

Для цитирования: Якунин А.Г. Экспресс - метод наземного мониторинга основных параметров облачного покрова. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (3): 116-128. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-116-128

For citation: A.G. Yakunin . Express monitoring of the main parameters of clouds from the earth's surface. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (3): 116-128. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-116-128

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 504.064.36:519.688

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-116-128

ЭКСПРЕСС - МЕТОД НАЗЕМНОГО МОНИТОРИНГА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА

Якунин А.Г.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46г., Россия

Резюме. Цель. В работе предлагается методика, позволяющая при минимуме программно-аппаратных затрат путем наземных видеонаблюдений и контроля относительной влажности определять основные типы облаков и параметры облачного покрова (высоту нижней границы, направления и скорости перемещения облаков) без привлечения сведений о метеорологической обстановке с официальных источников, не всегда имеющих для конкретного места и времени наблюдения. **Метод.** В основе метода лежит известная формула Ипполитова, связывающая влажность воздуха на поверхности земли с нижней границей облачности, эмпирические коэффициенты которой зависят от типа облачного покрова. Для определения этого типа предлагается метод, в основе которого лежит аппроксимация конура облаков эллисом. **Результат.** В качестве дополнительных классификационных признаков используется количество аппроксимирующих эллипсов в кадре изображения, близость их взаимного расположения, доля общей площади, занимаемая ими в кадре, и доля площади, занимаемая самым большим эллисом. Скорость и направление облаков определяются по смещению общих ключевых точек на кадрах изображения, полученных через небольшой фиксированный интервал времени. Каждая такая точка описывается дескриптором, вычисляемым методом SURF, представленным в открытой библиотеке обработки изображений OpenCV. **Вывод.** Не смотря на простоту программной реализации и используемого аппаратного обеспечения (web-камера, датчик влажности и OEM – одуль Arduino) метод обеспечивает погрешность определения перечисленных параметров в пределах 20%. Основная область применения систем мониторинга, реализованных с его применением – сеть частных автоматических метеостанций, подобных сети Wunderground с целью получения дополнительной информации, которую можно использовать как для повышения точности метеопрогнозов, так и при проведении научных исследований в области метеорологии и климатологии.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений; высота нижней границы облачности; скорость и направление перемещения облаков; распознавание типа облаков; многоточечный экологический мониторинг

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

EXPRESS MONITORING OF THE MAIN PARAMETERS OF CLOUDS
FROM THE EARTH'S SURFACE

A.G. Yakunin

*Polzunov Altai State Technical University,
46g Lenin Ave., Barnaul 656038, Russia*

Abstract Objectives *The paper proposes a technique that allows the main types of clouds and cloud cover parameters (ceiling, direction and speed of cloud movement) to be determined at minimum cost via observations from the Earth's surface. The aim is to avoid using meteorological information derived from official sources, which may not always be available for a specific place and time of observation. Method* *The method is based on the well-known Ippolitov formula that connects air humidity on the Earth's surface with the cloud ceiling, whose empirical coefficients depend on the type of the cloud cover. In order to determine this type, a method based on elliptic cloud contour approximation is proposed. Results* *Additional classification features were the number of approximating ellipses in the image frame, the proximity of their mutual location, the total area that they occupy in the frame and the area occupied by the largest ellipse. The speed and direction of the clouds are determined through shifting the common key points in image frames obtained over a small fixed time interval. Each point is described by a descriptor calculated using the SURF method from the open image processing library OpenCV. Conclusion* *Despite the simplicity of the required software and hardware (web camera, humidity sensor, and OEM – Arduino module), this method provides a definition of these parameters with an error within 20%. Monitoring systems based on this method may be used in private automatic weather stations, such as the Wunderground, for obtaining more information that could improve the accuracy of weather forecasts, as well as for research in meteorology and climatology.*

Keywords: *digital image processing; ceiling; speed and direction of cloud movement; cloud type recognition; multi-point environmental monitoring*

Введение. Трудно переоценить роль метеорологических прогнозов в жизни современного индустриального общества. От работы метеорологических служб, своевременности и достоверности предоставляемой ими информации зависит работа таких отраслей, как транспорт, пассажирские перевозки и в особенности авиаперевозки, жилищно-коммунальное и сельское хозяйство, строительство. Крайне важна роль долгосрочных метеорологических прогнозов в сельском хозяйстве.

