

Каталогизация горных ледников и генерализация их распределения по материалам дистанционного зондирования

В.Г. Коновалов

*Институт географии РАН, Москва
119017 Москва, Старомонетный 29
vladgeo@gmail.com*

В Индии, Непале, Китае, Пакистане и России получены векторные файлы контуров ледников на территории Азии путем обработки топографических карт, материалов аэрофотосъемки, снимков со спутников LANDSAT7-ETM+, TERRA-ASTER, SPOT, IRS-LISS и других космических аппаратов. Эти данные служат основой для оценки современных размеров оледенения в бассейнах рек Высокогорной Азии и расчетов его гидрологического режима. Выполнена тематическая обработка векторных файлов программными средствами ГИС IDRISI Andes с использованием известных цифровых моделей рельефа GTOPO 30 и SRTM 3 (NASA, USGS <http://srtm.csi.cgiar.org/>). В результате для каждого ледника получен следующий набор параметров. 1. Минимальная и максимальная высоты ледника над уровнем моря. 2. Средняя высота ледника или высота границы области питания. 3. Площадь ледника в целом и областей абляции и аккумуляции. 4. Отношения площадей: а) областей аккумуляции и абляции, б) области аккумуляции и всего ледника. 5. Распределение площади ледника как функция абсолютной высоты. 6. Среднеквадратичное отклонение высот внутри контура ледника. 7. Объем ледника как функция его площади. 8. Географические координаты центра тяжести контура ледника. 9. Средние значения ориентации (азимута) и уклона поверхности ледника. С целью оптимизации методики расчетов режима оледенения, в составе генеральных совокупностей ледников в бассейнах притоков рек Амударья, Сырдарья, Инд, Ганг, Брахмапутра и Тарим были выделены 3533 однородные группы объектов. В качестве классификационных критериев последовательно использованы 8 градаций ориентации ледников и 23 градации их площади. Для каждой группы определены средние и средние взвешенные по площади морфометрические характеристики ледников. Для демонстрации возможностей метода использованы данные 27 698 ледников общей площадью 43 981 км² в бассейнах рек Высокогорной Азии.

Ключевые слова: каталогизация, дистанционное зондирование, Высокогорная Азия, ГИС и цифровые модели рельефа, группировка ледников.

Введение

Современное оледенение на поверхности Земли состоит из трех основных типов: материковое (покровное), островное и горное континентальное. Обобщенная информация о региональном распределении площади оледенения на Земле приведена в табл. 1. Данные в табл. 1 следует рассматривать как приближенные, поскольку в ряде случаев использована неполная, неточная или устаревшая информация. Кроме того, эти сведения не синхронны во времени, что является существенным недостатком большинства гляциологических справочных данных.

Набор высотно-площадных параметров, как для индивидуальных ледников, так и их совокупностей, содержится в глобальной (<http://www.geo.unizh.ch/wgms/>) и региональных базах данных (например, [1, 4-5, 11, 13, 15-17, 19, 25-28, 30-31]). Методики подготовки исходной информации для каталогов ледников описаны в [2, 5-6, 11, 17, 25-31]. Каталоги включают количественные и описательные характеристики ледников. Основой для определения высотно-площадных параметров служат дистанционные изображения гляциальных областей, полученные в результате аэрофотосъемки и/или зондирования со спутников. При этом используется два основных метода. 1. Перенос на крупномасштабные топографические карты отдешифрованных контуров: ледника в целом, областей абляции, аккумуляции, открытой поверхности ледника и сплошного моренного покрова.

После ручной и весьма трудоемкой обработки карт получаем площади всех перечисленных контуров, азимуты для областей аккумуляции и абляции, а также длину ледника в целом (L_{gl}) и открытой его части, высоту сезонной снеговой границы и/или границы фирнового питания, минимальную (Z_{min}) и максимальную (Z_{max}) высоты ледника и его географические координаты. Применение расчетных методов (см., [2, 7, 24, 29]) дает среднюю высоту ледника $Z_{aver}=(Z_{min}+Z_{max})\times 0,5$, среднюю ширину $W_{gl}=F_{gl}/L_{gl}$, среднюю толщину (H_{gl}) и объем (V_{gl}) как функцию площади ледника (F_{gl}) или как $V_{gl}=H_{gl}\times F_{gl}$. Возможны также упрощенная оценка среднего уклона поверхности ледника $U_{gl}=\arctg[(Z_{max}-Z_{min})/L_{gl}]$ и ряда других характеристик [30]. В рамках первого метода точность определения параметров ледников зависит от разрешающей способности дистанционных изображений и масштаба топографической основы. Считается [2], что при использовании аэрофотосъемки гляциальных областей в масштабе 1:25 000÷1:35 000 и топографических карт 1:50 000÷1:100 000, точность определения площадных характеристик и длины составляет соответственно $\pm 0,1$ км² и $\pm 0,1$ км, а высотных $\pm 0,01$ км. Информация о размерах ледников в глобальном каталоге Всемирной Службы Мониторинга Ледников (WGMS) получена описанным выше методом и относится к 50-60 годам прошлого столетия. Повторная каталогизация меняющихся во времени параметров оледенения тем же способом оказалась невозможной, из-за огромных затрат труда и времени. В настоящее время интенсивно развивается [30] второй способ каталогизации континентальных ледников, основанный на комплексном использовании спутниковых изображений достаточно высокого разрешения, цифровых моделей рельефа и методов обработки векторных контуров ледников средствами ГИС. Этот способ решает проблему продолжения мониторинга размеров оледенения Земли, поскольку обеспечивает получение такого же и даже большего числа его параметров. В связи с этим, и как вклад в международный проект ГЛИМС (Глобальный Мониторинг Оледенения Земли из Космоса - <http://www.glims.org/>), в работе рассмотрены различные аспекты обработки векторных полигонов-ледников и пространственного обобщения полученных результатов.

