

Деградация оледенения Джунгарского (Жетысу) Алатау во второй половине XX в.

© 2013 г. Е.Н. Вилесов¹, И.В. Северский²

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы; ²Институт географии Республики Казахстан, Алматы
e_vilesov@inbox.ru

Статья принята к печати 14 декабря 2012 г.

Баланс массы ледников, деградация оледенения, Каталог ледников, фирновая линия.
Degradation of glaciation, firm line, Glacier inventory, mass balance of glaciers.

Рассматриваются пространственно-временные изменения оледенения Джунгарского (Жетысу) Алатау за 44 года (1956–2000 гг.). Основой для суждения о направленности эволюции ледников послужило сравнение их морфометрических характеристик, полученных при каталогизации в 1956, 1990 и 2000 гг. Установлено, что за 44 года площадь оледенения сократилась на 313 км² (37,2%). Объем ледников стал меньше на 13,1 км³ (39,2%). Среднее значение баланса массы оледенения составило –37,6 г/см². Безвозвратная потеря массы со всей площади ледников равна 17 м в слое воды. В 2010 г. площадь оледенения в регионе оценивалась в 465 км². По прогнозу, основанному на экстраполяции выявленных тенденций сокращения площади, ледники Джунгарского Алатау могут исчезнуть через 80 лет, т.е. к 2090 г.

Введение

Заметное потепление климата, обусловленное естественными причинами и антропогенным воздействием, вызывает соответствующие изменения в горно-ледниковых системах аридных гор Центральной Азии, в том числе расположенных на юго-востоке Казахстана. Реальная возможность быстрого изменения размеров современного оледенения в настоящее время требует детального исследования пространственных и временных колебаний горных ледников, а также изучения влияния этих колебаний на изменение водных ресурсов в районах с развитым оледенением. В рассматриваемом регионе для орошения интенсивно используются воды рек Каратал, Коксу, Лепсы, Аксу и др. В бассейнах этих рек водозабор на орошение почти 200 тыс. га оценивается в 1,3 км³/год. Рациональное водопользование для нужд ирригации и гидроэнергетики невозможно без исчерпывающей информации об изменении (уменьшении) площади и объема ледников, вызывающем сокращение долговременного влагозапаса в них, снижение ледникового стока, а также нарушение естественного саморегулирования речного стока. Данная проблема решается путём мониторинга современного оледенения, который должен проводиться не для 1–2 «опорных» ледников горной страны, где ведутся натурные наблюдения (примером может служить известный ледник Туяксу в Заилийском Алатау), а для крупных ледниковых систем в целом, насчитывающих сотни и тысячи ледников. Необходимо также оценить скорость сокращения запасов

льда и перспективы существования этих систем в ближайшем и отдалённом будущем.

Цель настоящей работы – реализовать концепцию гляциологического мониторинга применительно к самому «оледенелому» на территории Казахстана хр. Джунгарский Алатау, а также исследовать закономерности пространственно-временной изменчивости состояния этой внутриконтинентальной ледниковой системы за последние десятилетия в связи с изменением климата.

Джунгарский (Жетысу) Алатау – горная система, протянувшаяся с запада-юго-запада на восток-северо-восток вдоль государственной границы между Республикой Казахстан и Китайской Народной Республикой в координатах 44–46° с.ш. и 78–82° в.д. (рис. 1). В 1960–70-е годы П.А. Черкасов, работая в рамках Всесоюзной программы по инвентаризации ледников, составил полный Каталог ледников казахстанской части Джунгарского Алатау (Казахстанской Джунгарии), опубликованный в четырёх выпусках: 1) Бассейны рек Тентек и Ргайты на востоке северного склона хребта [7]; 2) Бассейны рек Биен, Аксу и Лепсы на северном склоне хребта [8]; 3) Бассейн р. Каратала в западной части хребта [10]; 4) Бассейны рек Хоргоса и Усека на южном макросклоне хребта [9]. В пяти таблицах данной статьи перечисленные части Каталога ледников для краткости мы называем соответственно «Восток», «Север», «Запад» и «Юг». Все морфометрические показатели ледников, их площадные и линейные размеры, абсолютные высоты характерных точек получены путём картометрического ана-