К сожалению, достоверность именно долгосрочных прогнозов пока оставляет желать лучшего. И одной из причин такого положения дел является ограниченность используемых для формирования прогноза моделей из-за недостаточности наших знаний о процессах, приводящих к изменению погоды, а в общем случае и к изменениям климата.

С другой стороны, это объясняется и недостаточным объемом данных, подаваемых на вход таких моделей. В частности, одним из видов таких данных и одной из причин, оказывающих влияние на происходящие в атмосфере и подстилающей поверхности явления, являются данные о свойствах облачного покрова.

Облака участвуют в кругообороте воды в природе, в энергетическом обмене, в перераспределении тепловой энергии на земном шаре, они влияют на радиационный баланс. Через воздействие на радиационный баланс атмосферы и земной поверхности как в коротковолновой, так и в длинноволновой области спектра солнечного излучения, они оказывают непосредственное влияние на температурно-влажностный режим атмосферы, тропосферы и приземного слоя воздуха [1, 2]. Так, облака нижнего и среднего ярусов имеют высоту нижней границы в пределах 2 ... 6 км, составляют основную массу облачности планеты и оказывают основное влияние на динамику вертикальных профилей температуры и на соотношение между поглощаемым теплом от

солнечного излучения и испускаемым теплом собственного длинноволнового излучения планеты [1]. Тем самым они являются важнейшим фактором, влияющим на формирование погоды и климата, на распространение растительности и животного мира на Земле, а, следовательно, и на всю деятельность человека. В свою очередь, общее состояние атмосферы, характер подстилающей поверхности и наличие антропогенного фактора также воздействуют на состояние облачного покрова [3-5].

Одним из важных параметров, описывающих облачный покров, является высота нижней границы облаков, играющая важную роль в краткосрочном прогнозировании погоды, и особенно в прогнозировании опасных погодных условий [6]. Поэтому ведение долгосрочного наблюдения за этим параметром, а по возможности и других описывающих облака свойств (в частности, тип облачного покрова и скорость перемещения), причем на обширных территориях, крайне важно как в целях прогнозирования погоды, так и в целях проведения научных исследований в области изучения климатических процессов, происходящих на планете [7]. Очевидно, для проведения таких исследований желательнее иметь непрерывную во времени и пространстве трехмерную картину изменения состояния облачного покрова. Однако на сегодняшний день ни одна из существующих систем наблюдения не удовлетворяет таким требованиям.

Анализ известных методов измерения высоты нижней границы облачности. Наиболее близки к требованиям получения информации с обширных территорий системы дистанционного спутникового зондирования [7,8,9]. Так, например, системы на базе спектрорадиометров MODIS, установленные на спутниках Terra¹ и Aqua², позволяют формировать продукты, содержащие маски облачности, информацию о типе облаков и иные сведения [9-11]. Они позволяют решать задачу получения информации с больших территорий (со всей поверхности планеты) с высоким пространственным разрешением (вплоть до 500м) [11,12]. Но эта информация дискретна во времени, поскольку спутники находятся не на геостационарной орбите, пролетают над одной и той же территорией только дважды в сутки, причем в разное время (полный цикл вращения вокруг Земли составляет для спутника Terra 16 суток).

По этой причине они не в состоянии определять такие важные параметры облаков, как скорость их перемещения. Кроме того, им в принципе недоступна информация о высоте нижней границы облачности, поскольку наблюдения проводятся сверху. Хотя косвенно и с большой погрешностью ее можно найти путем измерения высоты верхней границы облачности (или отдельных облаков) с последующим вычитанием толщины облачности. Высота верхней границы получается путем обработки снимков облаков с нескольких спутников или одним спутником, но с разных позиций. О толщине облака можно косвенно судить с земли по степени поглощения солнечного излучения [13], либо со спутника по степени поглощения длинноволнового излучения, испускаемого подстилающей поверхностью.