Таблица 1. Распределение оледенения на Земле (данные [16, 21])

Регион	Тип оледенения	Площадь	
		$\times 10^3$ км ²	%
Европа	III	17,29	0,11
Азия	III	120,51	0,74
Арктические острова	II	320,02	1,97
Гренландия	II	1 700,00	10,44
Северная Америка	III	124,66	0,77
Северное полушарие	II – III	2 282,48	14,02
Новая Зеландия	III	1,16	0,01
Южная Америка	III	25,00	0,15
Острова в Субантарктике	II	7,00	0,04
Антарктика, ледниковые купола	I	169,00	1,04
Антарктика, покровное оледенение	I	12 300,00	75,53
Шельфовые ледники	I	1 500,00	9,21
Южное полушарие	I – III	14 002,16	85,99
Всего	I – III	16 284,64	

Примечание: I - материковое (покровное), II - островное, III - горное континентальное

Постановка задачи

В бассейнах ряда крупнейших рек Азиатского материка Инда, Ганга, Брахмапутры, Тарима, Амударьи и других сосредоточена большая часть континентального оледенения Евразии. При этом известные оценки [1, 4, 11, 13, 25-28, 31] размеров ледников были получены в течение 1960-2000 гг. Очевидно, что часть этих данных уже устарела, кроме того они существенно несинхронные во времени. Для регулярного мониторинга колебаний ледников в бассейнах рек Высокогорной Азии необходима региональная база гляциологических данных, унифицированная по составу и методике подготовки. В наборе морфометрических параметров ледников должны быть характеристики однообразные для всего исторического ряда мониторинга оледенения. Помимо решения вопросов мониторинга, существует также специфика подготовки входной информации для расчетов гидрологического режима оледенения, которая также рассмотрена в числе поставленных задач. В принципе задача систематизации результатов дистанционного зондирования ледников сформулирована также в проекте ГЛИМС. Однако гляциологическое содержание адекватное каталогу ледников в базе данных ГЛИМС отсутствует.

Необходимыми и достаточными условиями для каталогизации горного оледенения по материалам дистанционного зондирования приняты: а) наличие региональных совокупностей контуров ледников, оцифрованных в географических координатах и подготовленных как векторные файлы полигонов в формате ESRI (проекция LatLong, эллипсоид WGS 1984); б) цифровая модель рельефа (GTOPO30 или SRTM3). Понятие контур ледника подразумевает нетто-площадь ледника в целом, за вычетом скальных нунатаков. По поводу того как определять площадь ледника и возможных ошибок тематического дешифрирования существуют различные точки зрения и оценки (например, [8, 20, 22, 30]). Поскольку анализ этих вопросов выходит за рамки нашей работы, будем полагать, что в результате тематической векторизации спутниковых изображений в оперативном или полуавтоматическом режиме [30] получены файлы полигонов-ледников удовлетворительного качества. Рассмотрим далее способы определения высотно-площадных и других параметров морфометрии ледников в оперативном режиме, т.е. без использования топографических карт.

Определение количественных характеристик ледников

Достаточно подробные описания континентальных ледников Земли и районов их расположения содержатся во многих работах, например, [1, 3-4, 12, 31]. В связи с этим целью настоящего исследования являются только методы и результаты, связанные с каталогизацией региональных морфометрических характеристик горного оледенения и их использованием в прикладных задачах.

Географические координаты центра тяжести полигонов, периметр и площадь

Для расчета может быть использовано меню Editor в ГИС ArcMap, модули AREA, PERIM в ГИС IDRISI или меню GIS TOOLS в программе MapWindow GIS. Здесь и далее не приводится описание порядка выполнения процедур, которые находятся в руководствах для соответствующих ГИС. Результаты расчетов различными ГИС могут незначи-

тельно отличаться. Если внутри контура ледника идентифицированы и отдельно оцифрованы полигоны нунатаков и сплошной морены, то определение площадей F_r и F_c для соответствующих фаций также выполняется с помощью модуля AREA. В принципе расчет площади полигонов – задача достаточно стандартная для любых ГИС, поэтому названные здесь программные средства, не являются единственно возможными.

Высотные параметры полигонов-ледников

Комплекс характеристик (Z_{min} , Z_{max} , Z_{aver} , $\Delta Z = Z_{max} - Z_{min}$, а также мода распределения высот и их среднеквадратичное отклонение внутри полигона) может быть получен с помощью функциональных возможностей ГИС IDRISI (модуль EXTRACT). Этот модуль предусматривает определение Z_{aver} как среднее для всех высот внутри полигона. Перед выполнением расчетов необходимо преобразовать векторный файл полигонов-ледников в растровый формат, а также выполнить сгущение изолиний (модуль EXPAND) во втором растровом файле, содержащем абсолютные высоты района расположения ледников. Вывод результатов выполняется в форме табличного или растрового файла, который может быть преобразован в векторный формат. Принято, что высота Z_{aver} или мода распределения высот внутри полигона соответствуют средней высоте границы питания по методу Куровского.