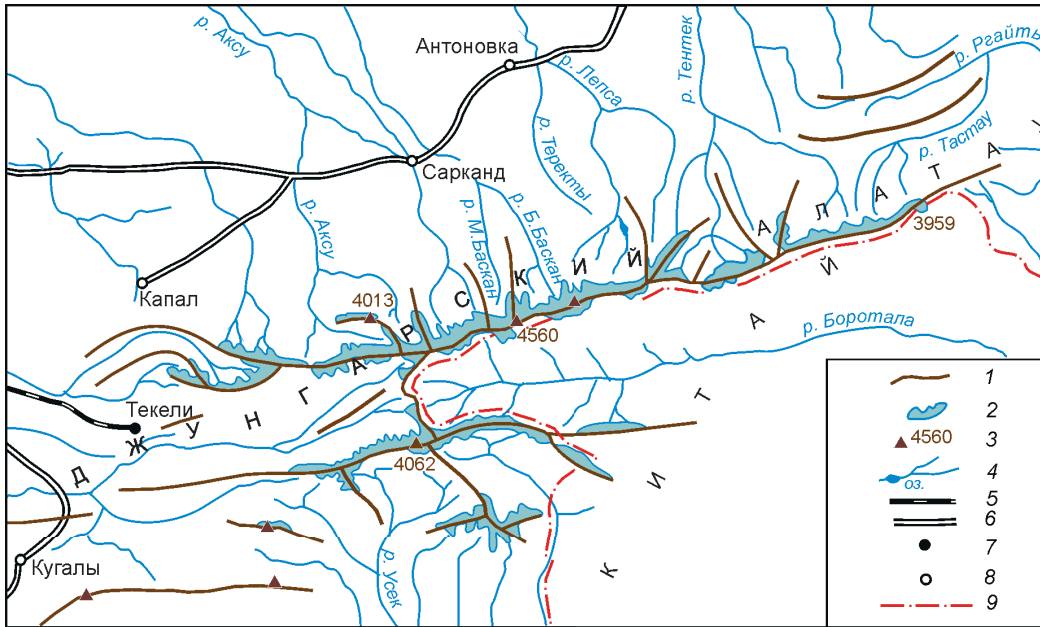


Рис. 1. Орогидрографическая схема Джунгарского Алатау:

1 – хребты; 2 – ледники; 3 – вершины; 4 – реки и озёра; 5 – железные дороги; 6 – шоссе; 7 – города; 8 – районные центры; 9 – государственная граница с КНР

Fig. 1. Geographical scheme of Jungarian Alatau:

1 – ridges; 2 – glaciers; 3 – tops; 4 – rivers and lakes; 5 – railways; 6 – highways; 7 – cities; 8 – district centers; 9 – state border with China

лиза топографической основы масштаба 1 : 100 000 с привлечением материалов аэрофотосъёмки 1956 г., согласно рекомендациям «Руководства по составлению Каталога ледников» [14]. Точность определения площади ледников составляла 0,1 км², их длины – 0,1 км, высоты их концов и высших точек, а также фирновой линии – 10 м.

По данным [7–10], в речных бассейнах Казахской Джунгарии в середине XX в. было 1369 ледников с общей площадью 813,9 км² (без льдов, погребённых под моренами стадии фернау, а с ними – ровно 1000 км²). В конце 1970-х годов для высокогорных территорий появились карты в масштабе 1 : 25 000, которыми стали пользоваться гляциологи при определении морфометрических параметров ледников. Поэтому авторы уточнили численность ледников, установленную в 1956 г. (в сторону увеличения на 3%), а также откорректировали размеры небольших крутосклонных каровых и висячих ледников, площадь каждого из которых в масштабе 1 : 25 000 по сравнению с масштабом 1 : 100 000 возросла на 0,1–0,2 км², что увеличило площадь оледенения во всех основных бассейнах хребта на 27,1 км².

Материалы и методы исследований

Основой для объективного суждения о степени и темпах обусловленной изменениями климата деградации оледенения Джунгарского Алатау послужили данные о его состоянии за три «реперных» года – 1956, 1990 и 2000. Для первых двух сроков использованы материалы аэрофотосъёмки, а для 2000 г. – космические снимки Landsat с раз-

решением 15 м, обработанные с помощью ГИС-технологий (программные пакеты MapInfo, ArcGIS и др.) и метода цифрового картографирования. Для каждого срока были составлены Каталоги ледников и карты оледенения (для 1990 и 2000 г. в масштабе 1 : 25 000), анализ которых позволил установить изменения численности ледников, их площади и объёма, а также высот характерных точек за 44 года. Для общей оценки дегляциации всей ледниковой системы Джунгарского Алатау, включая её китайскую часть, привлечены данные Каталогов ледников Китая (по их состоянию на 1973 г.) [19] и космические снимки 2000 г. Точность определения площадей льда в работе [19] составила 0,01 км².

Использование космических снимков для оценки размеров оледенения в 2000 г. имеет как минусы, так и плюсы. К минусам можно отнести две позиции.

1. *Среднее пространственное разрешение.* Общепринятая классификация снимков по пространственному разрешению включает в себя четыре сегмента данных: низкого разрешения – более 250 м на пиксель; среднего разрешения – от 10 до 250 м на пиксель; высокого разрешения – от 1 до 10 м на пиксель; сверхвысокого разрешения – менее 1 м на пиксель. Появление последнего сегмента связано с запуском на орбиту Земли спутниковых систем, оснащённых новейшим оборудованием. Опыт работы со снимками разного пространственного разрешения для решения задач гляциологии показал, что оптимальное разрешение находится в диапазоне от 1 до 5–6 м.

