

Оценка видимости и состояния вулканов по последовательностям изображений стационарных камер наблюдения

И. П. УРМАНОВ, А. Н. КАМАЕВ, А. А. СОРОКИН, С. П. КОРОЛЁВ*

Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия

*Контактный e-mail: serejk@febras.net

Задача анализа данных, получаемых в результате видеонаблюдения за активностью вулканов, осложняется плохими погодными условиями. Значительное количество изображений оказываются неинформативными из-за низких условий видимости, не позволяющих увидеть наблюдаемый объект. В связи с этим актуальным является вопрос разработки алгоритмов и методов, позволяющих в автоматическом режиме производить оценку видимости наблюдаемого объекта на изображениях.

Для анализа видимости вулкана в статье предложено на изображении выделять его контуры и сопоставлять их с опорными контурами. Рассмотрен метод сопоставления контуров, учитывающий небольшие колебания камеры во время съемки, вызванные, например, ветром. Для уменьшения влияния контуров, не принадлежащих наблюдаемому объекту, на итоговую оценку видимости предложено использовать операцию маскирования.

На основе предложенных методов и алгоритмов разработана компьютерная программа, с применением которой обработаны 1304 изображения вулкана Шивелуч. Результаты оценки видимости вулкана оказались согласованными с человеческим восприятием видимости вулкана на снимках.

Ключевые слова: алгоритм, изображение, контур, вулкан, база данных, информационная система.

Введение

Видеонаблюдение является одним из видов инструментальных наблюдений, которые используются для мониторинга и визуальной оценки состояния различных объектов, в том числе вулканов. Применение видеокамер позволяет удаленно и непрерывно наблюдать за объектом, проводить по набору изображений анализ изменения его состояния и/или проявляющегося эруптивного события (извержения).

Однако возможность использования полученных изображений вызывает ряд проблем. Это связано с их качеством и информативностью, на которые влияют различные факторы. Чтобы однозначно идентифицировать и фильтровать изображения, которые не являются ни качественными, ни информативными, необходимо проводить оценку и анализ изображений.

Авторами ведется разработка алгоритмов оценки изображений вулканов Камчатки, учитывающих особенности используемых технических средств, мест их установки и условий окружающей среды. На их основе с использованием методов и технологий распределенных вычислений планируется создание программных средств в составе платформы “Сигнал” [1], позволяющих в автоматическом или полуавтоматическом (экспертном) режиме проводить оценку состояния природного объекта. В качестве исходной информации для системы планируется использовать данные непрерывно пополняемого архива видеонаблюдения за вулканами Камчатки [2].

В статье представлены первые результаты исследований. Рассматривается задача определения видимости вулкана на основе анализа его контуров на изображениях. Предлагается алгоритм ее решения и созданная на его основе компьютерная программа, с применением которой проведены экспериментальные вычислительные расчеты.

1. Постановка задачи

Входными данными задачи определения видимости вулкана являются изображения шириной w и высотой h пикселей. Для каждой точки изображения I известна яркостная составляющая: $I(x, y) = I(n)$, $n = yw + x$, $x = 0, 1, \dots, w - 1$, $y = 0, 1, \dots, h - 1$. Входные изображения можно разделить на анализируемые, которые обозначим буквой I без индекса, и опорные, которые обозначим через I_t , $t = 1, 2, \dots, m$, где m — количество опорных изображений, на них исследуемый вулкан в идеальных погодных условиях виден максимально четко. Опорные изображения отбираются специалистами вручную. Требуемое количество изображений $m \in [3, 4, \dots, 10]$.

Как опорные, так и анализируемые изображения получают со стационарной камеры. При этом допускаются небольшие отклонения камеры от своего исходного положения вследствие влияния внешних факторов, например ветра. Ошибка, вызванная колебаниями камеры, не должна превышать δ пикселей по любой из координатных осей входных изображений.

В качестве выходного значения необходимо получить оценку $\sigma \in [0; 1]$, которая показывает, какая часть вулкана, видимая на опорных изображениях I_t , видна на анализируемом изображении I .

