

Формализация задачи машинного распознавания формы и размеров кристаллов в снежном покрове

© 2011 г. И.А. Кононов, Н.А. Казаков

Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института ДВО РАН, Южно-Сахалинск

kononov-ia@yandex.ru

Статья принята к печати 10 декабря 2010 г.

Распознавание образов, сегментация изображений, стадия конструктивного метаморфизма, структура снежного покрова, формы ледяных кристаллов.

Constructive metamorphism stage, ice crystals form, image segmentation, pattern recognition, snow cover structure.

При стратиграфических наблюдениях в снежной толще такие параметры её структуры, как форма и размер ледяных кристаллов, слагающих снежный слой, характеризуются на качественном уровне. Количественный анализ параметров структуры снежного покрова можно выполнить по фотоснимкам ледяных кристаллов с помощью компьютера, однако это невозможно без формализации задачи. Работа над программой-классификатором, определяющей класс формы и размер кристаллов льда по фотоснимкам с помощью аппарата теории распознавания образов, – важный этап исследования структуры снежного покрова. Определение структуры снежного покрова по фотоснимкам с помощью компьютера предусматривает последовательное решение нескольких подзадач теории распознавания образов, в числе которых – предварительная сегментация фотографии, выделение формальных признаков распознаваемых объектов и формальных границ классов. Предлагается для разработки методики определения формы и размеров кристаллов льда в снежном покрове по фотоснимкам использовать методологию теории компьютерного распознавания образов. Освещается подход к формализации некоторых классовых признаков форм кристаллов. Проблема выделения отдельных кристаллов на фотографии рассматривается как задача сегментации изображения.

Введение

Среди задач, которые необходимо решить при прогнозе снежных лавин, их искусственном спуске, расчёте несущей прочности снежной толщи для оценки её проходимости транспортными средствами, а также скорости снеготаяния с целью получения характеристик половодья, к важнейшим относится определение параметров структуры снежной толщи и снежных слоёв. Структура снежной толщи [1], наряду с текстурой, относится к главным управляющим характеристикам снежной толщи [3], а их изменение при метаморфизме снежного покрова вызывает трансформацию многих физических свойств снежной толщи.

При стратиграфических наблюдениях структура снежного слоя (форма и размер ледяных кристаллов) описывается визуально и представляет собой экспертное заключение, которое даёт качественное описание объекта исследования. Оно не позволяет перейти к математическим методам расчёта параметров структуры и построению математических моделей снежной толщи. Кроме того, при визуальном описании структуры снежной толщи нельзя с высокой степенью достоверности сравнивать результаты наблюдений, выполненных разными группами исследователей. Единые методические подходы к наблюдению и описанию структуры снежной толщи

(в частности, использование Международной классификации снега [7]) позволяют решить проблему лишь частично.

В настоящее время морфогенетическую классификацию Э.Г. Коломыца [4, 5], позволяющую прогнозировать изменение структуры снежной толщи в пространстве и во времени, можно считать наиболее логично построенной классификацией структуры снежной толщи. Чтобы повысить объективность материалов наблюдений за структурой снежной толщи, мы проводим макрофотографирование ледяных кристаллов из каждого снежного слоя (рис. 1). В камеральных условиях эти фотографии обрабатываются, а затем по выборке из 20 и более кристаллов (табл. 1, 2), согласно классификации Э.Г. Коломыца, устанавливается преобладающий класс формы ледяного кристалла и определяются средний и максимальный размеры кристалла в настоящий момент. Заметим, что прилагаемые к стратиграфической колонке фотографии ледяных кристаллов из каждого снежного слоя позволяют использовать материалы наблюдений и другим исследователям. Однако и в этом случае структура снежной толщи характеризуется качественно, т.е. в немалой степени субъективно, поскольку и форма, и размеры ледяного кристалла при стратиграфических наблюдениях в снежном покрове устанавливаются визуально: в шурфах или по фотографиям кристаллов.