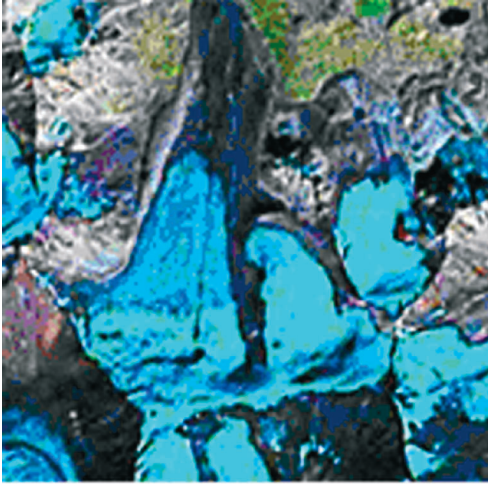


Рис. 2. Пример изображения ледниковых поверхностей на снимке Landsat

Fig. 2. Landsat sample image of the ice surface

2. *Артефакты, обусловленные сильным сжатием данных.* Растровые изображения (в нашем случае снимки Landsat) имеют большие размеры файлов, поэтому процесс копирования таких данных через интернет весьма долгий. Для уменьшения объёма данных снимки подвергались сильному сжатию путём перекодирования их в формат MrSID (Multi-resolution Seamless Image Database). Подобную процедуру проводят для компрессии изображений, которая позволяет сжимать растр во много раз практически без геометрических искажений. Однако при таком сжатии образуются так называемые артефакты – различные визуальные недостатки, среди которых – блочность (разбиение изображения на блоки), а также размытие мелких деталей. Подобные артефакты не вносят значимой ошибки в дешифрирование объектов, но ухудшают оригинальное изображение.

Плюсов больше. Приведём их.

1. *Комбинация спектральных диапазонов.* В общедоступном ресурсе снимки Landsat представлены в комбинации каналов, которая даёт изображение, близкое к естественным цветам. Используются следующие каналы: средний инфракрасный (2,09–2,35 мкм); ближний инфракрасный (0,78–0,90 мкм); зелёный (0,53–0,61 мкм). Здоровая растительность выглядит ярко-зелёной, травянистые сообщества – зелёной, ярко-розовые участки детектируют открытую почву, коричневые и оранжевые тона – разреженную растительность. Лёд и снег имеют насыщенные голубые тона с чётко выраженными границами, что значительно облегчает их дешифрирование (рис. 2).

2. *Открытый и бесплатный доступ к снимкам.* Спутник Landsat – проект трёх крупнейших американских правительственных организаций: NASA (National Aeronautics and Space Administration); NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration); USGS (United States Geological Survey). Часть информации, поставляемой со спутника Landsat, имеет открытый характер распространения (отсутствие копирайта), что позволяет пользователям экспериментировать с ней в поисках новых сфер применения данных дистанционного зондирования.

3. *Низкий процент облачности на рассматриваемой территории.*

4. *Полный охват всей горной системы Джунгарского Алатау.* Проблема многих архивов космических снимков – разрозненность снятых сцен в пространстве и времени. Содержимое архива данных для бесплатного пользования представляет собой практически полное покрытие земной поверхности снимками.

5. *Хорошее сопоставление с данными SRTM.* SRTM (Shuttle radar topographic mission) – радарная топографическая съёмка большей части территории земного шара, за исключением самых северных (> 60°), самых южных (> 54°) широт и океанов, выполненная за 11 дней в феврале 2000 г. при использовании специальной радарной системы. С помощью двух радиолокационных сенсоров (SIR-C и X-SAR) собрано более 12 Тбайт данных. Они сегментированы областями размером 1 × 1 географический градус. При максимально доступном разрешении в три секунды такой квадрат представляет собой матрицу размером 1201 × 1201 элемент. Эти данные, предварительно обработанные для приведения к Балтийской системе высот, использованы для построения 3D-модели местности, что позволило более корректно дешифрировать водоразделы, определять направление движения льда в сложных случаях, уровень уклона поверхности и многое другое. При отсутствии крупномасштабного топографического материала на китайскую территорию эта модель послужила единственным источником определения абсолютных высот высших и низших точек ледников. Горизонталы с сечением 50 м также снимали с 3D-модели.

Для получения истинных контуров и размеров ледников очень важен сезон проведения космической фотосъёмки. Наиболее эффективна фотосъёмка, выполненная на исходе лета, в конце августа – начале сентября, так как именно в это время весь сезонный снежный покров стает, открывая собственно тело ледника. Космический снимок после предварительной геокоррекции векторизовался (оцифровывался) при помощи ГИС-

программ ArcGIS и MapInfo. В качестве вспомогательной программы для визуализации 3D-данных использован Global Mapper. Векторизация представляет собой процесс преобразования растровых данных (в нашем случае изображения интересующих нас объектов на космическом снимке) в векторную форму. В итоге мы получаем векторные слои, имеющие не только географически привязанные графические контуры объектов, но и расширенную атрибутивную информацию. Полученная информация унифицировалась по примеру базы данных для всех частей Джунгарского Алатау, исследование и картографирование которых проводились ранее. Информация о ледниках представлена в виде базы данных, содержащей морфометрическую информацию. Для каждого ледника зафиксированы такие показатели, как площадь, длина, диапазон оледенения (разница между высшей и низшей точками), экспозиция. Указанные характеристики определяются в автоматическом или полуавтоматическом режиме с точностью 0,01 км². Затем по наиболее подходящим методикам рассчитывают объём и толщину ледника. Все прочие вспомогательные объекты – реки, озёра, линии водоразделов (хребтов) – в модели также векторизованы. Погрешность измерения ледниковых площадей на космических снимках с учётом возможной неточности определения их контуров минимальна для крупных ледников (не более 5%); для ледников с площадью менее 0,5 км² она может достигать 12–15% и более. Рассмотрим изменения основных характеристик оледенения всех бассейнов горной Джунгарии за вторую половину XX в. (с 1956 по 2000 г.), а также в начале XXI в.