2. Контурные вулканов

Задача определения видимости вулкана сводится к задаче сопоставления участков анализируемого изображения I с участками опорных изображений I_t . Очевидно, что попиксельное сопоставление таких участков невозможно из-за меняющихся погодных условий, освещения и времени года. Даже техники сопоставления, основанные на точечных особенностях и инвариантных дескрипторах [3–5], показали свою несостоятельность применительно к рассматриваемой задаче. Наиболее устойчивой характеристикой вулкана оказались его контуры. Контурные хребтов горы, образующей вулкан, остаются постоянными независимо от погодных условий, освещения и даже заснеженности. Снег может скрыть незначительные детали вулкана, но основные контуры всегда остаются видимыми.

Задача обнаружения контуров на изображении может быть решена с помощью детекторов границ [6–8]. В настоящей работе в качестве детектора использовался хорошо

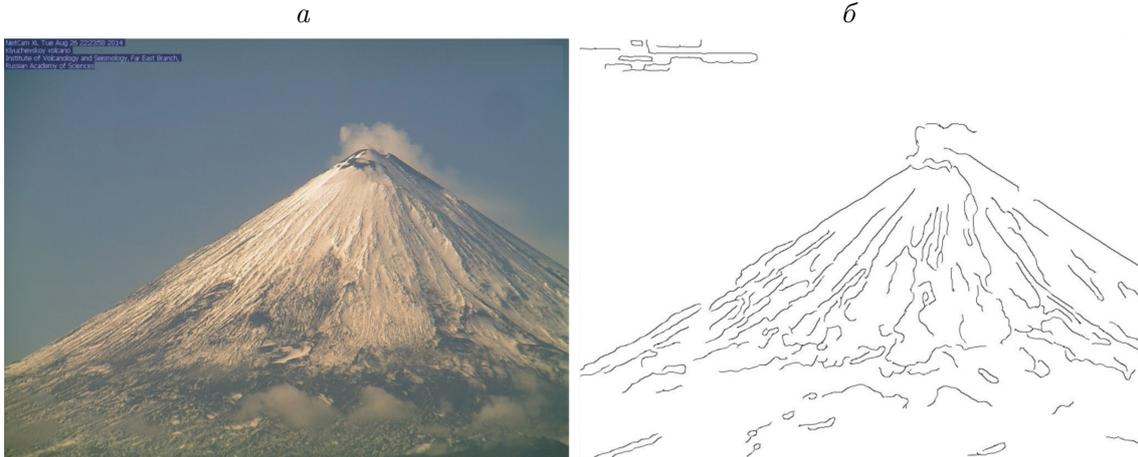


Рис. 1. Выделение контуров изображений с помощью детектора Сэнну: *a* — исходное изображение (вулкан Ключевской, 26 августа 2014 г. в 22:23 UTC); *б* — контуры, выделенные на исходном изображении

зарекомендовавший себя детектор границ Сэнну [6]. Этот детектор работает с яркостной составляющей изображений $I(n)$, $n = 0, 1, \dots, wh - 1$. Результатом применения детектора к изображению I является множество индексов граничных точек $G(I)$. Пример использования детектора Сэнну для выделения контуров на изображении вулкана представлен на рис. 1.

3. Сопоставление контуров

Для того чтобы определить, насколько контуры одного изображения I близки контурам другого изображения I' , необходимо рассчитать, какая доля контурных точек $G(I)$ представлена в $G(I')$. Поскольку положения граничных точек на изображениях I и I' обычно не совпадают пиксель в пиксель, имеет смысл говорить о некотором пороге τ , таком, что в случае выполнения условия $d(n, n') \leq \tau$, $n \in G(I)$, $n' \in G(I')$, контурные точки с номерами n и n' считаются соответствующими. Здесь $d(n, n')$ — функция расстояния между точками n и n' .

Если в качестве функции $d(n, n')$ использовать расстояние Манхэттена:

$$d(n, n') = |n \bmod w - n' \bmod w| + |\lfloor n/w \rfloor - \lfloor n'/w \rfloor|,$$

то для ускорения процедуры сопоставления краев удобно рассчитать карту расстояний $D(I) = (D(I)_n) = \min_{v \in G(I)} d(n, v)$, $n = 0, 1, \dots, wh - 1$. Благодаря использованию метрики Манхэттена карта $D(I)$ может быть построена за время, линейно зависящее от величины wh [9]. Пример карты расстояний для изображения, приведенного на рис. 1, *a*, представлен на рис. 2. Белый цвет соответствует меньшим значениям расстояний, а черный — большим.