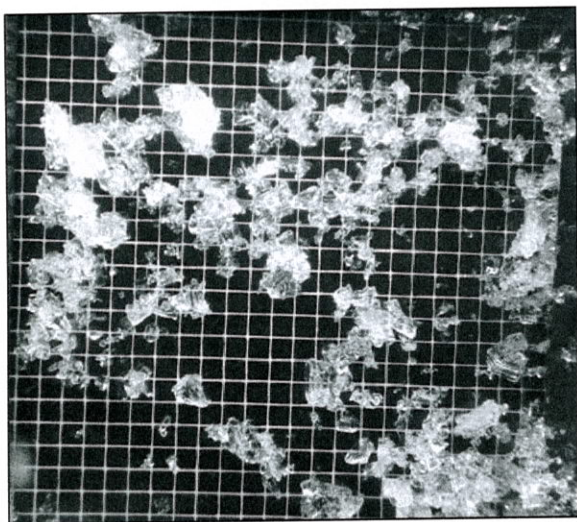


Рис. 1. Фотография ледяных кристаллов.
Снежный слой 0–7 см. Шурф № 5ГП, 19.01.2010

Fig. 1. Photo of ice crystals.
Snow layer 0–7 sm. Snow pit № 5ГП, 19.01.2010

Попытка разработки формализованной методики определения структуры ледяных кристаллов сделана в работе [6], авторы которой рассматривают несколько методов анализа структуры кристалла льда по цифровым фотоснимкам для определения его класса формы. Изображения кристаллов рассматриваются отдельно от снимка, подразумевая, что все необходимые преобразования (подавление шума, сегментация с выделени-

Условные обозначения для таблиц 1 и 2

Обозначение	Тип снега, класс форм ледяных кристаллов, текстура снежного слоя
<i>Первично-идиоморфный снег</i>	
×	Свежевыпавший
↘	Обломочный
⌘	Сублимационно-полиэдрический
••	Режеляционно-полиэдрический
<i>Вторично-идиоморфный снег</i>	
■	Гранный плоский
▮	Гранный столбчатый
▤	Полускелетный плоский
▥	Полускелетный столбчатый
□	Скелетный плоский
▭	Скелетный столбчатый
△	Секториальный
≡	Пластинчатый
<i>Текстура вторично-идиоморфного снега</i>	
}	Столбчатая
}}	Волокнистая
///	Монолитная
<i>Твердость первично-идиоморфного снега, кг/м²</i>	
≈	Очень мягкий, < 0,05
~	Мягкий, 0,05–0,5
///	Твёрдый, 2,5–10,0

Таблица 1. Стратиграфическая колонка снежной толщи

Номер слоя	Глубина контакта, см	Высота контакта, см	Тип снега и класс формы ледяных кристаллов (по Э.Г. Коломьцу), текстура снега	Плотность, г/см ³	Водность, мм	Диаметр кристалла, мм		Температура, С	Дата формирования слоя	Возраст слоя, сутки
						средний	максимальный			
14	9	95	× ≈	0,06	5,40	—	—	–1,7	04.01.2010	3
13	18	86	× ~	0,15	13,50	—	—	–1,2	03.01.2010	5
12	25	77	× ↘	0,14	9,80	—	—	–1,4	02.01.2010	6
11	39	70		0,14	19,60	—	—	–1,0	01.01.2010	4
10	42	56	⌘ ~	0,15	4,50	—	—	–0,7	31.12.2009	5
9	46	53		0,17	6,80	—	—	–0,6	30.12.2009	6
8	56	49		0,16	16,00	—	—	–0,5	13.12.2009	4
7	60	39	⌘ ///	0,13	5,20	—	—	–0,5	14.12.2009	5
6	65	35	▮ ///	0,16	8,00	0,2	0,8	–0,5	12.12.2009	6
5	72	30		0,21	14,70	0,3	0,6	–0,1	12.12.2009	49
4	80	23	▤ ▥ }	0,25	20,00	1,5	2,8	–0,1	22.11.2009	72
3	85	15	▤ ▥ ▥ !	0,25	12,50	1,3	2,5	–0,1	20.11.2009	74
2	89	10	▤ ▥ ▥ }	0,34	13,60	1,9	2,8	–0,1	20.11.2009	44
1	95	6	▤ ▥ }	0,27	16,20	1,7	2,2	0,8	18–19.11.2009	46–47