Азимут и уклон поверхности ледника

Информационной основой для расчета азимута и уклона поверхности ледника служат цифровая модель рельефа ЦМР, например SRTM3, и растровый файл полигонов-ледников для рассматриваемой гляциальной области. Последовательная тематическая обработка ЦМР выполняется в среде ГИС IDRISI с помощью модулей ASPECT, SLOPE и EXTRACT. Средние величины азимута и уклона получаем для каждого полигона-ледника в форме табличного или растрового файла, который может быть преобразован в векторный формат.

Длина ледника

В работе [2] приведено следующее определение этого параметра: «наибольшей длиной ледника следует считать расстояние по его оси от конца ледника до верховьев самого длинного из питающих его ледниковых потоков». Далее на трех страницах даны уточнения, дополнения и комментарии, из которых следует, что численная оценка L_{gl} пока возможна только в интерактивном режиме для каждого из полигонов-ледников. В частности с помощью меню Measure Tools в программе Global Mapper. В итоге получаем векторный файл с искомым параметром и средний азимут для заданной экспертом линии наибольшей длины ледника на его плане.

Характеристики ледника, производные от высотно-площадных параметров

1. Объем ледника, рассчитанный по эмпирическим формулам типа $V_{gl} = f(F_{gl})$ или $V_{gl} = H_{gl} \times F_{gl}$, опубликованным в работах [2, 7, 24, 29]. Авторы рекомендуют применять эти формулы с учетом размеров ледников и их морфологических типов. 2. Среднеквадратическое отклонение высот σ_z для каждого полигона-ледника и значения F_{gl} , Z_{min} , Z_{max} позволяет получить важную гляциологическую характеристику – интегральную функцию распре-

деления площади в интервале $Z_{min} \div Z_{max}$ в предположении, что это распределение соответствует нормальному закону. В частности, зная площадь сплошной морены, с помощью обратного преобразования нормированной функции Лапласа находим верхний предел высоты распространения морены на леднике Z_m . Этот параметр необходим для расчета объема таяния льда под покровом морены. 3. Интегральное распределение площади ледника в интервале $Z_{min} \div Z_{max}$ в работе [12] предложено аппроксимировать формулой:

$$f(z) = F_{gl} \cdot 0,5 \left[1 + \tanh((z - 0,988 \cdot Z_{aver} - 0,049) / 0,483 \cdot F_{gl}^{0,486}) \right], \quad (1)$$

которая для определения площади ледника в интервале $Z_{min} \div Z_{aver}$ или площади области абляции $F_{ab} = f(Z_{aver})$ записана в виде:

$$f(Z_{aver}) = F_{gl} \cdot 0,5 \left[1 + \tanh((Z_{aver} - 0,988 \cdot Z_{aver} - 0,049) / 0,483 \cdot F_{gl}^{0,486}) \right] \text{ км}^2 \quad (2)$$

Здесь высоты в км над уровнем моря, площадь в км².

4. Эмпирическая зависимость:

$$h_C(Z_{min}) = 88 \cdot \Omega \text{ см}, \quad (3)$$

полученная в работе [23], используется для расчета средней толщины морены h_C на конце ледника, то есть на высоте Z_{min} . Здесь Ω – отношение площадей морены и области абляции. 5. Площадь открытой поверхности области абляции $F_O = F_{ab} - F_C$ и области аккумуляции $F_{ak} = F_{gl} - F_{ab}$. 6. Известные ледниковые коэффициенты $k_1 = F_{ak} / F_{ab}$ и $k_2 = F_{ak} / F_{gl}$. Таким образом, тематическое дешифрирование материалов дистанционного зондирования и обработка их программными средствами ГИС обеспечивает оперативное продолжение мониторинга ледников и получение количественной информации, превышающей ее объем в существующих региональных каталогах ледников. Этот вывод не распространяется на определение длины ледника, которое пока возможно только в интерактивном режиме обработки каждого полигона-ледника. В связи с большой неопределенностью этого параметра, особенно на сложных и дендритовых ледниках, имеет смысл выборочно включать его в каталоги по решению исполнителей.

Результаты оперативной каталогизации континентального оледенения следует сохранять в форме таблиц MS EXCEL, как это принято в существующих каталогах. Для повышения надежности и репрезентативности параметров, рассчитанных на основе высотно-площадных характеристик, целесообразно выполнить их генерализацию и осреднение для однородных групп ледников в пределах крупного речного бассейна. Метод решения этой задачи и его результаты рассмотрены далее.

Пространственная генерализация параметров оледенения

Вычислительной мощности современных компьютеров вполне достаточно для расчета гидрологического режима всех ледников Земли как функции климатических переменных, результатов каталогизации и динамических характеристик. Проблема заключается в том, что существующая детальность полей метеорологических характеристик, особенно в высокогорных областях Евразии, не позволяет получить величины осадков,

солнечной радиации, температуры и влажности воздуха и т.д. в масштабе каждого отдельного ледника.

В связи с этим предлагается для региональных расчетов режима континентальных ледников объединять их в квазиоднородные группы по принципу единообразия характерных площадных и высотно-морфологических параметров оледенения в каждой группе. Группы и соответствующие файлы данных образуются с помощью специальной компьютерной программы путем последовательного применения двух фильтров для совокупности ледников в речном бассейне: а) Сначала выбираются множества с одинаковой ориентацией ледников. Всего таких множеств 8 для ориентаций: N, NE, E, SE, S, SW, W, NW. б) На втором этапе каждое множество распределяется на группы ледников со значениями площади, попадающими в один из 23-х интервалов (см. табл. 2).