Результаты исследований и их обсуждение

Изменение численности ледников происходило в результате двух процессов: полного стаивания ледников, т.е. их исчезновения, и распада более крупных ледников на мелкие, в том числе и отчленения притоков. В изучаемый период преобладал первый процесс. В итоге численность ледников в пределах Казахстанской Джунгарии к 2000 г. уменьшилась с 1412 до 1298, т.е. на 114 (табл. 1). Общая площадь 341 растаявшего ледника составляет 21,75 км². Все они располагались на отрогах хребтов с небольшими абсолютными высотами и малым вертикальным диапазоном и относились к группе склоновых ледников, преимущественно каровым и висячим. Больше всего ледников, половина их числа в 1956 г., стояло на крайнем восточном фланге Северного Центрального хребта, в бассейнах рек

Таблица 1. Изменение числа ледников

Район	1956 г.	1990 г.	2000 г.	1956–2000 гг.		
				стаяло	образовалось	итого
Восток	208	148	127	103	22	–81
Север	348	327	339	76	67	–9
Запад	382	356	370	68	56	–12
Юг	474	486	462	94	82	–12
<i>Всего</i>	1412	1317	1298	341	227	–114

Тентек и Ргайты. Процесс дегляциации в регионе сопровождался не только полным стаиванием мелких ледников со средней площадью 0,06 км², но и распадом более крупных долинных ледников, в результате чего образовалось 227 ледников. Наиболее интенсивно распались ледники в Южной Джунгарии, а также в центральной части Северной Джунгарии, где они занимают обширные, часто многокамерные цирки.

За 44 года максимальное уменьшение численности ледников (почти на 40%) произошло в Восточной Джунгарии. В остальных районах число ледников сократилось только на 3%. В 2000 г. из 1298 ледников 701 имел площадь > 0,1 км² и 597 – < 0,1 км². В Китайской Джунгарии за 27 лет (1973–2000 гг.) преобладал процесс распада ледников, за счёт чего там образовалось 119 новых ледников, а растаяло только 47 с общей площадью 7,43 км². К 2000 г. число ледников увеличилось с 475 до 547, т.е. на 72. Таким образом, в это время по региону насчитывалось 1845 ледников, из которых 976 имели размеры > 0,1 км² и 869 – < 0,1 км². Последние, очевидно, весьма скоро растают. Можно полагать, что в ближайшие десятилетия связанные с деградацией оледенения процессы (стаивание ледников, их распад, отчленение притоков) будут продолжаться не менее интенсивно.

Изменение площади оледенения. Режим изученных в XX в. джунгарских ледников свидетельствует о неблагоприятных тенденциях в их эволюции, которые подтверждались многократными инструментальными измерениями и визуальными наблюдениями в экспедициях П.А. Черкасова. Сопоставление данных Каталогов ледников [7–10], материалов аэрофотосъёмки 1990 г. и космических снимков 2000 г. показало существенное сокращение площади оледенения в исследуемом регионе (табл. 2). Максимум сокращения площади оледенения отмечается в Северной Джунгарии, где в 1956 г. были наибольшие размеры оледенения. Однако относительное сокращение площади ледников этого района, имеющих в основном северную ориента-

Таблица 2. Изменение площади ледников, км²

Район	1956 г.	1990 г.	2000 г.	1956–2000 гг.	
				км ²	в %
Восток	95,5	71,98	59,65	-35,85	-37,5
Север	304,1	222,12	200,69	-103,41	-34,0
Запад	215,0	159,27	131,92	-3,08	-38,6
Юг	226,4	158,61	135,75	-90,65	-40,0
<i>Всего</i>	841,0	611,98	528,01	-312,99	-37,2

цию и залегающих на высотах 4200–4600 м, невелико. Наибольшие относительные потери площади (40%) характерны для ледников, расположенных на южном макросклоне Южного Центрального хребта и хр. Беджинтау. Средняя скорость сокращения площади оледенения по региону за весь 44-летний период составила 7,11 км²/год. Темпы относительного сокращения этой площади изменяются от 0,77 до 0,91 %/год при средней величине 0,85 %/год.

Из общей площади сокращения оледенения к 2000 г., равной 312,99 км², 140,45 км² приходится на ледники долинного типа, 167,96 км² – на склоновые ледники и 4,58 км² – на ледники плоских вершин. Склоновые ледники, имеющие небольшие размеры, от своей первоначальной площади в 1956 г. потеряли 51,8%, а долинны ледники – только 27,0%, т.е. почти на 25% меньше. Таким образом, чувствительность ледников к изменениям климата в значительной степени определяется их размерами. Отметим ещё одну особенность деградации ледников региона на современном этапе: площадь оледенения сокращается не только вблизи нижнего края отступающих языков, т.е. по фронту и бортам ледников; часто не менее интенсивному уменьшению площади, занятой льдом, подвержены и участки ледников выше 4000 м – так называемая «облицовка», где толщина льда минимальна. Следовательно, имеет место не только фронтальная, но и ареальная деградация ледников по всему их контуру, способствующая уменьшению их длины и площади как снизу, так и сверху. Интенсивное стаивание «облицовки» на Кавказе отмечали также В.Д. Панов [12] и В.В. Поповнин [13], а для Гиссаро-Алая и Памира – А.С. Щетинников [16]. Сокращение численности ледников и их размеров способствовало увеличению дробности оледенения, косвенный показатель которой – средняя площадь ледника в регионе. Этот показатель по «реперным» годам изменялся следующим образом: 1956 г. – 0,60 км²; 1990 г. – 0,46 км²; 2000 г. –

Таблица 3. Распределение числа и площади ледников, размером > 0,1 км², по экспозициям в 2000 г.