Альтернативными спутниковым методам зондирования являются методы, в которых измерительная аппаратура размещается на земной поверхности. Такие методы, в свою очередь, подразделяются на методы активного и пассивного наблюдения. Активные методы на основе лидаров и лазеров [14,15] наиболее точны, не зависят от времени суток, мало зависят от погоды (для лидаров), но в то же время они и наиболее дорогостоящи. Поэтому устройства с активными методами локации облаков не подходят для широкомасштабного применения и используются преимущественно в единичных экземплярах в аэропортах и на метеостанциях. Еще менее пригодны для построения многоточечных систем экологического мониторинга по причине высокой стоимости методы, основанные на применении зондов с установленным на них высотомером, анемометром, иным измерительным оборудованием и телеметрической системой. Даже на метеостанциях вместо таких зондов часто применяют шары-пилоты, когда о высоте границы облака судят визуально, засекая момент времени между моментом старта шара и моментом, когда шар скроется в облаке [16].

¹ <https://terra.nasa.gov/>

² <https://aqua.nasa.gov/>

Этот метод определения высоты нижней границы облачности достаточно прост и доступен. Однако он имеет значительную погрешность, особенно при низкой плотности облаков и наличии сильного ветра. При этом длительная и трудоемкая подготовка к измерениям, большой интервал времени между измерениями и невозможность их автоматизации делают данный метод тоже непригодным для многоточечных систем мониторинга.

Среди пассивных методов нахождения высоты нижней границы облаков в публикациях упоминаются триангуляционные методы пассивной оптической локации [17] и методы, основанные на эмпирических формулах, связывающих высоту облака с типом облака и параметром, характеризующим влажность воздуха [6,18,19]. Это может быть либо дефицит точки росы, либо относительная влажность атмосферы.

Все эти методы не требуют применения дорогостоящей аппаратуры, обеспечивают оперативность наблюдения и легко поддаются автоматизации. Поэтому на их основе можно создавать системы многоточечного мониторинга [20,21,22], чтобы у исследователей была возможность долговременно наблюдать 3D-картину временных изменений высоты нижней границы облака (а по возможности – и других его характеристик) на больших пространственных территориях.

Из пассивных методов, пожалуй, наиболее точными являются триангуляционные методы, работающие по принципу бинокулярного зрения. Однако для обеспечения приемлемой точности измерения, особенно облаков верхнего яруса, они требуют применения достаточно большого базового расстояния между фотоприемниками, высокой степени идентичности используемых в них фотоприемников и оптических систем, строгой параллельности установки их оптических осей, а также выполнения перед применением довольно сложной калибровки и юстировки. Интересной разновидностью таких методов является приведенный в [23] метод, в котором для наблюдения применены два идентичных оптических приемника с различными фокусными расстояниями. Однако такое решение только усугубляет проблему снижения точности измерений из-за неидентичности измерительных каналов. Кроме того, поскольку в нем расстояние определяется по разности размеров изображения, проецируемого на фотоприемники, определить изменение размера облака, не имеющего четких границ, с погрешностью менее одного пикселя матрицы фотоприемника крайне проблематично. К дополнительным недостатком описанных методов можно отнести необходимость применения двух фотоприемников, причем с высоким пространственным разрешением.

Если исходить из принципа минимизации стоимости используемого для наблюдения оборудования, то стоит обратить внимание на работу [24], в которой для измерения достаточно использовать только одну, но работающую в ближнем ИК – диапазоне твердотельную матрицу – микроболометр с разрешением 240 x 320 пикселей. Высота нижней границы в этой работе рассчитывается через смещение изображения облака за фиксированный временной интервал и через скорость его перемещения, которая не измеряется, а берется либо со спутниковых данных, либо полагается равной скорости ветра, вертикальные профили скорости и направления которого, а также профиль влажности берутся с ближайшей метеостанции, где они измеряются дважды в сутки. Профили направления ветра и влажности воздуха используются для исключения неоднозначности получаемого решения из-за того, что на разных высотах скорость ветра может существенно отличаться как по величине, так и по направлению.

Хотя авторы публикации и получили погрешность определения высоты нижней границы около 10%, можно предположить, что из-за невозможности получения информации о вертикальных профилях параметров атмосферы непосредственно в месте и во время измерения эта погрешность может существенно возрасти. Кроме того, при слабом ветре погрешность метода значительно возрастает, а при отсутствии ветра (что, правда, маловероятно на больших высотах) метод становится полностью неработоспособным.

