

## Мониторинг площади снежников Северного Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау в период 1998-2011 по данным LANDSAT TM, ETM

А.Г. Терехов

*Казахский научно-исследовательский институт экологии и климата, МООН  
Казахстан, 050000, Алматы, ул. Сейфулина, 597  
E-mail: aterekhov1@yandex.ru*

Годовые вариации осадков и температурного режима гор Средней Азии определяют объем стока основных рек региона, которые обеспечивают водой поливное земледелие Узбекистана, Казахстана, Туркмении и формируют потенциал гидроэнергетики Киргизии, Таджикистана и Казахстана. Маловодные годы приводят к большим издержкам в экономике Центрально Азиатских стран, а ряд засушливых лет поднимает вопрос региональной продуктовой безопасности и политической стабильности. В связи с этим дистанционные методы диагностики сезонных запасов снега в горах представляют значительный интерес. Площади снежников на хребтах Тянь-Шаня наиболее тесно связаны с сезонным уровнем твердых осадков в высокогорных территориях. В сухие годы снежники исчезают, а во влажные их площади достигают значительных величин. По данным LANDSAT-TM, ETM за 1998–2011 гг. проведен мониторинг сезонных минимумов площади снежников на 60 тестовых участках, расположенных в пределах Заилийского Алатау, Кунгей Алатау и Джунгарского Алатау. Получены однородные ряды данных диагностирующие динамику снежности этих горных территорий в период 1998–2011 гг.

**Ключевые слова:** спутниковый мониторинг, тестовый участок, фотоинтерпретация, картирование снежников, многолетняя динамика снежности горных систем.

### Введение

Экономика Центрально-Азиатских стран находится в сильной зависимости от температурно-влажностных условий высокогорной территории Тянь-Шаня. Основные реки региона: Сыр-Дарья, Амударья, Иртыш, Или и др. имеют снежно-ледниковое питание, а величина их стока существенно зависит от сезонного запаса снега в горных территориях (Диких и др., 2001). Поливное земледелие Узбекистана, Казахстана и Туркмении потребляет большое количество воды, которой не хватает в маловодные годы. Снижение урожайности культур и засоление пахотных земель сопровождается водным дефицитом. Проблема эффективного администрирования водных ресурсов трансграничных рек в условиях маловодья становится очень острой. Каждая страна, по территории которой проходит трансграничная река, ставит приоритетом собственные экономические проблемы, что не способствует развитию всего региона. Ряд маловодных лет может обострить вопрос региональной продуктовой безопасности и заметно снизить потенциал гидроэнергетики.

Наземные системы мониторинга запаса снега в горных территориях в настоящий момент развиты недостаточно. Советская система вертолетного контроля над высотой снежного покрова по специальным рейкам перестала функционировать. Таким образом, качество информации о состоянии водных ресурсов в горных территориях значительно ухудшилось, при этом, для трудно доступных районов расположенных на территории других стран она обычно отсутствовать вовсе.

Долгосрочное планирование экономического развития сухих территорий Средней Азии, водные ресурсы которых, определяются речным стоком, требуют многолетних однородных и достоверных рядов данных диагностирующих метеорологические условия горных территорий. Долговременные погодные тренды и изменения климата могут кардинально влиять на суть эффективного экономического развития аридных районов Средней Азии, определяя, например оптимальный тип возделываемых культур и размер посевных площадей.

Долговременные ряды спутникового мониторинга LANDSAT (TM, ETM) с разрешением 30 м способны обеспечивать определенный объем информации о состоянии ледников и снежного покрова в горных системах Тянь-Шаня в течение последних 13-14 лет. Особенности формирования облачного покрова гор Средней Азии таковы, что обширные антициклоны с безоблачной погодой типичны для августа-сентября. К этому времени формируется сезонный минимум снежного покрытия. Таким образом, с периодичностью раз в год спутниковые данные могут устойчиво обеспечивать информацию о сезонном минимуме снежно-ледового покрытия в высокогорных территориях центральной Азии.