С использованием карты расстояний $D(I)$ коэффициент видимости контуров изображения I на изображении I' запишется следующим образом:

$$\mu(I, I') = \frac{1}{|G(I)|} \sum_{n \in G(I)} f(n), \quad f(n) = \begin{cases} 0, & D(I')_n > \tau, \\ 1, & D(I')_n \leq \tau. \end{cases}$$

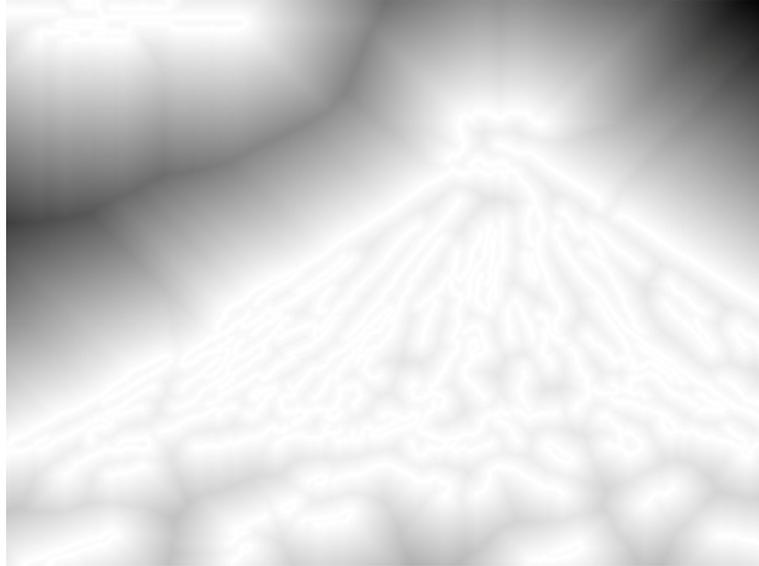


Рис. 2. Пример карты расстояний

Порог τ в существенной степени зависит от качества камер, их удаленности от наблюдаемых объектов и разрешения. Допустимые значения τ лежат в интервале от 1 до 5 пикселей. В настоящей работе использовано значение $\tau = 3$, что позволило показать хорошие результаты для изображений, имеющих разрешение порядка одного миллиона пикселей.

4. Формирование опорных контуров

Не все контуры, выделяемые на изображениях вулканов, сохраняются от изображения к изображению. Некоторые контуры зависят от снежного покрова, погодных условий и даже времени суток. На опорных изображениях I_t , $t = 0, 1, \dots, m$, необходимо выделять только те контуры, которые присутствуют не менее чем на половине этих изображений. Такие контуры будем называть опорными. Именно они будут использованы для определения видимости вулкана на анализируемых изображениях.

По условиям задачи колебания камеры во время получения изображений могут приводить к ошибке до δ пикселей по вертикальной или горизонтальной оси изображения. Это негативно влияет на согласованность контуров (рис. 3). Чтобы выделить опорные контуры, опорные изображения необходимо согласовать. Для этого следует выбрать опорное изображение k , имеющее наибольшее число контурных точек:

$$k = \operatorname{argmax}_{t=1,2,\dots,m} |G(I_t)|.$$

Другие изображения I_t , $t = 0, 1, \dots, m$, $t \neq k$, сдвигаются на определенное число пикселей по вертикальной и горизонтальной оси. Обозначим через I_t^{jp} опорное изображение, сдвинутое по горизонтальной оси на величину j , а по вертикальной — на p , $j, p \in [-\delta, -\delta + 1, \dots, \delta - 1, \delta]$:

$$I_t^{jp}(x, y) = I_t(\min(\max(0, x - j), w - 1), \min(\max(0, y - p), h - 1)).$$

Для изображений I_t рассчитываются матрицы оценок сдвигов

$$M_t = \left(\mu \left(I_k, I_t^{j-\delta, p-\delta} \right) \right), \quad j, p = 0, 1, \dots, 2\delta.$$

Пример матрицы M_t в графическом виде представлен на рис. 4, *a*. Видно, что матрица имеет выраженный максимум, координаты которого относительно центра матрицы и есть искомый сдвиг изображения I_t , приводящий к согласованию контуров с изображением I_k :

$$j_t, p_t = \underset{j, p}{\operatorname{argmax}} \mu \left(I_k, I_t^{j, p} \right).$$