Таблица 2. Выборка кристаллов из снежного слоя в стратиграфической колонке*

Тип и класс формы кристалла	Номер кристалла (1–20) и его диаметр, мм																				Сум-ма, мм	Диаметр, мм		Число кри-стал-лов	Доля от общего числа кри-сталлов, %	Число плоских форм $P_{пл}$	Число столбчатых форм $P_{ст}$	Монокри-стинный коэффициент $K_{мт}$	Вариант метамор-физма
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		сред-ний	максималь-ный						
■	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0	0,0	0,0	0	0				
■	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9	0,9	0,9	1	0,05				
▣	1,2	1,0	—	—	—	—	1,4	1,2	2,8	—	—	—	—	—	1,7	—	—	—	—	—	9,3	1,6	2,8	6	0,3				
▣	—	—	—	—	2,0	—	—	—	—	—	2,0	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	6,0	2,0	2,0	3	0,15	6,0	13,0	0,32	Столбчатый
□	—	—	2,0	—	—	2,5	—	—	—	—	—	—	2,0	2,3	—	1,4	2,0	—	2,2	—	14,4	2,1	2,5	7	0,35				
□	—	—	—	2,0	—	—	—	—	—	2,7	—	—	—	—	—	—	—	2,2	—	—	6,9	2,3	2,7	3	0,15				
◁	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0	0,0	0,0	0	0				
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0	0,0	0,0	0	0				
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	36,6	1,9	2,8	20	1				

*Дата наблюдения 04.01.2010; высота слоя 6–10 см; дата формирования слоя 20.11.2009.

ем контура и др.) с цифровой фотографией уже выполнены. Однако, как будет отмечено далее, сама проблема сегментации изображений не тривиальна, поэтому для каждой новой задачи классификации объектов на изображении требуется отдельное исследование. Кроме того, в работе [6] форма кристалла определяется на основе анализа двумерного контура проекции кристалла на плоскость, в то время как многие признаки класса непосредственно связаны с формой граней или степенью прозрачности кристалла. Очевидно, что получить эту информацию только путём анализа контура проекции невозможно. Следовательно, дальнейшее повышение объёма и качества знаний о процессах, происходящих в снежной толще, невозможно без разработки методов формализованного описания её структуры.

Постановка задачи

Мы считаем, что задачу определения параметров структуры снежного покрова по фотоснимкам с помощью ЭВМ можно отнести к задачам распознавания образов. Это — сравнительно молодая и развивающаяся область знания науки об искусственном интеллекте. Как правило, любую задачу распознавания образов на изображении рассматривают в качестве композиции нескольких подзадач [2], среди которых: 1) выбор наиболее информативных признаков, характеризующих рассматриваемый образ; формирование алфавита и словаря признаков; 2) описание классов распознаваемых образов; 3) математическое описание образов; 4) нахождение оптимальных методов классификации; 5) оценка достоверности классификации образов.

Первые три подзадачи относятся к этапу формализации задачи распознавания образов. На этом этапе выделяются и описываются признаки объектов (ледяных кристаллов), а также признаки классов объектов. При этом исследователей в первую очередь интересуют те признаки, которые можно выразить количественно, используя фотоснимки. Исследования ведутся поэтапно: а) *предварительный этап* получения наиболее подходящих для распознавания снимков (подбор оптимального цвета подложки и фотокамеры, выработка технологии получения снимка); б) *этап предварительной обработки фотоснимков* для последующего распознавания (изменение режима изображения, увеличение или уменьшение контрастности, изменение цветового баланса, устранение шума); в) *этап сегментации изображения*, т.е. выделение на фотографии отдельных объектов (разбиение цифрового изображения на отдельные области).