Экспозиция	Число ледников	Площадь ледников, км ²
С	564	365,14
СВ	265	105,77
В	124	52,72
ЮВ	47	32,02
Ю	27	16,63
ЮЗ	18	6,38
З	45	20,87
СЗ	227	90,55

0,41 км²; т.е. средние размеры ледников за 44 года стали меньше на 0,19 км², или почти на 1/3.

Что касается изменения размеров площади оледенения Китайской Джунгарии, то за 27 лет (1973–2000 гг.) она уменьшилась с 251,45 до 181,88 км², т.е. на 69,57 км² (27,7%). Скорость сокращения площади оледенения здесь составила 2,58 км²/год (1,03 %/год). С учётом этих данных площадь оледенения всего Джунгарского Алатау в 2000 г. была равна 709,88 км². Если принять скорость сокращения площади льда в китайских бассейнах такой же, как и в имеющей идентичные условия существования ледников Казахстанской Южной Джунгарии, то площадь оледенения в Китайской Джунгарии в 1956 г. должна быть увеличена по сравнению с 1973 г. примерно на 30 км² и составить около 280 км². Тогда общую площадь ледников в регионе в 1956 г. можно оценить в 1120 км². Кстати, ещё В.А. Зенкова [6] оценивала площадь оледенения всего Джунгарского Алатау в середине 1950-х годов аналогичной цифрой – 1120,3 км². Исходя из этой величины, за 44 года ледниковая система всей Джунгарии потеряла около 410 км² (точнее 411,2 км²) своей площади при средней скорости в 9,14 км²/год (по 0,82 %/год). Такие потери ледниковой площади характерны для соседнего Заилийского Алатау [2] и других горных систем Тянь-Шаня и Памира.

За весь период ледники Казахстанской Джунгарии с «теневыми» экспозициями (С, СВ, СЗ) потеряли 36,6% своей площади (от 693,4 км² в 1956 г.), а ледники «солнечных» экспозиций (Ю, ЮВ, ЮЗ) – 33,8%. При этом отметим, что площадь ледников северных экспозиций в 1956 г. была почти в 15 раз больше, чем южных. Распределение числа и площадей ледников, размером > 0,1 км², по экспозициям в 2000 г. в границах всего региона, включая его китайскую часть, дано в табл. 3. В конце XX в., как и в его середине (в 1956 г.), большинство лед-

Таблица 4. Изменение высот характерных точек ледников

Район	Средняя высота концов ледников, м			Средняя высота высших точек, м		
	1956 г.	2000 г.	1956–2000 гг.	1956 г.	2000 г.	1956–2000 гг.
Восток	3290	3353	+63	3854	3830	–24
Север	3329	3390	+61	3925	3905	–20
Запад	3260	3328	+68	3756	3739	–17
Юг	3388	3458	+70	3921	3903	–18
<i>Среднее</i>	3325	3391	+66	3870	3851	–19

ников и их площадей в регионе были приурочены к теневым экспозициям. В 2000 г. из 1317 ледников с общей площадью 690,12 км², вошедших в эту сводку, на склонах с северными экспозициями находилось 1056 ледников (80,1% общего числа) с площадью 561,5 км² (81,3% общей площади), а на склонах с южными ориентациями было только 92 ледника (7,1%) с площадью 55,03 км² (8,0%); на восток и на запад было ориентировано 169 ледников (12,8%) с площадью 73,59 км² (10,7%).

Изменение длины ледников – ещё один чёткий признак общей деградации оледенения региона. За 44 года в целом по ледниковой системе средняя длина 640 существовавших в 1956 г. и сохранившихся к 2000 г. ледников уменьшилась с 1,66 до 1,28 км. В отдельных частях Казахстанской Джунгарии это уменьшение варьировало от 364 м на западе до 383 м на юге, составив в среднем 377 м, из которых 340–350 м приходится на отступление концов ледниковых языков. Средняя скорость отступления составила 7,5–8 м/год. В Китайской Джунгарии за 27 лет средняя длина 245 сохранившихся к 2000 г. ледников сократилась на 0,19 км – с 1,36 до 1,17 км, т.е. по 7 м/год.

Изменение абсолютных высот характерных точек ледников – их концов, высших точек, фирновой линии – также служит важным показателем степени дегляциации региона (табл. 4). Как видно, менее всего «втянули» свои языки ледники Северной Джунгарии и почти на 10 м выше – ледники Южной Джунгарии. Эта разница прежде всего обусловлена ориентацией обоих макросклонов – северного и южного. Средняя скорость поднятия концов ледников за 44 года составила 1,5 м/год, а опускания высших точек – 0,4 м/год. Концы ледников Китайской Джунгарии за менее длительный срок поднялись на 68 м – с 3463 до 3535 м, а их верхние точки опустились на 26 м – с 3984 до 3958 м. В 2000 г. средняя высота концов языков ледников по региону составила 3430 м, а их высших точек – 3880 м. Поднятие концов ледников и опускание их высших

точек обусловило уменьшение вертикального диапазона оледенения от 81 м в Северной Джунгарии до 88 м в Южной Джунгарии. По Казахстанской Джунгарии в целом этот показатель уменьшился на 85 м – с 545 до 460 м, а в Китайской Джунгарии на 94 м – с 517 до 423 м. Вертикальный диапазон оледенения по региону в 2000 г. составил 450 м.