Таблица 2. Граничные значения интервалов площади для выделения однородных групп ледников

номера	Интервалы площади в км ²							
1-8	>0÷<=0,1	>0,1÷<=0,2	>0,2÷<=0,3	>0,3÷<=0,4	>0,4÷<=0,5	>0,5÷<=0,6	>0,6÷<=0,7	>0,7÷<=0,8
9-16	>0,8÷<=0,9	>0,9÷<=1,0	>1,0÷<=1,5	>1,5÷<=2,0	>2,0÷<=2,5	>2,5÷<=3,0	>3,0÷<=4,0	>4,0÷<=5,0
17-23	>5,0÷<=6,0	>6,0÷<=8,0	>8,0÷<=10,0	>10,0÷<=40,0	>40,0÷<=70	>70,0÷<=100	>100	

Определение средних и средних взвешенных по площади параметров для групп ледников происходит автоматически и является заключительной частью второго этапа фильтрации. Входной информацией служит комплекс морфометрических параметров для множеств и групп ледников в их конкретной региональной совокупности.

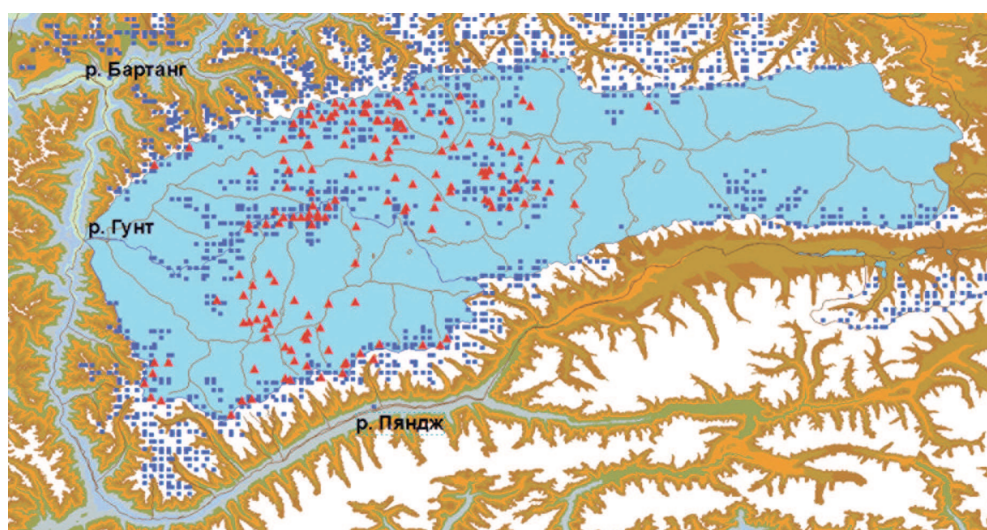


Рис. 1. Пример генерализации совокупности ледников в бассейне р. Гунт (Памир)

Голубые квадраты представляют отдельные ледники ($N_{gl}=916$);

Красные треугольники показывают расположение групп ледников ($N_{gr}=173$)

В конечном счете, все ледники в речном бассейне или в пределах заданной горной области оказываются генерализованными максимально на 184 квазиоднородные группы, если в каждом из восьми множеств заполнены все 23 площадных интервала. В результате применения операции простого и взвешенного по площади осреднения индивидуальных значений, высотно-площадные параметры и производные от них характеристики для групп ледников становятся более надежными, что повышает обоснованность гляциологических расчетов. Пример генерализации совокупности из 916 ледников в бассейне р. Гунт (приток

Пянджа-Амударьи) до 173 групп показан на рис. 1. Синие квадраты на рисунке – отдельные ледники, красные треугольники – группы. В общем случае количество генерализованных групп и их расположение зависят от выделения характерных частей территории в исходном речном бассейне. Качество результатов генерализации пространственного распределения ледников зависит от субъективных и объективных условий дешифрирования и оцифровки полигонов-ледников на спутниковых изображениях гляциальных областей, а также от разрешающей способности ЦМР по горизонтали и вертикали. Негативное влияние субъективного фактора можно уменьшить путем привлечения к работе квалифицированных экспертов и за счет использования для идентификации объектов широких функциональных возможностей программы GOOGLE EARTH. Разрешающая способность имеющейся в свободном доступе ЦМР SRTM3 составляет [32] на 90% уровне значимости по горизонтали 20 м и по вертикали 16 м. Анализ качества SRTM3 показал [34], что результаты применения этой ЦМР для картографирования соответствуют картам масштаба 1:50 000.

Обсуждение

Наряду с решением технологических вопросов обработки спутниковых изображений оледенения, следует оценить возможность получения однородного исторического ряда наблюдений за колебаниями ледников, включающего результаты предшествующих каталогизаций. Кратко перечислим основные факторы, влияющие на однородность объединенного временного ряда.

1. Время получения дистанционных изображений оледенения и заснеженность территории являются важнейшими критериями, обеспечивающими возможность и корректность проведения и оцифровки границы между ледником и многолетними снежниками, не входящими в его область аккумуляции. В многоснежные годы неизбежно априорно неизвестное преувеличение площади ледников.

2. Условиями включения боковых и конечных морен в контур ледника считаются [2] наличие их морфологической и динамической связи с последним и решение этого вопроса при дешифрировании спутниковых изображений зависит от субъективной оценки эксперта.

3. В процессе визуального дешифрирования границ ледника не применяются какие-либо объективные количественные критерии, и конечный результат целиком зависит от квалификации эксперта. К тому же отсутствует возможность независимой оценки качества работы.