Решение задачи формализации и полученные результаты

Задача сегментации изображения — не проста, и мы рассматриваем её как важный этап на пути разработки классификатора. В результате сегментации регионы на изображении закрашиваются либо выделяются границы объектов контурами одного цвета и толщины. В настоящее время известно множество алгоритмов сегментации. Все они делятся на интерактивные и автоматические. Интерактивные методы для решения нашей задачи не годятся, поскольку требуют активного участия пользователя.

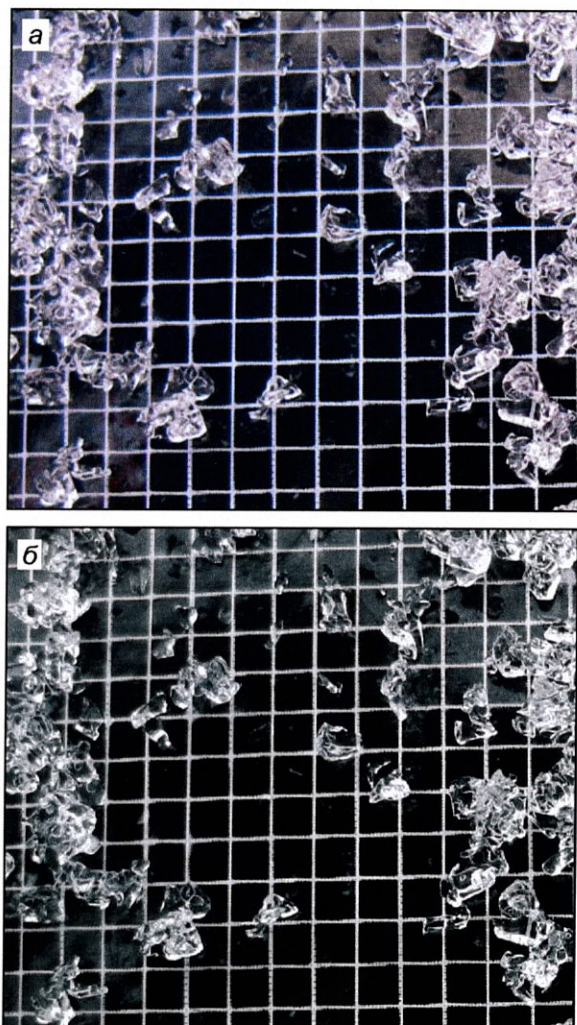


Рис. 2. Фотография кристаллов до преобразования в полутоновый режим (а) и после (б)

Fig. 2. Photo of ice crystals before halftone transformation (a) and after (b)

К автоматическим методам сегментации можно отнести: метод кластеризации цветового пространства (строится отображение точек изображения в пространство признаков и вводится метрика на этом пространстве признаков); метод выращивания регионов (по некоторому правилу выбирается центр региона и затем происходит постепенное наращивание точек региона до тех пор, пока ни одна из точек не может быть присоединена к региону); методы, основанные на операторах выделения краёв (задача сегментации рассматривается как задача поиска границ регионов).

По ряду причин для решения нашей задачи наиболее подходящими оказались методы поиска границ регионов, так как ещё до компьютерной обработки можно подобрать наиболее подходящие для распознавания параметры фотографий (цвет фона, разрешение, размещение ледяных кристаллов на палетке и