По спутниковым данным LANDSAT TM, ETM (разрешением 30 м) в течение августа-сентября в высокогорной зоне имеется возможность картировать три типа покрытий: открытый лед, фирн на льду и снежники. Открытый лед и фирн на льду являются компонентами ледников. Мониторинг ледников представляет большой интерес (Коновалов В.Г., 2010), однако связь их пространственных размеров, регистрируемых спутником, с погодными особенностями текущего года слишком сложна и неоднозначна. Ледники, особенно крупные, аккумулируют осадки в виде льда с больших территорий и в течение длительного времени. Полное обновление льда занимает длительные сроки. Поэтому, например, для ледника Корженевского (крупнейшего в Заилийском Алатау) на конце языка сейчас происходит стаивание осадков попавших в зону аккумуляции в 1800-х годах, т.е. еще во времена последнего малого ледникового периода (1450–1850 гг.) (Имбри, Имбри 1988). Средние характеристики параметров оледенения горных систем формируются погодными условиями всего периода накопления существующего льда. С точки зрения мониторинга снежности наибольший интерес представляет ежегодный баланс массы ледника, расчет которого требует многолетних подробных наземных измерений. В настоящий момент подобные наблюдения осуществляются только для 2 ледников (ледник Туюк-су – Заилийский Алатау (Макаревич и др., 1984) и ледник Шуманского – Джунгарский Алатау), что явно недостаточно для диагностики почти 10 тыс. кв. км горного оледенения Тянь-Шаня.

Динамика ледников весьма инертна и малочувствительна к погодным условиям отдельных лет. Положение фирновой линии динамично, любой одиночный снегопад перед пролетом спутника сделает невозможным получение однородных данных. Поэтому, наибольшую информативность в диагностике снежности отдельных лет имеет мониторинг снежников. Снежники являются результатом погодных условий одного или нескольких лет. В сухой, с повышенной температурой год снежники полностью исчезают, а во влажные и холодные, они занимают обширные территории. Картирование снежного покрова по оптическим спутниковым данным, из-за его резко отличающихся спектральных характеристик, не встречает серьезных затруднений. Таким образом, спутниковый мониторинг сезонных минимумов размеров снежников является эффективным инструментом диагностики погодных особенностей высокогорных территорий, обеспечивающих питание крупнейших рек среднеазиатского региона.

### **Территория мониторинга**

Горные системы Джунгарского Алатау, Тянь-Шаня и Памира обеспечивают питанием крупнейшие реки Средней Азии, от водности которых зависит экономическое состояние стран региона. Однородные ряды данных диагностирующие снежность этой территории, ее годовые вариации, многолетние тенденции и последствия изменения климата представляют несомненный интерес. Для отработки спутниковой технологии оценки состояния снежного покрова в высокогорной территории на были выбраны две наиболее изученные локальные горные системы: Заилийский Алатау, совместно с Кунгей Алатау, расположенные на территории Казахстана и Киргизии и относящиеся к Северному Тянь-Шаню; и Джунгарский Алатау, расположенный в пределах Казахстана и Китая. Площадь оледенения Заилийского

Алатау и Кунгей Алатау составляет около 600 км<sup>2</sup>, Джунгарского Алатау – около 1000 км<sup>2</sup> (Токмагамбетов, 1976). Сток крупных рек региона: Чу, Или и Каратал, во многом формируется за счет таяния этих ледников.

### Спутниковые данные

Спутниковые данные LANDSAT- TM, ETM с разрешением 30 м взятые с Интернет ресурса [<http://glovis.usgs.gov>] использовались для картирования сезонных минимумов размеров снежников в высокогорной зоне. Привлекались снимки по двум сеновым позициям (WRS-2: path/ row): 149/30 – покрывающая большую часть Заилийского Алатау и Кунгей Алатау; и 148/29 – покрывающая западную часть Джунгарского Алатау. По позиции 149/30 в обработке использовались снимки следующих дат: 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. По позиции 148/29, соответственно – 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.

### Объекты мониторинга

Снежники высокогорных территорий представляют собой накопления снега, образующиеся в холодный период и не успевающие стаять в течение лета. Их образование, как правило, приурочено к диапазону высот близких к границе снеговой линии. Часть снежников, также, образуется в результате лавинной активности, в этом случае они могут опускаться заметно ниже снеговой линии. Размер снежников максимально чувствителен к погодным условиям сезона. Сухие и жаркие сезоны приводят к подъему снеговой линии, относительно среднемноголетних положений, и соответственно к деградации снежников, вплоть до их полного исчезновения. Влажные и холодные сезоны характеризуются низко расположенной снеговой линией и значительными площадями снежников.