4. Границы морфометрических областей ледника в Каталоге [4] определены путем дешифрирования аэрофотоснимков масштаба 1:24 000, а при повторной каталогизации [11] использовалась космофотосъемка масштаба 1:200 000 с меньшей разрешающей способностью изображений и соответственно меньшей надежностью идентификации контуров морфометрических областей.

5. Неоднозначность рекомендаций в [2] по оконтуриванию притоков дендритовых и сложных ледников существенно затруднила последующее сравнение изменений их размеров, как уже было отмечено в работах [8-9].

6. В связи с меньшей разрешающей способностью изображений ледников со спутников TERRA и LANDSAT7 ETM+, по сравнению с аэрофотосъемкой, невозможно использование с той же точностью рекомендаций [2] для дешифрирования границ морфометрических областей ледника. Кроме того, в работах [4, 11] не приведены оригинальные карто-

схемы контуров ледников в географических координатах, что делает невозможным сравнительный графический анализ размеров оледенения для различных временных срезов.

Одним из необходимых этапов каталогизации ледников является районирование территории расположения оледенения. Наиболее целесообразным следует считать принцип выделения гидрологических бассейнов (как в Каталоге [4]), поскольку он обеспечивает возможность применения уравнения водного баланса для разработки и контроля гидрологических и гляциологических моделей. Этот же принцип был использован [31] при структурировании оледенения Китая сначала на 10 гидрологических территориальных единиц, а затем выделения в них последовательно 31, 102, 349 и 1462 самостоятельных суб-бассейнов. Векторные файлы полигонов-ледников на каждом из перечисленных уровней служат необходимой и достаточной информацией для генерализации оледенения на однородные группы ледников и определения комплекса их морфометрических характеристик.

Таблица 3. Наличие векторных файлов ледников для генерализации по методу автора

Бассейн/Страна/Источник данных	Число ледников	Площадь, км ²	Доля Площади %
р. Или [GLIMS BD http://glims.colorado.edu/glacierdata/]	374	854	0.96
Бутан [27]	678	1316	1.48
Индия [25]	2183	3412	3.84
р. Сырдарья, р. Сарыджас [GLIMS BD]	2942	4987	5.61
Непал [26]	3253	5323	5.99
Верховье р. Амударьи [данные автора]	4555	6272	7.06
Пакистан [28]	2809	7223	8.13
Китай [GLIMS BD]	46404	59500	66.94
Всего	63198	88887	100

Как следует из табл. 3, 85 % оледенения Высокогорной Азии, представленного в Каталоге WGI от 19 ноября 2007 г. готово для применения изложенной здесь методики каталогизации и группировки ледников. В настоящее время уточняется оптимальный состав суб-бассейнов, охватывающих области формирования стока рек снегово-ледникового питания на Азиатском континенте. Проведены численные эксперименты и анализ пространственного распределения параметров оледенения для следующих речных бассейнов (см. рис. 2), представляющих широкий диапазон климатических условий в пределах Высокогорной Азии: р. Юрункаш (правый приток Тарима); р. Сырдарья; притоки Вахша (Кызылсу, Муксу, Обихингоу, Сурхоб); р. Брахмапутра (9 суб-бассейнов); притоки Инда (Астор, Беас, Джелум, Рави, Сатледж, Ченаб, Шайок, Шигар, Шинго); притоки Ганга на территории Непала и Бутана (4 суб-бассейна). Всего обработано 27 698 ледников, общей площадью 43 981 км² и выделены 3533 однородные группы. В итоге получены опыт и результаты исследования пространственного распределения высотно-площадных параметров ледников на основе всей совокупности данных, а не ограниченной выборки «репрезентативных» ледников [14, 18, 33]. В частности, установлено: а) для ледников всех ориентаций и площадью до 0,4 км² наблюдается достаточно тесная связь минимальной высоты (Z_{min}) с географической долготой; б) по мере роста площади эта связь линейно убывает (см. рис. 3 А-С); в) минимальная высота ледников всех ориентаций и площадью более 40 км² практически не связана с географической долготой; г) аналогичные зависимости также установлены для максимальной высоты ледников (Z_{max}), хотя и с меньшими значениями коэффициентов корреляции; д) пространственная корреляция Z_{min} и Z_{max} с географической широтой для всех ориентаций и градаций площади ледников оказалась существенно меньше, чем с долготой.