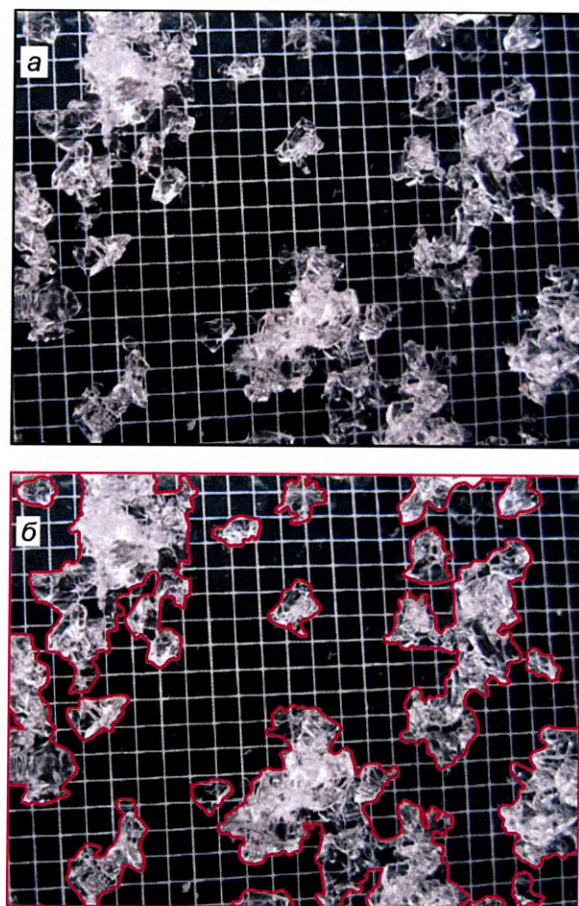


Рис. 3 Фотография кристаллов до сегментации (а) и после (б)
Fig. 3 Photo of ice crystal before segmentation

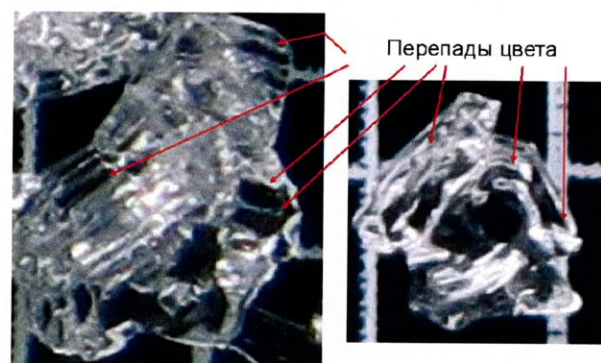
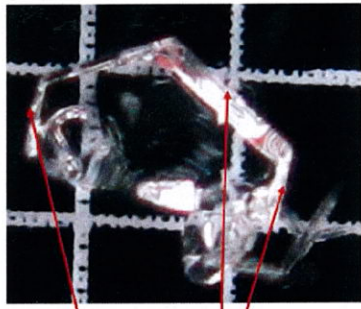
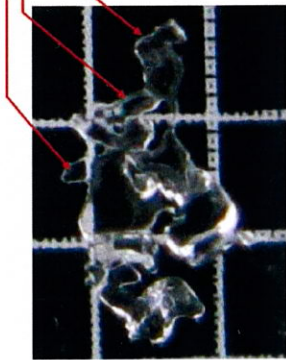


Рис. 4. Резкий перепад цвета на гранях кристалла как диагностический признак

Fig. 4. Sharp difference of color on crystal sides as a diagnostic sign

т.д.). Кроме того, анализ фотографий ледяных кристаллов показал, что практически все кристаллы на фотографии имеют похожие цвета (в основном, это оттенки серого или цвета подложки), которые после преобразования изображений в полутоновые не теряют своей информативности (рис. 2–6). Таким образом выделяется априорная информация о цвето-

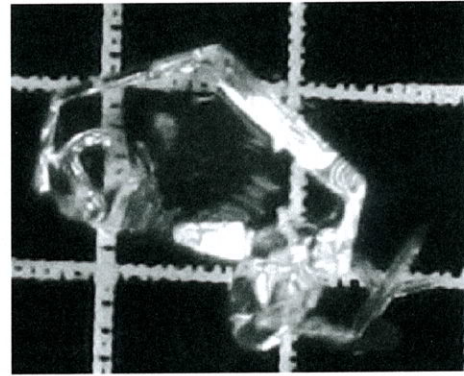
Преобладание
прямолинейных границПреобладание
криволинейных границ**Рис. 5.** Прямолинейные и криволинейные границы как диагностический признак**Fig. 5.** Rectilinear and curvilinear borders as a diagnostic sign

вых характеристиках искомых объектов (кристаллов льда) и фона, что значительно облегчает поиск границ объектов. Отметим, что для сегментации полутоновых изображений создано довольно много методов и алгоритмов. В частности, хорошо разработаны методы выделения границ полутоновых изображений.