Из всех перечисленных методов наиболее простыми являются методы, определяющие высоту нижней границы облачности по параметрам окружающей среды и типу облачного покрова [6,18,19]. С одной стороны, они основаны на результатах многолетних наблюдений, а с другой

стороны, имеют достаточно строгое теоретическое обоснование [19] и обеспечивают вполне приемлемую точность измерения.

Постановка задачи. Основной целью данной работы являлась разработка экспериментальной установки, которая бы при минимуме программно-аппаратных затрат позволяла непрерывно или хотя бы в светлое время суток получать максимум информации о состоянии облачного покрова в месте ее расположения. Такая установка может быть легко воспроизведена энтузиастами – любителями и быть подключена к многоточечной сети экологического мониторинга, подобной описанной в работах [20-22] для последующего использования получаемых с нее данных для проведения научных исследований в области климатологии и метеорологии. Особенно такая установка может заинтересовать тех, кто имеет частные метеостанции, уже подключенные к какой-либо системе сбора данных, подобной, например, системе Intellicast (Wunderground) [25], в которую входит свыше 250000 персональных метеостанций.

Методы исследования. Как уже было отмечено, лучше всего для такого решения подходят пассивные методы косвенного измерения через температуру и влажность воздуха, т.к. в простейшем варианте для их реализации достаточно в месте замера установить измеритель относительной влажности и датчик температуры, которые, как правило, уже имеются на метеостанциях. Так например, по методу дефицита точки росы, предложенному У. Феррелем, Д.Л. Лайхтманом и др. [6], минимально возможная высота границы облачности H в метрах для облаков вертикального развития задается выражением

$$H = 122 \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где $\Delta T = t - td$, t – температура воздуха, td – точка росы, легко рассчитываемая через относительную влажность воздуха по известным из физики формулам.

Однако, на практике нужно знать не минимально возможную, а фактическую высоту для конкретного облака, которая, как известно, при одной и той же влажности будет различной для различного типа облаков. Поэтому вместо (1) применяются формулы Д.Л. Лайхтмана [6]:

$$H = A \cdot (B - \lg f), \quad (2)$$

или А.Н. Ишполитова [6]:

$$H = C \cdot (D - f), \quad (3)$$

где f – выраженная в процентах относительная влажность воздуха, а постоянные коэффициенты зависят от типа облаков. Например, для конвективной облачности в (2) нужно задать $A = 3780$, а $B = 2$. Несмотря на простоту, данные методы обеспечивают нахождение фактических минимальных значений высот нижних границ облаков разного типа с погрешностью не более 5-20%, что для обозначенной цели применения вполне приемлемо. При этом использовать последнее выражение предпочтительнее, так получаемые с его помощью результаты менее чувствительны к точности определения типа облаков и имеют меньшую погрешность для комбинированных типов облаков [6].

Таким образом, задача сводится к выяснению наличия облаков на небесной сфере и определению типа облачного покрова, то есть к задаче распознавания образов. Из аппаратного же обеспечения достаточно использовать подключенные к компьютеру датчик влажности и любую типовую web – камеру. При необходимости ведения круглосуточного мониторинга web – камеру потребуется заменить на чувствительную в ИК области спектра матрицу фотоприемников, подобную используемой в работе [24]. В данной работе в экспериментах использовалась web – камера Genius Web Cam Q-CAM 6000 с максимальным разрешением 1920x1080 и датчик влажности DHT22, подключенный к компьютеру через OEM – модуль Arduino – Uno.

Методы исследования. Алгоритм идентификации типа облачного покрова. Изначально предполагалось использование для идентификации типа облаков нейронную сеть, подобно тому, как это было реализовано в работе [26]. Однако проведенный анализ и предварительные эксперименты показали, что для получения хороших результатов в реальном масштабе времени при использовании нейронных сетей потребуется применять достаточно высокопроизводительные компьютеры. Учитывая же, что в реализуемой методике определения нижней границ облачности достаточно классифицировать облака только на три типа (кучевые, слоистые и перистые), было решено использовать для идентификации более простые и менее требовательные к вычислительным ресурсам методы, основанные на обработке контуров облаков, образованных их границами или неоднородностями изображений. Это позволило значительно сократить объем обрабатываемой информации за счет выделения на изображении только наиболее характерных и существенных признаков. Для выделения контуров на изображении небосвода выделялись участки с облаками, затем для них выполнялось оконтуривание и далее по форме контуров принималось решение о типе облака.