Выполнив согласование контуров всех опорных изображений путем вычисления j_t и p_t ($j_k = p_k = 0$) и сдвига изображений $I_t^{j_t, p_t}$, $t = 1, 2, \dots, m$, можно построить множество точек опорных контуров \hat{G} :

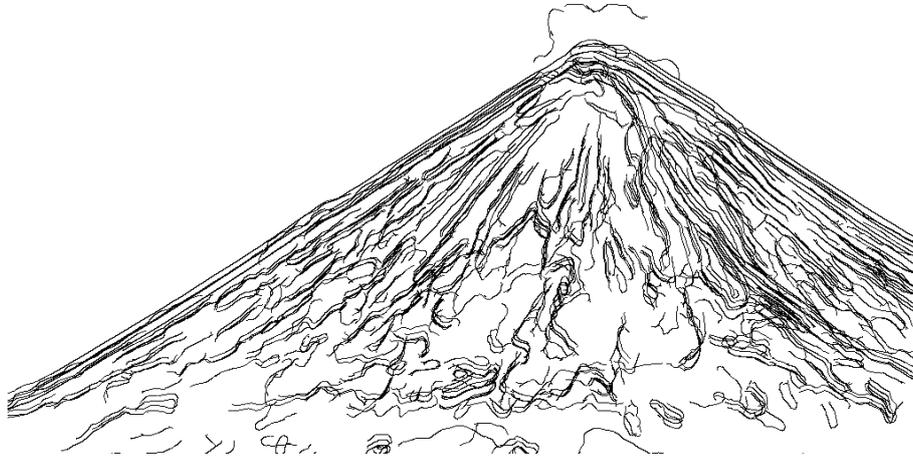


Рис. 3. Рассогласование контуров

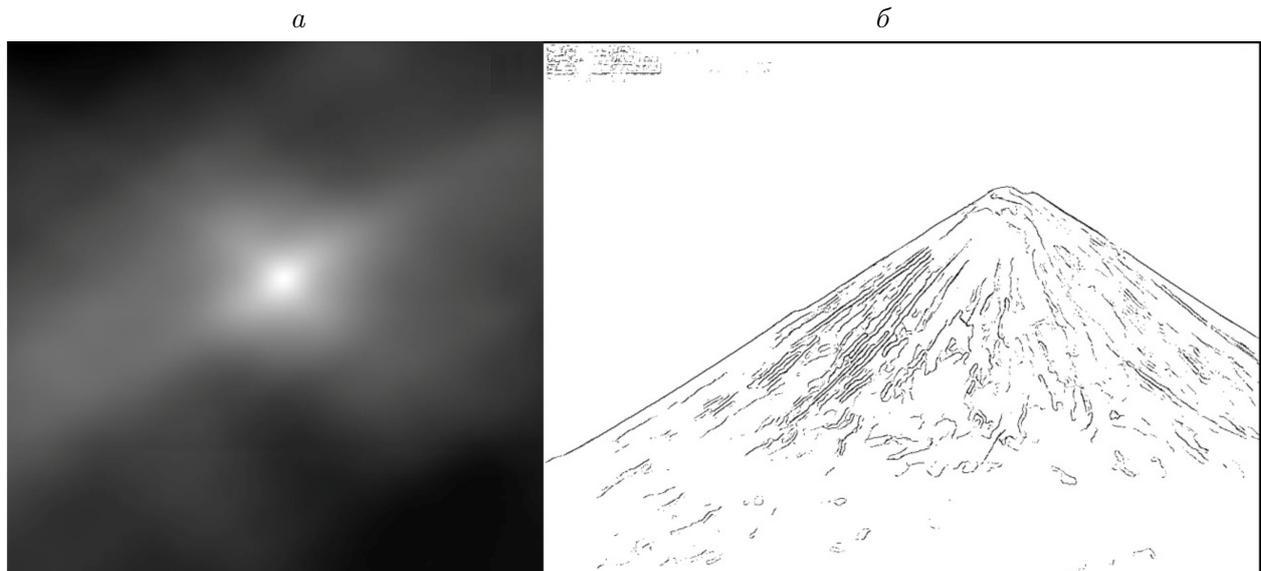


Рис. 4. Согласование контуров: *a* — пример матрицы M_t ; *b* — согласованные опорные контуры \hat{G}

$$\hat{G} = \left\{ n \mid n \in \{1, 2, \dots, wh - 1\} \wedge \sum_{t=1}^m g(t, n) \geq \frac{m}{2} \right\}, \quad g(t, n) = \begin{cases} 0, & D(I_t^{j_t, p_t})_n > \tau, \\ 1, & D(I_t^{j_t, p_t})_n \leq \tau. \end{cases}$$

Пример изображения точек опорных контуров приведен на рис. 4, б.