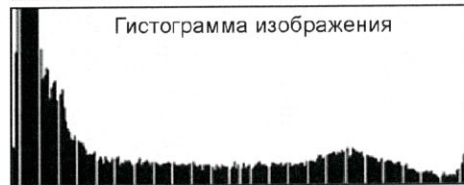
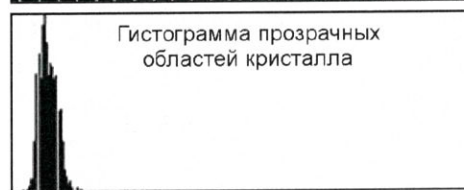
После сегментации изображения и выделения классифицируемых объектов (кристаллов льда) проводится их классификация. В работах [4, 5] выделены следующие наиболее информативные признаки при определении класса форм кристаллов: отношение осей; тип граней и их соотношение; макроступенчатость на гранях; положение ступеней роста на гранях; размеры и наличие незамкнутых полостей; зеркальность граней; выраженность и прямолинейность рёбер; степень прозрачности; мутность. Указанные признаки составляют *алфавит признаков*, т.е. полный набор признаков, выбранных для распознавания.

Минимальный набор признаков, достаточный для решения задачи распознавания, входит в *словарь признаков*. Это — макроступенчатость на гранях, наличие и объём полости, соотношение осей, степень прозрачности. Все эти признаки легко выделяются специалистом, однако для машинного распознавания необходимы их численные или алгоритмические эквиваленты.

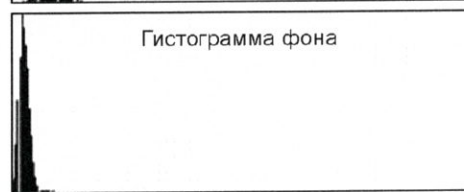
Для определения *макроступенчатости на гранях* необходимо выполнить сегментацию каждого отдельного кристалла. Это даст возможность выявить на его



Гистограмма изображения

Гистограмма прозрачных
областей кристалла

Гистограмма фона

**Рис. 6.** Выявление степени прозрачности на основе анализа гистограмм**Fig. 6.** Revealing of a transparency degree on the basis of the histograms analysis

гранях области, которые можно было бы классифицировать как ступени, т.е. решить задачу распознавания для каждого отдельного кристалла. Анализ фотографий показал, что основной диагностический признак ступени на кристалле — резкий перепад цветов (с почти белого на цвет подложки). Если после сегментации и распознавания число ступеней (резких перепадов) достаточно велико, то кристалл можно классифицировать как скелетный или полускелетный. Для каждой выборки среднее число ступеней на кристаллах разных классов форм неодинаково, поэтому решение о принадлежности кристалла к тому или иному классу следует принимать путём анализа всех кристаллов данной выборки (несколько фотографий на каждый слой). Выраженность макроступенчатости определяется по резкости перепадов цветов на ступени. Так, менее резкий перепад соответствует кристаллам полускелетного класса форм.

Степень прозрачности хорошо устанавливается при сравнения цвета подложки и цвета самого кристалла.

Чем ближе цвет кристалла к цвету подложки, тем меньше прозрачность и наоборот. Исключение составляют случаи, когда кристалл расположен одним из рёбер к объективу фотоаппарата (в области ребра прозрачность резко падает) и когда кристаллы перекрывают друг друга. В первом случае области с низкой прозрачностью следует распознавать как ребро и не учитывать их при сравнении цветов подложки и кристалла; во втором случае следует исключить перекрываемый кристалл из процесса классификации, поскольку неполная картина отдельного кристалла может негативно повлиять на результат классификации в целом.

Полости внутри кристаллов — самые тёмные области. По цвету они совпадают с подложкой. Поскольку наличие полостей характерно в основном для кристаллов скелетного и полускелетного классов, их диагностика затрудняется областями с резкими перепадами цветов, через которые полости не просматриваются даже визуально. Использовать данный признак можно лишь в том случае, когда кристалл обращён полостью к объективу. Этот недостаток вполне устраним на стадии отбора образцов для фотографирования. Перечисленные признаки можно вполне формализовать для машинного распознавания.