Для выделения содержащих облака участков изображения оно бинаризовалось либо с применением фиксированного порога, рассчитываемого по алгоритму Otsu [27], либо методом адаптивной бинаризации. Для выбора метода бинаризации все изображение разбивалось на $4 \times 4 = 16$ сегментов, вычислялось суммарное значение яркостей элементов для каждого из них, максимальная разность суммарных яркостей между смежными сегментами и разность суммарных яркостей между самым засвеченным и самым затемненным сегментом. Разность суммарных яркостей смежных сегментов можно интерпретировать как некоторый усредненный градиент, поэтому по этой величине можно судить о степени контрастности изображения. При этом максимальный перепад суммарных яркостей сегментов дает картину о степени неравномерности освещенности всей сцены изображения. Если отношение максимальной разности суммарной яркости смежных сегментов к максимальному перепаду суммарных яркостей сегментов превышало значение 0.5, выполнялась как менее ресурсоемкая Otsu - бинаризация изображения, в противном случае использовалась адаптивная бинаризация. Примеры бинаризованных изображений показаны на рис. 1 и 2.

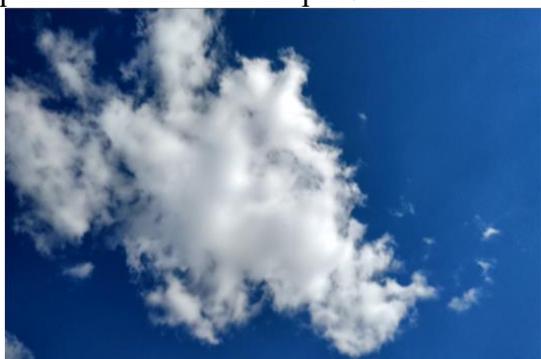


Рис.1. Исходное изображение и его Otsu – бинаризация
Fig. 1. Original image and its Otsu - binarization

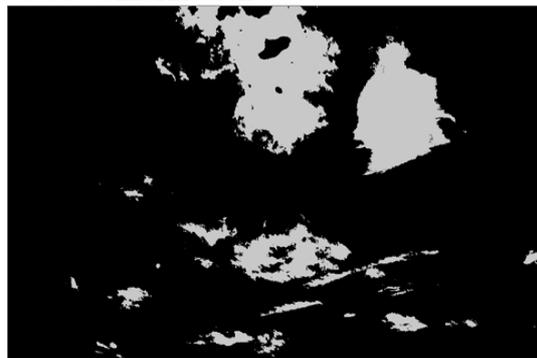
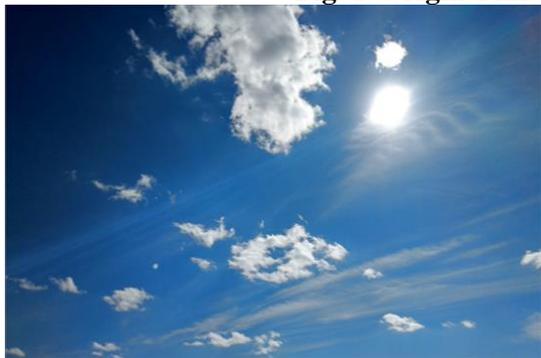


Рис. 2. Исходное изображение и его адаптивная бинаризация
Fig. 2. The original image and its adaptive binarization

На полученном после бинаризации изображении на светлых участках исключались внутренние темные области, с помощью операции дилатации и последующей эрозии из изображения исключались также мелкие элементы, сглаживались края выделенных участков, подсчитывалось их число, находились размеры, искусственно незначительно увеличивались размеры участков. Полученное после этих процедур бинарное изображение использовалось в качестве маски для выделения на изображении содержащих облака участков для последующей обработки.