5. Вычисление оценки видимости

Оценка видимости вулкана на изображении I вычисляется на основе опорных контуров \hat{G} . Перепишем оценку $\mu(I, I')$ для опорных контуров \hat{G} :

$$\mu(\hat{G}, I) = \frac{1}{|\hat{G}|} \sum_{n \in \hat{G}} f(n), \quad f(n) = \begin{cases} 0, & D(I)_n > \tau, \\ 1, & D(I)_n \leq \tau. \end{cases}$$

Тогда оценка видимости σ для изображения I запишется следующим образом:

$$\sigma = \min \left(\frac{1}{\eta} \mu \left(\hat{G}, I^{\text{argmax}_{j,p} \mu(\hat{G}, I^{j,p})} \right), 1 \right),$$

где η — корректирующий коэффициент:

$$\eta = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mu \left(\hat{G}, I_i^{j_i, p_i} \right).$$

Коэффициент η может быть рассчитан один раз после формирования \hat{G} и многократно использован в дальнейшем. Основная роль этого коэффициента — масштабирование оценок σ таким образом, чтобы изображения, выбранные экспертами как опорные, в среднем имели оценку $\sigma = 1$.

6. Маскирование контуров

Часто в поле зрения камеры кроме объекта, за которым осуществляется наблюдение, попадают иные, не представляющие интереса объекты (рис. 5, а). Это могут быть объекты ближнего плана, горы, не относящиеся к вулкану, и даже временные штампы на

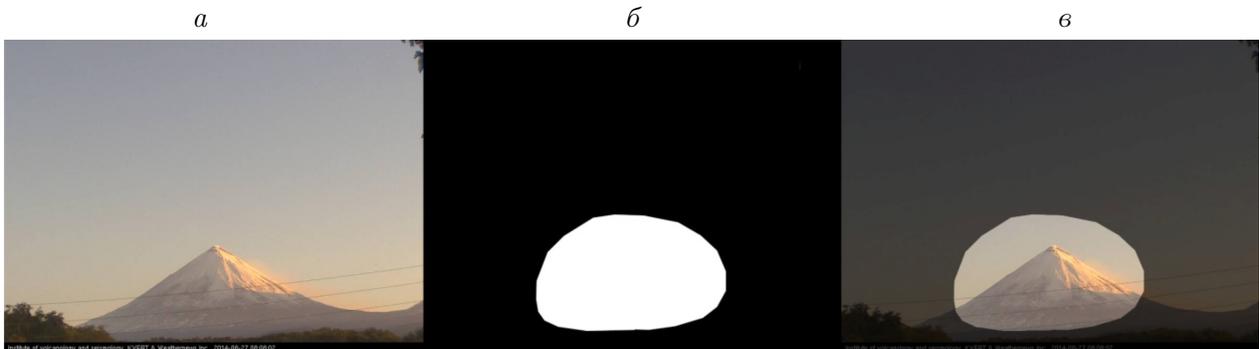


Рис. 5. Маскирование изображения: а — исходное изображение; б — бинарная маска; в — зона интереса, выделяемая маской

изображениях. В этом случае экспертам, осуществляющим наблюдение, предоставляется возможность построить бинарную маску $\mathbf{B} = (b_{xy}) = (b_n)$, $x = 0, 1, \dots, w - 1$, $y = 0, 1, \dots, h - 1$, $n = yw + x$. Каждый элемент маски b_n может принимать значения 0 или 1. Если точка изображения, соответствующая b_n , представляет интерес, то $b_n = 1$, иначе $b_n = 0$. Пример маски для рис. 5, а представлен на рис. 5, б, а выделенная зона на снимке, соответствующая этой маске, приведена на рис. 5, в.

Использование маски подразумевает фильтрацию контурных точек после их получения с помощью детектора границ. Если в результате детектирования границ получено множество контурных точек $G(I)$, то после применения маски контуры будут представлены множеством $G_{\mathbf{B}}(I)$:

$$G_{\mathbf{B}}(I) = \{n \mid n \in G(I) \wedge b_n = 1\}.$$

Использование маски позволяет избежать влияния на вычисляемую оценку видимости σ незначимых для наблюдения объектов.