Изменение высоты фирновой линии. По данным Каталогов ледников [7–10], высота фирновой линии (границы питания), определённая по методу Куровского, в 1956 г. варьировала от 3470 м в наиболее увлажнённой и пониженной Западной Джунгарии до 3600 м в более аридной Южной Джунгарии, составляя в среднем для казахстанской части региона 3550 м. Имеющиеся данные по распределению площади ледников по высоте в 2000 г. позволили рассчитать среднюю для региона высоту фирновой линии H_{ϕ} по методу Куровского как среднюю взвешенную высоту ледниковой поверхности:

$$H_{\phi} = \sum f_i h_i / F, \quad (1)$$

где f_i – площади отдельных высотных зон, км²; h_i – их средние высоты, м; $F = \sum f_i$.

Рассчитанная по формуле (1) высота фирновой линии на ледниках Казахстанской Джунгарии в 2000 г. равна в среднем 3615 м (от 3510 м на западе до 3680 м на юге). По сравнению с 1956 г. она увеличилась на 65 м. С учётом определённой таким же методом высоты фирновой линии в Китайской Джунгарии, равной 3770 м, её средняя высота по региону в 2000 г. составила 3655 м. В 2000 г. в пределах всей горной Джунгарии на 400-метровый высотный интервал (3400–3800 м) приходилось 477,9 км² ледниковой площади (67,3%), ниже 3400 м – 70 км² (9,9%), выше 3800 м – 162 км² (22,8%).

В связи с заметным поднятием фирновой линии значение ледникового коэффициента в Казахстанской Джунгарии за 44 года уменьшилось с 1,13 до 0,90, а коэффициент AAR снизился с 0,53 до 0,47 при площади области аккумуляции в 2000 г. 249,8 км² и области абляции 278,2 км².

Таблица 5. Изменение объёма ледников, км³

Район	1956 г.	1990 г.	2000 г.	1956–2000 гг.	
				км ³	в %
Восток	3,9288	2,9111	2,3197	–1,6091	–40,9
Север	12,4543	8,7858	7,8924	–4,5619	–36,6
Запад	8,5542	6,2572	5,2019	–3,3523	–39,2
Юг	8,3688	5,5829	4,8304	–3,5384	–42,3
Всего	33,3061	23,5370	20,2444	–13,0617	–39,2

В Джунгарской ледниковой системе в 2000 г. на долю области питания приходилось 345,7 км², а на долю области абляции – 364,2 км², т.е. области аккумуляции стали занимать меньше половины площади ледников, что ещё раз свидетельствует о регрессирующем состоянии оледенения региона.

Изменение объёма ледников и оценка баланса их массы. Сокращение площади и длины ледников, а также других характеристик оледенения, сопровождавшееся понижением уровня поверхности оледенения, естественно, вызвало уменьшение их толщины и объёма содержащегося в них льда. Объём ледников за все «реперные» годы рассчитывался по формуле Мазо–Глазырина [11], разработанной ими на основе динамической модели квазистационарного ледника с учётом характерных для горных ледников морфометрических параметров (площади, длины и уклонов ледника), а также реологии льда:

$$V = 1,63Fh_0 / (1 + \Delta z/h_0)^{0,774}; h_0 = 0,073L^{0,5}, \quad (2)$$

где V – объём ледника, км³; F – площадь ледника, км²; Δz – разность максимальной и минимальной отметок ледника, км; L – длина ледника, км.

Изменения объёма льда ледников, рассчитанные по формуле (2), приведены в табл. 5, из которой видно, что за 44 года относительное уменьшение объёма ледников по отдельным районам находится в сравнительно небольших пределах – от 36,6 до 42,3% и в среднем по ледниковой системе составляет 39,2% первоначальных запасов льда в 1956 г. Объёмы ледников уменьшались в соответствии с сокращением их площадей. Минимальное относительное уменьшение объёма ледников Северной Джунгарии согласуется с наименьшим относительным сокращением площади оледенения. Наоборот, максимум относительного уменьшения объёма оледенения (более 42%) в ледниках Южной Джунгарии отвечает самым большим относительным потерям площади льда в них. Максимальные абсолютные потери объёма льда – более

4,5 км³ – отмечены у ледников наиболее «оледенелой» Северной Джунгарии. Средняя скорость уменьшения объёма ледников за весь период составила 0,31 км³/год, что соответствует скорости относительного сокращения объёма льда по 0,89 %/год. Довольно близкие по величине относительные потери массы льда (39,2%) и площади ледников (37,2%) за 44 года, а также средние скорости относительного сокращения объёма (0,89 %/год) и площади оледенения (0,85 %/год) достаточно убедительно свидетельствуют о достоверности определения объёмов ледников и правильности выбора способа расчёта этого важнейшего показателя.

Сравнение объёмов 46 джунгарских ледников, определённых с помощью радиолокации и сейсмозондирования и приведённых в монографии П.А. Черкасова [15, с. 57, 58], с объёмами льда, рассчитанными по формуле (2), показало их соответствие: разность суммарных объёмов ледников (4,18 и 4,29 км³) составила 2,6%, а разность средних объёмов ледника (0,091 и 0,093 км³) – 2,2%. Отметим некоторое запаздывание (на 2%) изменений площадей ледников во всех частях региона по отношению к изменениям их объёма (массы), что, видимо, обусловлено значительной потерей толщины льда в пределах площади, ограниченной контурами ледников. Объём ледников Китайской Джунгарии за 27 лет сократился с 8,9913 до 6,4971 км³, т.е. на 2,4942 км³ (27,7%), по 1,03 %/год. В 2000 г. объём ледников всей Джунгарской ледниковой системы был равен 26,7415 км³.