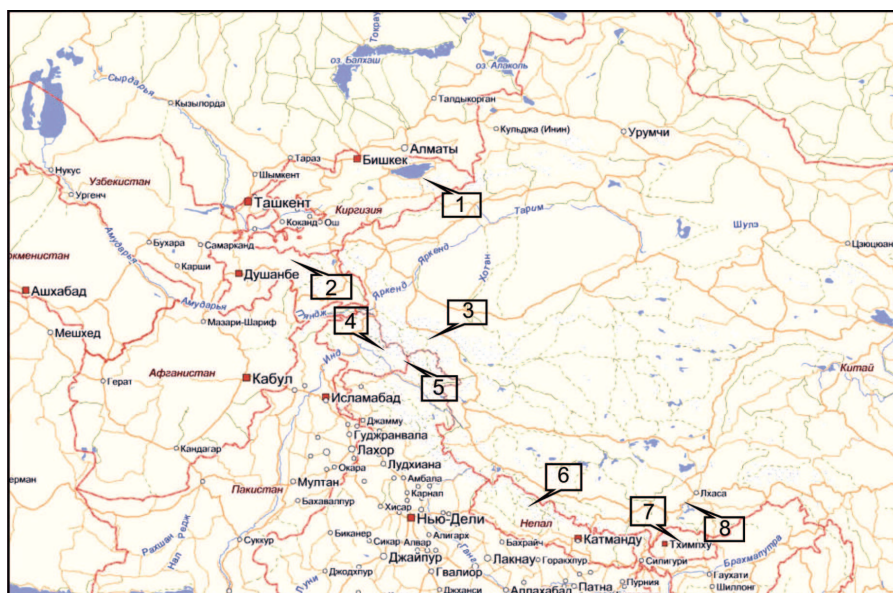


Рис. 2. Схема региона Высокогорная Азия. Пронумерованные выноски показывают:
 1 – верховье Сырдарьи (бассейн р. Нарын), 2 – бассейн р. Вахш,
 3 – бассейн р. Юрункаш (приток р. Тарим), 4 – притоки р. Инд на территории Пакистана,
 5 – притоки р. Инд на территории Индии, 6 – ледники на территории Непала,
 7 – ледники на территории Бутана, 8 – бассейн р. Брахмапутра (Тибет, Китай)

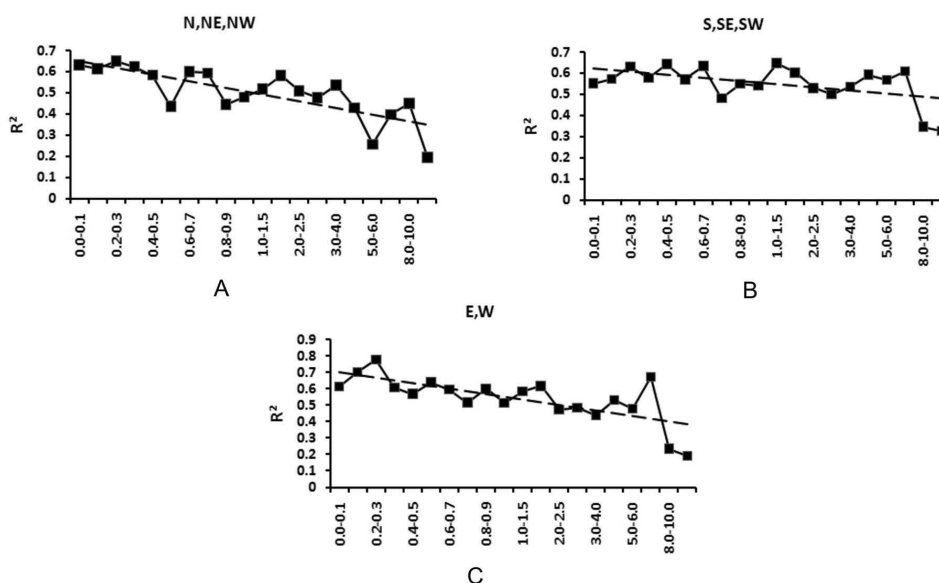


Рис. 3. Изменение R^2 (коэффициент детерминации) связи $Z_{min}=f(\lambda)$ по долготе (λ) для азимутов: N, NE, NW (A); S, SE, SW (B); E, W (C) и площадей ледников. Пунктиром показана линия тренда.
 По оси абсцисс даны интервалы площади в км^2

Получено также (рис. 4) распределение по долготе минимальной, средней и максимальной средних взвешенных высот оледенения и его площади в бассейнах рек Высокогорной Азии. Обсуждаемые здесь особенности пространственного распределения высотно-площадных параметров оледенения имеют прямое отношение к проблеме связи между климатом и ледниками, поскольку для описания распределения и расчета климатических характеристик также используются географические координаты и высота местности. Речь идет о построении в дальнейшем меняющихся во времени пространственных функций распределения морфометрических параметров групп ледников, основных влияющих на оледенение факторов климата (осадки, температура воздуха) и установлении связи между этими функциями.

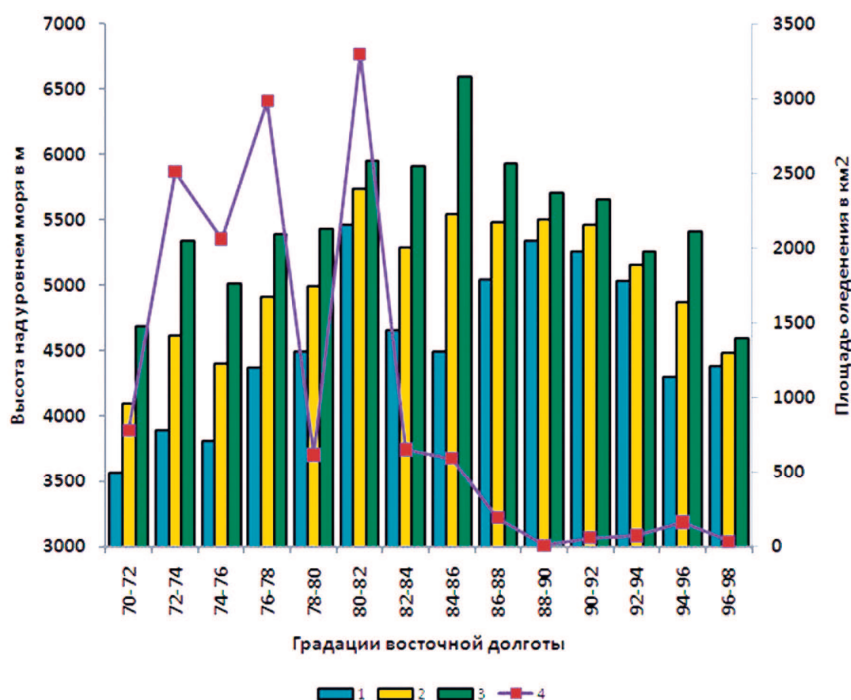


Рис. 4. Распределение по долготе ряда морфометрических характеристик оледенения в бассейнах рек Высокогорной Азии. Азимуты N, NE, NW. 1, 2, 3 – соответственно минимальная, средняя и максимальная средние взвешенные высоты ледников, 4 – площадь оледенения. Обработано 27 698 ледников, общей площадью 43 981 км²