Разделение снежников от ледников требует тщательного экспертного анализа. Поэтому, система мониторинга размеров снежников строилась через анализ отдельных площадок, 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. Для Заилийского Алатау и Кунгей Алатау было выбрано 24 площадки, см. таблицу 1, Джунгарский Алатау характеризовался 36 тестовыми площадками.

Таблица 1. Характеристики тестовых площадок Заилийского Алатау и Кунгей Алатау. Географические координаты высшей точки выдела и диапазон абсолютных высот по площадке дан по данным Google-Earth

№	Принадлежность территории	Высота (м)	Широта	Долгота	Экспозиция	Площадь выдела (км <sup>2</sup> )
1	Казахстан	4100-4380	42.59.58.34	77.16.15.65	Ю-Восток	0,297
2	Казахстан	3550-4060	43.03.17.58	77.03.36.19	С-С-Восток	0,329
3	Казахстан	3450-3700	43.04.37.41	77.03.17.53	Север	0,154
4	Казахстан	3420-3760	43.04.33.54	77.03.00.48	Север	0,865
5	Казахстан	3500-3895	43.01.42.75	76.57.08.57	С-С-Запад	1,134
6	Казахстан	3680-3900	43.00.45.19	76.57.07.18	С-Восток	0,566
7	Казахстан- Киргизия	3700-3995	42.57.56.85	76.53.54.03	Вершина	4,114

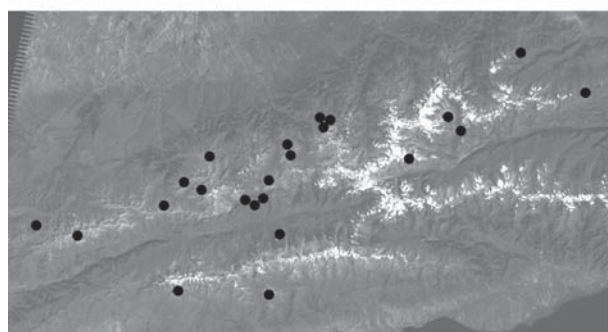
№	Принадлежность территории	Высота (м)	Широта	Долгота	Экспозиция	Площадь выдела (км <sup>2</sup> )
8	Киргизия	3380-3720	42.51.13.95	76.55.55.26	Восток	1,321
9	Киргизия	3700-3920	42.55.17.74	76.51.23.10	Север	2,491
10	Киргизия	3700-3840	42.55.47.44	76.50.40.06	Север	1,391
11	Киргизия	3750-3880	42.55.37.00	76.52.21.36	Север	1,062
12	Казахстан	3850-4200	43.04.51.31	77.23.03.12	Восток	1,004
13	Казахстан	3580-3790	42.56.40.72	76.42.49.88	Север	0,209
14	Казахстан	3330-3775	43.00.25.66	76.44.13.49	С-Восток	0,547
15	Казахстан	3500-3730	42.57.44.66	76.40.20.12	С-Запад	0,300
16	Казахстан	3500-3850	42.54.58.30	76.36.17.95	С-Восток	0,756
17	Казахстан	3500-3870	43.12.14.95	77.34.51.78	Восток	1,131
18	Казахстан	4070-4320	43.03.07.67	77.25.41.48	Запад	0,128
19	Казахстан	4080-4330	43.00.02.16	77.17.02.49	Юг	0,239
20	Киргизия	3800-4250	42.45.09.07	76.39.00.62	Юг	1,971
21	Киргизия	3500-3830	42.52.49.32	76.16.13.57	Север	0,302
22	Киргизия	3700-3950	42.51.29.33	76.22.29.60	Восток	0,327
23	Киргизия	3500-4150	42.44.38.55	76.53.21.01	Юг	1,593
24	Казахстан	3410-3785	43.06.57.34	77.45.21.98	Север	0,678