По данным, полученным в результате регионального мониторинга джунгарских ледников, можно оценить величину и знак баланса массы как отдельных ледников, так и всей ледниковой системы. Мы использовали следующую формулу для расчёта среднегодового значения баланса массы ледника за период между измерениями в «реперные» годы:

$$B = \frac{(V_2 - V_1)\rho}{TF} 10^5, \quad (3)$$

где B – баланс массы ледника, г/см²; $(V_2 - V_1)$ – изменение объёма ледника за расчётный интервал времени, км³; T – расчётный интервал времени, число лет; F – средняя площадь оледенения за расчётный период, км²; ρ – плотность льда, принятая равной 0,9 г/см³.

Средний за 44 года баланс массы оледенения, рассчитанный по формуле (3), изменяется от –36,2 г/см² в Северной Джунгарии до –40,2 г/см² (из-за стаивания половины ледников) в Восточной

Джунгарии и в целом по казахстанской её части равен $-37,6 \text{ г/см}^2$. Таким образом, общая безвозвратная потеря массы со всей площади ледников за это время составила около 17 м в слое воды.

Площадь оледенения Казахстанской Джунгарии в настоящее время, в конце первого десятилетия XXI в., подсчитана по формуле сложных процентов, учитывающей темпы сокращения площади оледенения:

$$F_t = F_0(1 - p/1000)^t, \quad (4)$$

где F_t – площадь оледенения определяемого года, км^2 ; F_0 – площадь оледенения опорного («реперного») года, км^2 ; p – темп сокращения площади льда, $\%/год$; t – число лет между определяемым и опорным годом.

Расчёт по формуле (4) показал, что в 2010 г. площадь ледников Казахстанской Джунгарии уже была меньше 500 км^2 , точнее – 465 км^2 (55% площади оледенения в 1956 г.).

Прогностические соображения о состоянии ледников Джунгарии в XXI в.

В условиях возрастающего антропогенного воздействия на природную среду и вероятного потепления климата в высокогорье процесс дегляциации будет продолжаться, что приведёт к сокращению ледникового и общего речного стока. Для гляциологического прогноза можно использовать способ определения времени существования ледников на основе расчётных значений объёма и баланса массы оледенения в «реперные» годы. Исходя из рассчитанных величин объёма ледников V в 1956 г., среднего баланса внешнего массообмена B за 44 года и средней площади оледенения F за этот же период, по формуле

$$G = V/BF \quad (5)$$

определяется время исчезновения ледников G (в годах), а затем по выражению

$$K_T = 1956 + G \quad (6)$$

устанавливается номер календарного года K_T исчезновения оледенения в частных бассейнах и по ледниковой системе в целом.

Расчёты по формулам (5) и (6) показали, что к середине века площадь оледенения в регионе сократится до 200 км^2 , а к 2090 г. ледники здесь практиче-

ски исчезнут. При этом раньше всего, к 2076 г., растают ледники Южной Джунгарии, к 2082 г. – Восточной и Китайской Джунгарии, к 2087 г. – Западной Джунгарии. Дольше других, до 2092 г., сохранятся ледники Северной Джунгарии, залегающие на самых высоких гипсометрических уровнях.

Заключение*

Согласно нашему прогнозу, существование современного оледенения горной Джунгарии, включая её китайскую часть, ограничивается ближайшей сотней лет. В своём прогнозе довольно быстрого исчезновения оледенения в пределах достаточно крупной ледниковой системы мы не одиноки. Наш прогноз идентичен прогнозам, полученным ранее разными методами по другим горно-ледниковым регионам. Во многих работах прогнозируется полное исчезновение оледенения к концу XXI в. К такому заключению пришли авторы работ, исследующие оледенение северного склона Заилийского Алатау [2], Кавказа [3], Новой Земли [4], горных ледников Норвегии [20], Скалистых гор США [18], самых высоких вершин Африки [1] и др. В заголовках двух статей [17, 21] поставлен вопрос: исчезнут ли альпийские ледники в следующем (XXI) столетии? И в конце их даётся положительный ответ.

Как справедливо утверждает Т.В. Звонкова [5], в прогностической деятельности следует соблюдать принцип непрерывности, так как «прогноз – это не что-то неизменное, окаменевшее». Поэтому в приведённый в этой статье сценарий прогноза динамики сокращения площади оледенения время от времени должны вноситься соответствующие коррективы по результатам анализа вновь получаемых космических снимков. Поправки и уточнения прогноза могут быть обусловлены нелинейностью динамики сокращения ледников, которое может «ускориться» в связи с ростом дисперсности оледенения. Возможно, что реальное состояние ледниковой системы, особенно во второй половине прогнозируемого срока, будет более «суровым и тяжёлым» по сравнению с прогнозом.

