Г.А. Ледники Заилийского Алатау (формирование, строение, свойства и динамика). – Алма-Ата: Изд-во «Наука», 1976. – 366 с.
- 12 Диких А.Н. Снежный покров высокогорной зоны Киргизии. – Фрунзе: Илим, 1978. – 102 с.
- 13 Волошина А.П., Кан Съенчен. Климат высокогорной зоны: В кн. Оледенение Тянь-Шаня / под ред. М.Б. Дюржерова. – М., 1995. – С. 43-59.
- 14 Dyrgerov M.B., Mikhalenko V.N., Kunakhovitch M.G. et al On the cause of glacier mass balance variations in the Tian Shan mountains // *Geo/Journal* 1994. – Vol 33. – N 2/3. – P.311-317.
- 15 Михаленко В.Н., Дюржеров М.Б., Лю Шаохай. Баланс массы отдельных ледников и бассейнов. В кн. Оледенение Тянь-Шаня / под ред. М.Б. Дюржерова. – М., 1995. – С.79-100.
- 16 Терехов А.Г. Мониторинг площади снежников Северного Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау в период 1998-2011 по данным LANDSAT TM, ETM // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2012. – Т. 9. – №1. – С. 269-274.

#### References

- 1 Bamber J.L., Rivera A. A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination; *Global and Planetary Change*. – Vol.59. – Issue 1-4, 2006. – p. 138-148.
- 2 Konovalov V.G. Katalogizacija gornyh lednikov i generalizacija ih raspredelenija po materialam distancionnogo zondirovanija // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2010. – Т. 7. – № 2. – С. 43-54.
- 3 Raup B, Racoviteanu, A, Jodha, S., Khaisa, S., Heim, C., Armstrong, R., Arnaud, Y. The SLIMS geospatial glacier database. A new tool for studying glacier change. *Global and Planetary Change*. 56(1-2), 2007. – P.101-110.
- 4 Aizen, V.B., Kuzmichenok V.A., Surazakov A.B., Aizen E.M. Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data *Annals of Glaciology*, 43, 2006. – P.202-213.
- 5 Vilesov E.N., Uvarov V.N. Kolebanija gornyh lednikov kak indikator izmenenija klimata // *Gidrometeorologija i jekologija*. – Almaty, 1997. № 3. – S.165-174.
- 6 Boich T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan / Kyrgyzstan) using remote sensing data // *Global and Planetary Change*, 56, 2007. – P.1-12.
- 7 Glazyrin G., Braun L.N., Shchettinnikov A.S. Sensitivity of mountain glacierization to climate changes in central Asia // *Zeitschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie* 38, 2002, P.71-76.
- 8 Imbri D., Imbri K. Tajny lednikovyh jepoh / pod. red. G.A. Avsjuka. – М.: Progress, 1998. – 262 с.
- 9 Vilesov E.N., Morozova V.I. Degradacija oledeneniya gor Juzhnoj Dzhungarii vo vtoroj polovine XX veka // *MGI*, 2005. – Вып.98. – С. 201-206.
- 10 Vilesov E.N., Uvarov V.N. Jevoljucija sovremennogo oledeneniya Zailijskogo Alatau v HH v. – Almaty: Kazahskij gosudarstvennyj universitet, 2001. – 252 s.
- 11 Tokmagambetov G.A. Ledniki Zailijskogo Alatau (formirovanie, stroenie, svojstva i dinamika). – Alma-Ata: Izd-vo «Наука», 1976. – 366 с.
- 12 Dikih A.N. Snezhnyj pokrov vysokogornoj zony Kirgizii. – Frunze: Ilim, 1978. – 102 с.
- 13 Voloshina A.P., Kan S'enchen. Klimat vysokogornoj zony: V kn. Oledenenie Tjan'-Shanja / pod red. M.B. Djurgerova. – М., 1995. – С. 43-59.
- 14 Dyrgerov M.B., Mikhalenko V.N., Kunakhovitch M.G. et al On the cause of glacier mass balance variations in the Tian Shan mountains // *Geo/Journal* 1994. – Vol 33. – N 2/3. – R.311-317.
- 15 Mihalenko V.N., Djurgerov M.B., Lju Shaohaj. Balans massy otdel'nyh lednikov i bassejnov. V kn. Oledenenie Tjan'-Shanja / pod red. M.B. Djurgerova. – М., 1995. – С.79-100.
- 16 Terehov A.G. Monitoring ploshhadi snezhnikov Severnogo Tjan'-Shanja i Dzhungarskogo Alatau v period 1998-2011 po dannym LANDSAT TM, ETM // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. – 2012. – Т. 9. – №1. – С. 269-274.