Соотношение осей — наименее удобный для машинного распознавания признак, поскольку кристаллы на фотографии ориентированы произвольно и определить основания и боковые грани кристаллов сложно.

Описание классов распознаваемых образов сводится к определению их границ. Границы классов могут быть заданы разработчиком уже на этапе формализации задачи или же система должна найти их в процессе работы. Э.Г. Коломыц выделил пять классов форм кристаллов вторично-идиоморфного снега: гранные, полускелетные, скелетные, секториальные, пластинчатые. В каждом классе (кроме пластинчатого) выделяют два типа формы: плоский и столбчатый [5]. Для столбчатых кристаллов всех классов сетевое отношение $c/a > 1$, для плоских $c/a < 1$, где c, a — оси кристалла.

Макроступенчатость наиболее чётко выражена у кристаллов скелетных форм, слабо — у полускелетных и пластинчатых форм кристаллов, фрагментарно, по боковым граням, — у секториальных, отсутствует — у кристаллов гранных форм. Глубокие полости наблюдаются у столбчатых кристаллов полускелетного (менее 1/3 объёма кристалла) и скелетного класса форм (более 1/3 объёма кристалла). У кристаллов секториальных и пластинчатых форм прозрачность низкая.

Наиболее удобное математическое описание — векторное [2]. Каждому образу ставится в соответствие вектор $X = (x_1, x_2, x_3, \dots)$ признаков x_i этого образа. Для нашей задачи компонентами вектора служат значения признаков из словаря признаков, выраженные в количественном эквиваленте.

Выводы и перспективы

В настоящее время наиболее разработанный для авторов вопрос — сегментация фотографий снежных кристаллов. На основе ряда алгоритмов сегментации полутоновых изображений составлен первый образец программы сегментации и получены результаты работы этой программы в виде сегментированных изображений кристаллов льда. Хорошо разработана и методика получения подходящих для распознавания снимков.

Формальное описание классовых признаков находится на стадии детализации и уточнения. Такие признаки, как макроступенчатость, выраженность ступеней, прозрачность, наличие полостей, вполне можно формализовать. Одни признаки из словаря признаков, возможно, придётся убрать, а другие — добавить. В окончательном варианте словарь признаков и формальное описание признаков можно получить только непосредственно в процессе разработки программы-классификатора. На стадии разработки находится алгоритм сбора признаков с сегментированных изображений. Требуется разработка и алгоритм классификации.

Литература

1. Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 527 с.
2. Лепский А.Е., Броневиц А.Г. Математические методы распознавания образов. Таганрог: изд. ТТИ ЮФУ, 2009. 155 с.
3. Казаков Н.А. Фрактальная размерность текстуры снежной толщи // Уч. зап. Сахалинского гос. ун-та. 2001. Вып. 2. С. 57–62.
4. Коломыц Э.Г. Структура снега и ландшафтная индикация. М.: Наука, 1976. 206 с.
5. Коломыц Э.Г. Методы кристалло-морфологического анализа структуры снега. М.: Наука, 1977. 199 с.
6. Bartlett S.J., Révedi J.-D., Craig A., Fierz C. Assessment of techniques for analyzing snow crystals in two dimensions // Annals of Glaciology. 2008. V. 48. P. 103–112.
7. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. Paris, UNESCO, 2009.

Summary

During stratigraphy observations of snow cover we make snow parameters description, such as form and size of ice crystals and build up snow layers, on the qualitative level. Quantitative parameters identification of the snow cover is possible using ice crystal photographs with PC help, but impossible without formalization. For the purpose of snow crystals formalization we can use machine recognition as an important level for working on program identifying form class and ice crystal size according to photographs. Identification of snow cover structure under photographs with PC help is based on the pattern recognition theory. Most important tasks are primary photograph segmentation, discriminating formal matter identifying objects and also identifying formal class limit. In this work we suggest to use methodology of PC pattern recognition theory for development the form and ice crystal size identification method in the snow cover according to photographs.