На следующем этапе на выделенном изображении выполнялось выделение границ облаков. Для этого были рассмотрены алгоритмические реализации на основе оператора Кэнни и Собеля [28-30]. Однако анализ этих алгоритмов и проведенные эксперименты по их применению к реальным изображениям показали, что алгоритм на основе оператора Кэнни предпочтительнее, так как его реализация в библиотеке OpenCV [28] включает в себя операции замыкания и утончения контуров, что упрощает последующую обработку изображения. Примеры работы оператора Кэнни приведен на рис. 3.

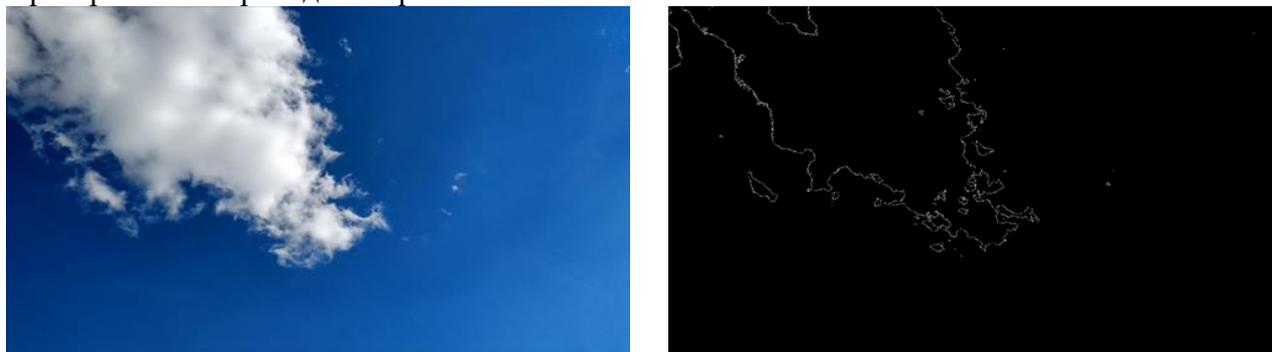


Рис.3. Результат работы оператора Кэнни
Fig. 3. The result of the Canny operator

На заключительной стадии производилось определение типа облаков, для чего использовались такие классификационные признаки, как количество выделенных при бинаризации участков, плотность их расположения, доли площади в кадре, занимаемые всеми выделенными облаками и самым большим облаком, взаимное расположение облаков друг относительно друга, а также форма облаков.

Для упрощения анализа формы облака и ряда других характеризующих изображение параметров было предложено аппроксимировать не более пятнадцати самых больших по площади облаков эллипсом.

В качестве критерия точности аппроксимации использовался интеграл по контуру эллипса от квадрата расстояния между контуром эллипса и контуром облака. В случае возникновения неоднозначности решения выбирался вариант с наименьшей площадью. Расстояние между линиями контура эллипса и облака определялось по линии, совпадающей с линией радиуса, проведенного из центра эллипса в сторону соответствующей точки контура. Если в этом направлении контур облака пересекался многократно, в расчет принималось среднее расстояние между точкой на контуре эллипса и точками пересечения линии с линиями контура.

В качестве критерия плотности расположения облаков бралась величина, обратная отношению суммы кратчайших расстояний между контуром эллипса с наибольшей площадью и контурами пяти (при их наличии) ближайших к нему (по расстоянию между центрами) эллипсов других облаков к суммарному расстоянию между центрами выделенных эллипсов.

Обсуждение результатов. В соответствии с перечисленными критериями для идентификации типа облаков были сформулированы следующие признаки.

1. Кучевые облака (рис.4): количество облаков с большой площадью невелико (от одного до двух штук, реже больше) и они имеют эллипсы с близким к единице эксцентриситетом, общая занимаемая облаками в кадре площадь – низкая, и мелкие эллипсы (при их наличии) прилегают к большим.