Заключение

1. Многоспектральные изображения высокогорных территорий, получаемые со спутников LANDSAT7 ETM+, TERRA и других в настоящее время служат единственным источником регулярной информации о региональных изменениях размеров оледенения. Тематическое дешифрирование этих изображений, оцифровка контуров ледников, применение ГИС-технологий и расчетных методов способно обеспечить приемлемую точность оценок многолетней эволюции оледенения, если они основаны на статистически репрезентативных группах ледников, представляющих весь диапазон ориентаций и высотно-площадных характеристик оледенения в речном бассейне или горной области.

2. Исторический ряд данных об изменении размеров ледников, включающий сведения справочников [4, 11, 17] и результаты обработки спутниковых изображений можно считать условно однородным, в связи с различной разрешающей способностью исходных материалов и невозможностью в полной мере реализовать методические рекомендации [2] при дешифрировании спутниковых изображений.

3. Изложенный метод генерализации совокупностей ледников и примеры его применения в бассейнах рек Высокогорной Азии открывают новые возможности для объективного описания пространственного распределения высотно-площадных параметров оледенения и использования этой информации в статистически обоснованных гляциологических и гидрологических расчетах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 08-05-00661.

Литература

1. Атлас снежно-ледовых ресурсов. Том 2, Часть 2. Российская Академия наук. Институт географии, 1997, 270 с.
2. Виноградов О.Н., Кренке А.Н., Огановский П.Н. Руководство по составлению Каталога ледников СССР. Л: Гидрометеиздат, 1966. 154 с.
3. Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Ледники. Москва, «Мысль», 1989, 447 с.
4. Каталог ледников СССР. Том 14, вып. 3, части 7-12. Л.: Гидрометеиздат (1971-1978).
5. Котляков В.М., Осипова Г.Б., Поповнин В.В., Цветков Д.Г. Итоги наблюдений за колебаниями ледников на территории бывшего СССР. //МГИ. Вып. 82. 1997. с. 77-93.
6. Котляков В.М., Осипова Г.Б., Поповнин В.В., Цветков Д.Г. Последние публикации Всемирной службы мониторинга ледников: традиции и прогресс. //МГИ. Вып. 82. 1997. с. 122-136.
7. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. – М.: Научный Мир, 2006. – 392 с.
8. Осипова Г.Б., Хромова Т.Е., Цветков Д.Г. Проблемы исследования колебаний горных ледников по материалам космических съемок. //МГИ. Вып. 98. 2005. с. 129-135.
9. Осипова Г.Б., Цветков Д.Г. Опыт каталогизации пульсирующих ледников Памира. // МГИ. Вып. 85. 1998. с. 223-232.
10. Шумский П.А., Кренке А.Н. Современное оледенение Земли и его изменения. Геофизический Бюллетень № 14. - М: Наука, 1964, с. 128-158.
11. Щетинников А.С. Морфология оледенения речных бассейнов Памиро-Алая по состоянию на 1980 год (справочник). САНИГМИ, Ташкент, 1997. 148 с.
12. Щетинников А.С. Морфология и режим ледников Памиро-Алая. САНИГМИ, Ташкент, 1998. 219 с.
13. Bhagat, R. M., V. Kalia, C. Sood, P. K. Mool, and S. R. Bajracharya. Inventory of Glaciers and Glacial Lakes and the Identification of Potential Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) Affected by Global Warming in the Mountains of Himalayan Region. ICIMOD, Nepal, Kathmandu, 2003, 243 p.
14. Braithwaite, R.J. After six decades of monitoring glacier mass balance we still need data but it should be richer data. //Annals of Glaciology, v. 50, 2009, p. 191-197
15. Cogley, J.G. A more complete version of the World Glacier Inventory. //Annals of Glaciology 50(53), 2009, p. 8-14.
16. Dyurgerov, M. B., and M. F. Meier. Glaciers and the changing Earth system: A 2004 snapshot. Occasional Paper, 58, 117 p., Inst. of Arctic and Alpine. Res., Boulder, Colorado. 2005. http://instaar.colorado.edu/other/occ_papers.html
17. Fluctuation of Glaciers. 1959-2005. Vol. I – IX. ICSU (FAGS) – IUGG (IACS) – UNEP – UNESCO – WMO, Paris, 1967-2008.
18. Fountain, A.G., Hoffman, M.J., Granshaw, F., Riedel, J. The ‘benchmark glacier’ concept – does it work? Lessons from the North Cascade Range, USA. //Annals of Glaciology, v. 50, 2009, p. 163-168.
19. Glacier Mass Balance Bulletin. N1-N10, (1988-2005). IAHS-ICSU (FAGS)-IUGG (IACS)-UNEP-UNESCO-WMO, Zurich, 1991-2005.
20. Hall, D. K., Baur, K. J., Schöner, W., et al Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893–2001). //Remote Sensing of Environment, 86 (2003), p. 566–577.
21. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change (FAR) 2007, Solomon S. et al., Eds., Cambridge; N-Y: Cambridge Univers. Press, 2007.
22. Kääb, A., Huggel, C., Paul F., et al. Glacier Monitoring from ASTER Imagery: Accuracy and Applications. //EARSel eProceedings No. 2, 2002, p. 43- 53.
23. Kononov, V.G. Computations of melting under moraine as a part of regional modeling of glacier runoff. Debris-Covered Glaciers (Proceedings of a workshop held at Seattle, Washington, USA, September 2000). IAHS Publ. No. 264, 2000. p. 109-118.
24. Meier, M.F. and Bahr, D.B. Counting glaciers: use of scaling methods to estimate the number and size distribution of the glaciers of the world. – In Colbeck, S.C. (ed.), Glaciers, Ice Sheets and Volcanoes: A Tribute to Mark F. Meier. US Army CRREL Special Report, 1996, p. 89-94.
25. Mool, P. K., Bajracharya, S. R. Tista Basin, Sikkim Himalaya Inventory of Glaciers and Glacial Lakes and the Identification of Potential Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) Affected by Global Warming in the Mountains of Himalayan Region, ICIMOD, Nepal, Kathmandu, 2003, 145 p.