7. Результаты использования предложенных методов и алгоритмов для оценки изображений вулкана Шивелуч

Для проверки эффективности описанных методов с использованием языка программирования C++ разработана компьютерная программа в виде консольной утилиты для операционной системы Linux. Границы видимости σ установлены согласно следующим интервалам (см. таблицу).

Для тестирования программы в качестве исходных данных из архива видеонаблюдения за вулканами Камчатки программной платформы “Сигнал” [1, 2] взяты 1304 изображения вулкана Шивелуч за период с 25 февраля по 1 марта 2014 г. общим размером около 250 Мбайт. В качестве опорных использовано семь снимков вулкана, полученных в разное время суток и при идеальных погодных условиях, а также четкой видимости вулкана и его активности, что достаточно для проверки работы алгоритма. Примеры снимков представлены на рис. 6.

В результате работы компьютерной программы получены следующие результаты (рис. 7). При проведении оценки тестового набора из 1304 изображений вулкана 11.8% отнесено к снимкам высокого, 3.4% — среднего и 84.8% — низкого качества (соответственно рис. 8, а–в).

Проверка изображений на соответствие с предложенным программой ранжированием показала корректность полученных результатов.

Время обработки всего массива изображений с использованием разработанной программы составило 10.5 мин. Расчеты проводились на вычислительном узле Центра данных ВЦ ДВО РАН с процессором Intel Xeon 5150, имеющим тактовую частоту 2.66 ГГц и объем оперативной памяти 8 Гбайт. Значение данного показателя можно существенно

Границы видимости σ

Качество снимка	Нижняя	Верхняя
Низкое	0 (включительно)	0.55 (не включительно)
Среднее	0.55 (включительно)	0.7 (не включительно)
Высокое	0.7 (включительно)	1 (включительно)



Рис. 6. Опорные снимки вулкана Шивелуч (время UTC): *a* — в 20:23 25 февраля 2014 г.; *б* — в 02:23 28 февраля 2014 г.; *в* — в 23:58 27 февраля 2014 г.