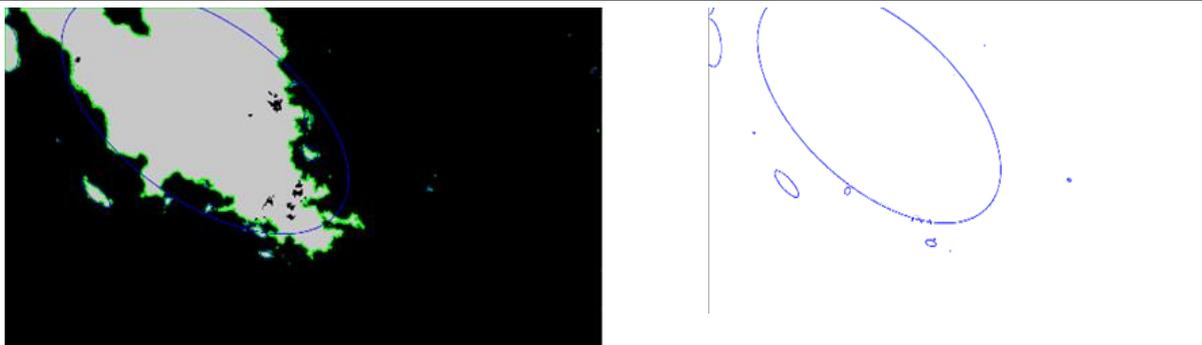


Рис.4. Процесс обработки изображения (приведенного на рис.3) для кучевых облаков
Fig. 4. The image processing process (shown in Fig. 3) for cumulus clouds

2. Слоистые облака (рис. 5): имеют эксцентриситет аппроксимирующих эллипсов, лежащий в интервале 0.25-0.75, большую долю площади кадра, занимаемую облаками и высокую плотность их расположения.

3. Перистые облака (рис. 6): большое число незначительно отличающихся по площади облаков с низким, лежащим в интервале 0.05-0.3 значением эксцентриситета аппроксимирующих их эллипсов, большие оси которых почти параллельны, и со средней или низкой плотностью их расположения.

Для оценки достоверности идентификации было обработано по 25 кадров с изображениями облаков каждого из рассмотренных типов.

Для всех трех типов ошибки первого и второго рода не превысили 5-10%, причем для перистых облаков их значение было минимально. Однако, согласно Международному атласу облаков всемирной метеорологической организации, существует более 100 типов облаков, которые, в зависимости от выбранного классификационного признака (внешний вид, характер образования, высота размещения), подразделяют на 5-10 основных типов.

Применительно к решаемой задаче уместнее было бы использовать классификацию, основанную не на морфологических признаках, а на месте их преимущественного размещения (облака нижнего, среднего, верхнего яруса и, возможно, вертикального развития). И, как оказалось, на одной и той же высоте могут оказаться облака с сильно различной формой, тогда как облака одного типа (кучевые и их разновидности) могут образовываться на разных высотах. Другой проблемой является возможность появления в кадре различных типов облаков, размещенных на разных ярусах.

Отсюда вытекает необходимость дальнейшего развития данных исследований, с целью совершенствования предложенной методики для решения указанных проблем.



Рис.5. Процесс обработки изображения слоистых облаков
Fig. 5. Image processing process for layered clouds

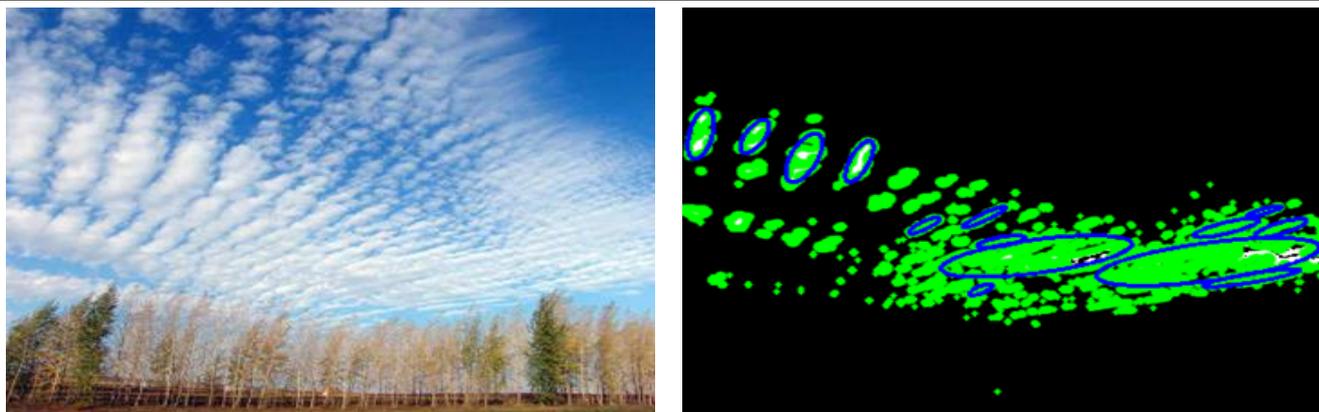


Рис.6. Процесс обработки изображения перистых облаков
Fig. 6. Cirrus Clouds Image Processing Process