26. Mool P. K., Bajracharya S. R., Joshi S.P., Shakya K., Baidya A. Inventory of Glaciers and Glacial Lakes, Glaciers Outburst Floods Monitoring and Early Warning System in the Hindukush-Himalayan Region Nepal. ICIMOD, Nepal, Kathmandu, 2001, 280 p.
27. Mool P. K., Bajracharya S. R., Kunzang K., Gurung D.R., Joshi S.P., Shakya K. Inventory of Glaciers and Glacial Lakes, Glaciers Outburst Floods Monitoring and Early Warning System in the Hindukush-Himalayan Region Bhutan. ICIMOD, Nepal, Kathmandu, 2001, 210 p.
28. Mool P. K., Bajracharya S. R., R. Roohi, A. Ashraf, S. A. Hussain. Upper Indus, Jhelum, Shingo, Shyok, and Shigar River basins Pakistan Himalaya Inventory of Glaciers and Glacial Lakes and the Identification of Potential Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) Affected by Global Warming in the Mountains of Himalayan Region. ICIMOD, Kathmandu, Nepal, 2004, 354 p.
29. Muller, F.; Cafilish, T.; Muller, G. (1977) Instruction for Compilation and Assemblage of Data for a World Glacier Inventory. Zurich: Temporary Technical Secretariat for World Glacier Inventory, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
30. Paul F. The New Swiss Glacier Inventory 2000. Application of Remote Sensing and GIS. PhD Dissertation, Zurich 2003. 213 p.
31. Shi Yafeng, Liu Chaohai, Kang Ersi. The Glacier Inventory of China. //Annals of Glaciology 50(53), 2009, p. 1-4.
32. SRTM Water Body Data Product Specific Guidance. v.2.0, 2003, 4 p.
33. Zemp, M., Hoelzle, M. Haeberli, W. Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network. //Annals of Glaciology, v. 50, 2009, p. 101-111
34. Jarvis A., Rubiano J., Nelson A., Farrow A. and Mulligan M. Practical use of SRTM data in the tropics – Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) International Center for Tropical Agricultura Apartado Aéreo 6713 Cali, Colombia Working Document no. 198 August 2004. 35 p.

Inventorying of mountain glaciers and regionalization of their spatial distribution by materials of remote sensing

V.G. Konovalov

*Institute of geography RAS, Moscow
29, Staromonetny per., 119017 Moscow,
vladgeo@gmail.com*

Vector files of glacier contours on the Asia territory were obtained in India, Nepal, China, Pakistan and Russia by means of processing of topography maps, data of air-photo survey, images from satellites LANDSAT7-ETM+, TERRA-ASTER, SPOT, IRS-LISS and other space apparatus. These data serve as basic for estimating of size of contemporary glaciations in the river basins of High Asia and computation of its hydrological regime. Tools and modules of GIS IDRISI ANDES together with known digital elevation models GTOPO30 (http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/GTOPO30) and SRTM 3 (NASA, USGS <http://srtm.csi.cgiar.org/>) were used to process the vector files of glacier polygons. The following set of parameters for each glacier was obtained as the result. 1. Minimal and maximal altitudes of glacier a. s. l. 2. Mean altitude of glacier or low boundary of accumulation area. 3. Area of accumulation and ablation parts and glacier as a whole. Relationship of areas: a) accumulation and ablation (glacier's coefficient), and b) accumulation and glacier as a whole (AAR coefficient). 5. Distribution of area as function of altitude. 6. Standard deviation of altitude inside of glacier contour. 7. Volume of glacier as function of its area. 8. Geographical coordinates of glacier centroid. 9. Mean values of glacier aspect and slope. For optimization the methods of glacier regime calculation 3533 homogeneous groups of glaciers were separated inside of watersheds of tributaries of river basins Amudarya, Syrdarya, Indus, Ganges, Brahmaputra and Tarim. As classification criteria were used eight ranges of aspect and 23 grades of their area. Mean and average weighted characteristics of glacier were determined for each group. Data in river basins of the High Asia for 27 698 glaciers with total area 43 981 km² were used for illustration the capabilities of suggested method.

Keywords: Inventorying, remote sensing, High-mountain Asia, grouping of glaciers.