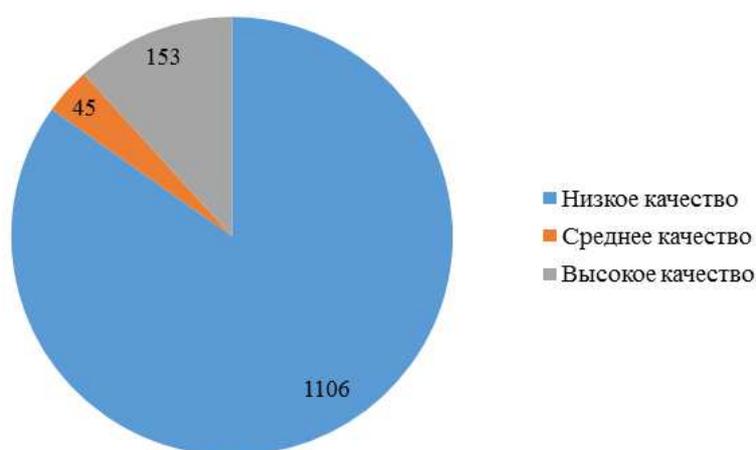


Рис. 7. Результаты оценки фотографий

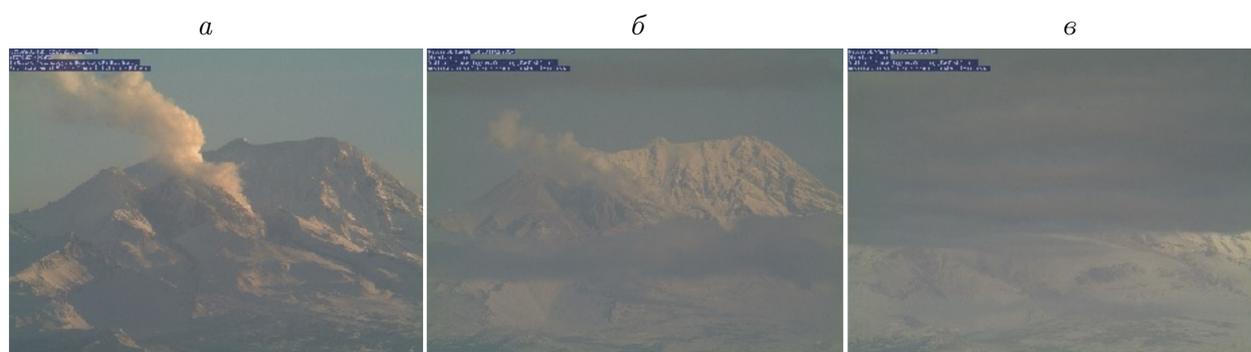


Рис. 8. Примеры оценки изображений вулкана: *a* — высокое качество ($\sigma \approx 0.72$); *б* — среднее качество ($\sigma \approx 0.6$); *в* — низкое качество ($\sigma \approx 0.47$)

сократить, если учитывать время суток и устанавливать для ночных снимков оценку $\sigma = 0$, когда они получены не с инфракрасных камер, а также использовать для обработки данных специализированные вычислительные системы.

Использование маски позволяет увеличить оценку σ снимков высокого и среднего качества в среднем на 0.1, а в результате точнее отделять снимки низкого качества от остальных.

Заключение

Рассмотренные в статье методы и алгоритмы позволяют осуществлять фильтрацию изображений на основе видимости наблюдаемого на них объекта. Как показали эксперименты, определяемые оценки видимости в большинстве случаев являются адекватными. К недостаткам алгоритма можно отнести некоторое завышение оценок изображений с высокочастотным шумом, не содержащих каких-либо деталей (некоторые ночные снимки) и занижение оценок изображений, содержащих одновременно наблюдаемый объект и сильный высокочастотный шум.

Очевидно, что описанный подход позволяет определить лишь видимость контуров вулканов, но не способен выделить снимки, где присутствуют признаки извержения, а контур вулкана скрыт облаками. Дальнейшие исследования предполагают разработку специальных алгоритмов для определения таких ситуаций, а также дополнительную корректировку оценок видимости на основе анализа ее изменений во времени и частотных характеристик изображений.

Созданная на основе рассмотренного алгоритма компьютерная программа будет интегрирована в платформу “Сигнал” для обработки архивов и данных оперативных видеонаблюдений за вулканами Камчатки, что повысит качество архива этого типа инструментальных данных и востребованность указанной информации внешними специализированными системами, осуществляющими мониторинг вулканической активности в регионе [10, 11].

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 16-07-00156, № 16-37-00026 мол_a) и гранта по Программе фундаментальных исследований ДВО РАН “Дальний Восток”, № 15-I-4-071.

Список литературы / References

- [1] Sorokin, A.A., Korolev, S.P., Urmanov, I.P., Verkhoturov, A.I., Makogonov, S.V., Shestakov, N.V. Software platform for observation networks instrumental data Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences // Proc. of Intern. Conf. on Computer Science and Environmental Engineering (CSEE 2015), May 17–18, Beijing, 2015. P. 589–594.
- [2] Сорокин А.А., Королев С.П., Урманов И.П., Верхотуров А.Л., Шестаков Н.В., Гирина О.А. Информационная система для работы с данными инструментальных наблюдений с целью проведения исследований и мониторинга опасных природных явлений на Дальнем Востоке России // Матер. Всерос. науч. конф. с международным участием “Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нefтегорска”, Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015, Владивосток: Дальнаука, 2015. Т. 2. С. 443–447.
Sorokin, A.A., Korolev, S.P., Urmanov, I.P., Verkhoturov, A.L., Shestakov, N.V., Girina, O.A. Information system to work with instrumental observations data for research and monitoring of natural hazards in the Far East Russia // Proc. of the Russ. Conf. “Geodynamic Processes and Natural Disasters. Experience Neftegorsk”. Vladivostok: Dal'nauka, 2015. Vol. 2. P. 443–447. (In Russ.)
- [3] Mikolajczyk, K., Schmid, C. A performance evaluation of local descriptors // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'2003). Madison, 2003. P. 257–263.
- [4] Lowe, D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // Intern. J. of Computer Vision. 2004. Vol. 60, No. 2. P. 91–110.