### Методика обработки данных

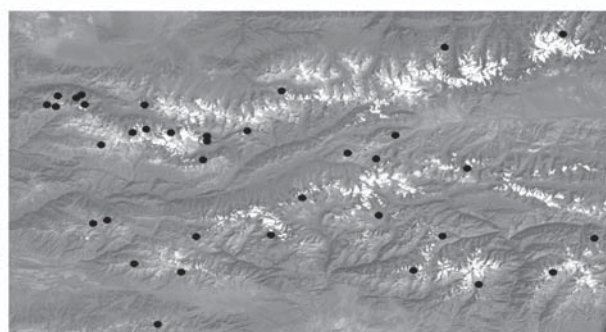
Многозональные данные LANDSAT-TM и LANDSAT-ETM+ для основных оптических каналов имеют пространственное разрешение 30 м. Каналы в оптическом диапазоне с характеристиками: 2: 520–600 нм; 3: 630–690 нм; 4: 760–900 нм использовались для построения псевдоцветного композита с RGB-432. Привлекались позднелетние, либо осенние снимки, когда формируется сезонный минимум площади снежного покрытия в высокогорной зоне, а помехи от облачного покрова незначительны.

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 сопоставимых оценок по всем площадкам. В случае помех облачного покрова использовался другой снимок с близкой датой, при его отсутствии характеристика по проективному покрытию снежника в данный год для площадки не определялась.

Анализ проводился отдельно для двух горных систем: Заилийского Алатау совместно с Кунгей Алатау, период 1999–2011 годы, 24 тестовые площадки, рис. 1(а); и Джунгарского Алатау, период 1998–2011 годы – 36 тестовых площадок, рис. 1(б).



а



б

Рис. 1.



## Обсуждение полученных результатов

Каждая тестовая площадка в период мониторинга ежегодно характеризовалась величиной 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. 2. Результирующие кривые динамики средних размеров снежников по анализируемым горным районам в период 1998–2011 показаны на рис. 3.