Согласно нашему прогнозу, который можно считать базовым, после 2090 г., когда ледники исчезнут, ледниковое питание горных рек Джунгарии прекратится, а их сток будет формироваться только за счёт талых снеговых и дождевых вод

*Приведённый в статье прогноз развития оледенения на протяжении XXI в., как и в других, цитируемых в этом разделе статьях, исходит из неизменности продолжающегося глобального потепления, что в свою очередь также является недоказанным приближением. – *Примечание редакции.*

(и, разумеется, грунтового питания). Тем не менее, объём речного стока по сравнению с современным уменьшится незначительно – в пределах 8–10% (при условии сохранения неизменности атмосферных осадков). Один из главных выводов нашего исследования можно сформулировать следующим образом: даже полное исчезновение ледников не приведёт к катастрофическому уменьшению стока рек горной Джунгарии (как полагают некоторые специалисты). Вместе с тем определённые проблемы в водном хозяйстве региона появятся в связи с менее благоприятным внутригодовым распределением стока: снижение, а затем и ликвидация регулирующей способности ледников приведут к сдвигу максимума стока горных рек с июля–августа на май–июнь; во второй половине лета (после стаивания сезонного снежного покрова на всех высотных уровнях) он будет минимальным, а реки – маловодны и их оросительная способность заметно снизится.

Литература

1. Вилесов Е.Н. Скоро ли исчезнут льды и снега Килиманджаро? // Экологическое образование в Казахстане. 2007. № 3. С. 19–22.
2. Вилесов Е.Н., Уваров В.Н. Эволюция современного оледенения Заилийского Алатау в XX веке. Алматы: изд. КазГУ, 2001. 252 с.
3. Голодковская Н.А. Реконструкция оледенения Центрального Кавказа в XIII–XX столетиях (по лишенометрическим данным): Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Институт географии АН СССР, 1982. 27 с.
4. Давидович Н.В. Учет типов льдообразования в прогнозировании баланса массы ледников по заданным параметрам климатического прогноза // МГИ. 1986. № 57. С. 125–131.
5. Звонкова Т.В. Принципы и методы регионального географического прогнозирования // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1975. № 4. С. 19–25.
6. Зенкова В.А. Ледники Джунгарского Алатау // Вопросы географии Казахстана. 1959. Вып. 3. С. 138–155.
7. Каталог ледников СССР. Т. 13. Вып. 2. Ч. 7. Реки Тентек, Ргайты. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 82 с.
8. Каталог ледников СССР. Т. 13. Вып. 2. Ч. 6. Бассейны рек Биен, Аксу, Лепсы. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 84 с.
9. Каталог ледников СССР. Т. 13. Вып. 2. Ч. 4. Бассейны рек Хоргоса, Усека. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 100 с.
10. Каталог ледников СССР. Т. 13. Вып. 2. Ч. 5. Бассейн р. Каратала. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 100 с.
11. Мазо А.Б., Глазырин Г.Е. Метод расчета объема стационарного горного ледника // Тр. САРНИГМИ. 1986. Вып. 17 (198). С. 88–98.
12. Панов В.Д. Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 432 с.
13. Поповнин В.В. Бюджетная эволюция репрезентативного ледника Джанкуат (Центральный Кавказ). М.: изд. МГУ, 1989. 26 с.
14. Руководство по составлению Каталога ледников СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 154 с.
15. Черкасов П.А. Расчет составляющих водно-ледового баланса внутриконтинентальной ледниковой системы. Алматы: «Каганат», 2004. 334 с.
16. Щетинников А.С. Изменение размеров оледенения Памиро-Алая за 1957–1980 годы // МГИ. 1993. Вып. 76. С. 77–83.
17. Alpengletschersterben im nächsten Jahrhundert? // Schweiz. Ing. und Archit. 1994. № 47. S. 995.
18. Ferrigno J.G. Recession of Grasshopper Glacier, Montana, since 1898 // Annals of Glaciology. 1986. V. 8. P. 65–68.
19. Glacier inventory of China. III. Tien Shan mountains (interior drainage area of Junggar basin in northwest). Science Press. 1986. 201 p.
20. Nesje A., Vakkje J., Dahl S.O., Lie O., Matthews J.A. Norwegian mountain glaciers in the past, present and future // Global and Planetary Change. 2008. № 1–2. P. 10–27.
21. Zemp M., Haeblerli W., Hoelzle M., Paul F. Alpine glaciers disappear within decades? // Geophys. Research Letters. 2006. № 13. P. L. 13504/1–L. 13504/4.

Summary

The features of spatial and temporal changes of glaciation in Djungarian Alatau for 44 years (1956–2000) are discussed in the paper. The evaluation of the glacier evolution based on the comparison of their morphometric characteristics, obtained by cataloging in 1956, 1990 and 2000. The aerial photographs are used for the first two periods, and Landsat satellite imageries with resolution of 15 m – for 2000. In addition the maps of glaciation in scale 1 : 25 000 were used for 1990 and 2000. The result of this work showed that during 44 years 341 glaciers melted, 227 glaciers dissolved, and their total number decreased from 1412 to 1298. The area of glaciers reduced from 841 to 528 km² (37.2%, to 0.85 %/year). The altitude of the firm line lifted by 65 m, from 3550 m up to 3615 m. Total ice volume diminished from 39.3 down to 20.2 km³ (39.2%, to 0.89 %/year). The average value of the glacier mass balance now equals –37,6 g/cm². The total area of glaciers in the region in 2010 is estimated at 465 km². According to the author's forecast, glaciers in Djungarian Alatau may disappear to 2090.