- [5] **Herbert, B., Andreas, E., Tuytelaars, T., Van Gool, L.** SURF: Speeded up robust features // Computer Vision and Image Understanding (CVIU). 2008. Vol. 110, No. 3. P. 346–369.
- [6] **Canny, J.** A computational approach to edge detection. Pattern analysis and machine intelligence // IEEE Transactions on PAMI. 1986. Vol. 8, No. 6. P. 679–698.
- [7] **Elder, J.H., Zucker, S.W.** Local scale control for edge detection and blur estimation // IEEE Transactions on PAMI. 1998. Vol. 20, No. 7. P. 699–716.
- [8] **Martin, D., Fowlkes, C., Malik, J.** Learning to detect natural image boundaries using local brightness, color, and texture cues // IEEE Transactions on PAMI. 2004. Vol. 26, No. 5. P. 530–549.
- [9] **Borgefors, G.** Distance transformations in digital images // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. 1986. Vol. 34(3). P. 344–371.
- [10] **Гордеев Е.И., Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Ефремов В.Ю., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Романова И.М., Королев С.П., Крамарева Л.С.** Возможности использования данных гиперспектральных спутниковых наблюдений для изучения активности вулканов Камчатки с помощью геопортала VolSatView // Совр. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 1. С. 267–284.
Gordeev, E.I., Girina, O.A., Loupian, E.A., Sorokin, A.A., Efremov, V.Yu., Melnikov, D.V., Manevich, A.G., Romanova, I.M., Korolev, S.P., Kramareva L.S. Using satellite hyperspectral data to study the activity of Kamchatka volcanoes on the basis of the VolSatView geportal // Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2014. Vol. 11, No. 1. P. 267–284. (In Russ.)
- [11] **Ефремов В.Ю., Гирина О.А., Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Матвеев А.М., Мельников Д.В., Прошин А.А., Сорокин А.А., Флитман Е.В.** Создание информационного сервиса “Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил” // Совр. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 5. С. 155–170.
Efremov, V.Yu., Girina, O.A., Kramareva, L.S., Loupian, E.A., Manevich, A.G., Melnikov, D.V., Matveev, A.M., Proshin, A.A., Sorokin, A.A., Flitman, E.V. Creating an information service “Remote monitoring of active volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands” // Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2012. Vol. 9, No. 5. P. 155–170. (In Russ.)

Поступила в редакцию 11 января 2016 г.

The assessment of the visibility and the status of volcanoes using sequences of video observation images

URMANOV, IGOR P., KAMAЕV, ALEKSANDR N., SOROKIN, ALEXEI A., KOROLEV, SERGEY P.*

Computing Center FEB RAS, Khabarovsk, 680000, Russia

*Corresponding author: Korolev, Sergey P., e-mail: serejk@febras.net

Purpose. The problem for analysis of data on video observations of volcanic activity is hampered due to bad weather conditions. A significant number of acquired images appear to be non-informative because of low visibility, which prevents from seeing

the observable object. In this connection, the question of developing algorithms and methods which make it possible to evaluate the visibility of the observable object on the images in an automated mode, is of vital importance. Based on the estimation and ranking made, the non-informative images can be discarded, which could significantly reduce the searching time for the necessary data and memory volumes for their storage.

Methodology. In order to analyze the volcano visibility, the authors propose to distinguish its contours on an image with further comparison of them with the reference contours. The latter can be derived from 3 to 10 images of the volcano, which are manually selected by researchers and have been captured using video camera under ideal conditions. It is proposed that only those contours could be considered to be as the reference ones that are observable on no less than half of the captured images. The paper also considers the method for comparing the contours that allows insignificant fluctuations of the camera during imaging, caused, for example, by the wind blowing. To reduce the influence of the contours that do not belong to the observable object on the resultant visibility, the masking operation is suggested.

Originality. Based on the proposed methods and algorithms, a computer program has been developed. To evaluate efficiency of its work, the acquired 1304 images of Shiveluch volcano have been processed. The results of estimation of the volcano visibility appeared to be consistent with the human perception of the volcano visibility on the images.

Findings. The algorithms and methods proposed in the paper have shown their efficiency and reliability as applied to the problem of analysis of the volcano image visibility. The software tools are elaborated on their basis and will be embedded in the software platform “Signal”, which provides the work of the system of video observations for volcanoes in Kamchatka.

Keywords: algorithm, image, outline, volcano, database, information system.

Acknowledgements. This research was partly supported by RFBR (grants No. 16-07-00156, No. 16-37-00026), FEB RAS research program “Far East” (grant No. 15-I-4-071).

Received 11 January 2016