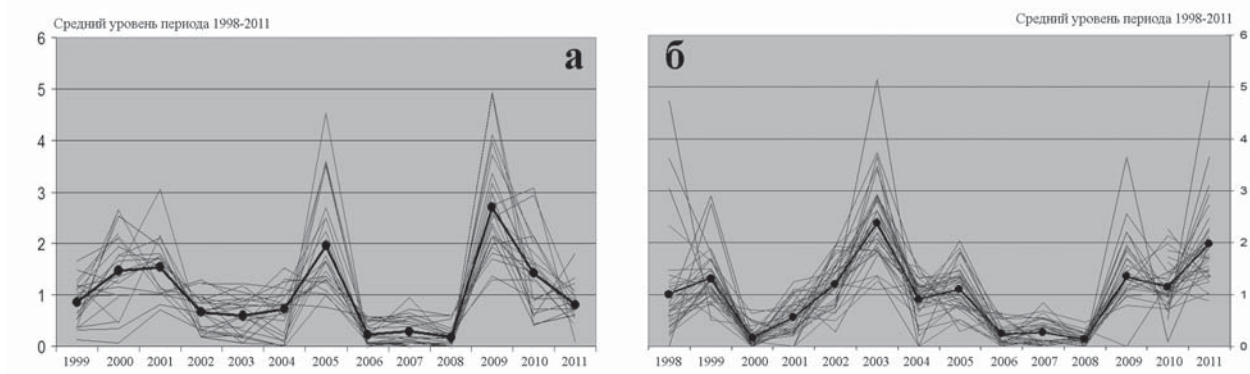


Рис. 2

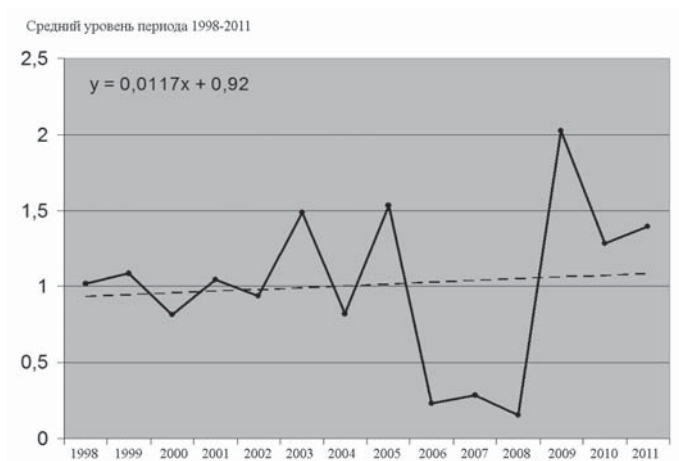


Рис. 3

Средний размер снежников в пределах Северного Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау в течение последних 14 лет имел определенные вариации, рис. 3. К многоснежным годам можно отнести 2003, 2005, 2009 года и отчасти 2010, 2011, к малоснежным - 2006, 2007, 2008. Анализ показал, что период 1998–2011 гг. не имел сколько-нибудь выраженного тренда в изменении снежности высокогорных территорий. В тоже время по всему региону продолжалась активная деградация ледников (Вилесов, Уваров, 1997). Очевидно, уровень температурно-влажностных условий в последние десятилетия отличается от средних погодных условий на время полного обновления льда горным оледенением региона. Для крупных ледников это время составляет 200 лет и больше. Т.е. задняя временная граница накопления существующего в настоящий момент горного льда находится еще в последнем малом ледниковом периоде (1450–1850 гг.) (Имбри, Имбри, 1988). Соответственно, конец 20 и начало 21 века, с их повышенным температурным фоном, сформировали для последних 200 лет значительный климатический градиент, что вызывает повсеместное уменьшение размеров ледников.

Таким образом, режим снежности гор, формирующий объем стока рек, на масштабе нескольких десятилетий может диагностироваться с помощью спутниковых данных. Следует от-

метить, что этот режим не имеет прямой связи с динамикой размеров горных ледников, состояние которых определяется погодными условиями значительно более длительного периода.

### Литература

1. Вилесов Е.Н, Уваров В.Н. Колебания горных ледников как индикатор изменения климата// Гидрометеорология и экология. - Алматы, 1997. № 3. – С.165-174.
2. Диких А.Н., Усубалиев Р.А., Джумашев К. Динамика оледенения северного склона Киргизского склона и ее проявления в водности рек// Метеорология и гидрология в Киргистане. -Бишкек, 2001.- Вып.1. – С.19–26.
3. Дюргерова М.Б., Лю Шаохая, Су Зичу Оледенение Тянь-Шаня// -М.: 1995.-233с.
4. Имбри Д., Имбри К. Тайны ледниковых эпох// Под ред. Г.А. Авсюка. -М.: Прогресс, 1988.–262 с.
5. 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.
6. Макаревич К.Г., Вилесов Е.Н., Головнина Р.Г. Ледник Туяк-Су// -Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 176 с.
7. Токмагамбетов Г.А. Ледники Заилийского Алатау// - Алма-Ата.: Наука.1976.–365 с.

## Monitoring of temporary snowfields sizes of the Northern Tien-Shan and Djungarian Alatau in the period 1998-2011 years according to LANDSAT TM, ETM

A. G. Terekhov

*Kazakh Research Institute of Environment and Climate, Kazakhstan  
050000, Almaty, 597 Seifulin str.  
E-mail: aterekhov1@yandex.ru*

Annual variations in rainfall and temperature define the mountains of Central Asia runoff region's major rivers, which provide water for irrigation farming in Uzbekistan, Kazakhstan, Turkmenistan, and form the hydropower potential of Kyrgyzstan, Tajikistan and Kazakhstan. Dry years lead to large costs in the economy of the Central Asian countries, and several dry years raises the question of regional food security and political stability. In this connection, the remote sensing methods of diagnosis of seasonal minimum of the snow reserves in the mountains of considerable interest. Temporary snowfields size in Tien Shan is most closely related to the seasonal level of solid precipitation in mountainous areas. In dry years, temporary snowfields disappear, and in wet areas to reach significant values. According to the LANDSAT-TM, ETM for years 1998-2011 monitored the seasonal minimum of temporary snowfields size on 60 test sites located within the Trans-Ili Ala-Tau, Kungei Ala-Too and Djungarian Ala-Tau. Obtain a homogeneous series of diagnosing the dynamics of snow cover in mountainous areas during the 1998-2011 years.

**Keywords:** satellite monitoring, the test site, fotointerpretation, mapping of temporary snowfields, long-term dynamics of mountain snow systems.