Алгоритм для определения скорости и направления движения облаков. В большинстве работ, посвященных дистанционному измерению скорости перемещения объектов по их изображениям (в том числе и облаков [24]), используются корреляционные методы. Однако, такие методы имеют высокую вычислительную сложность, и, следовательно, весьма требовательны к вычислительным ресурсам. Поэтому в данной работе было предложено определять скорость облаков по смещению описывающих их характерных точек, общих для исходного изображения и изображения со смещенными и несколько деформированными облаками.

Для нахождения этих точек был использован алгоритм SURF [28] как наиболее быстрый и точный на сегодняшний день. Данный алгоритм для каждой выделенной характерной точки изображения формирует дескриптор, хранящий значение градиента в этой точке (его модуль и направление). Сравнение дескрипторов точек для разных кадров позволяет выделить для них общие точки. Пример работы данного алгоритма представлен на рис. 7,8.



Рис.7. Выделенные на изображении облака ключевые точки
Fig. 7. Key points highlighted in the cloud image

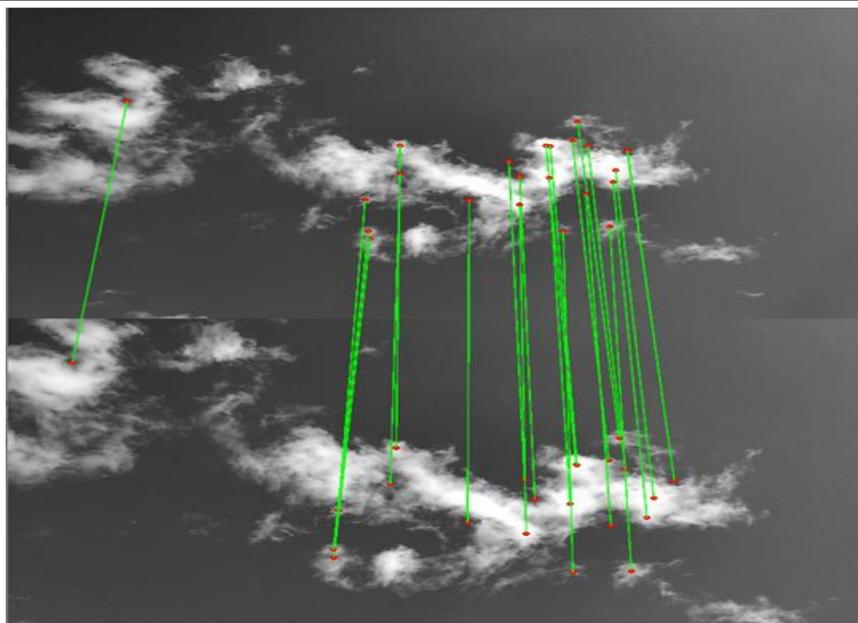


Рис.8. Смещение ключевых точек при движении облака
Fig. 8. Offset of key points when the cloud moves

Сначала для каждой точки рассчитывается вектор скорости ее перемещения в кадре изображения, затем находится среднее значение векторов скорости по всему кадру и далее, зная угол визирования, фокусное расстояние оптической системы и высоту облака, относительная его скорость в кадре изображения пересчитывается в абсолютную скорость по известным законам физики и оптики.

Вывод. Предложенная в работе максимально простая и требующая минимального набора простейшего оборудования методика позволяет пусть с достаточно большой погрешностью, достигающей 20%, определять основные параметры облачного покрова без привлечения не всегда имеющейся для конкретного места наблюдения информации о метеорологической обстановке и иных сведений о свойствах окружающей среды.

Это позволяет значительно расширить число мест наблюдения за состоянием облачного покрова, и соответственно, предоставить большой объем дополнительной информации, столь актуальной при проведении исследований в области климатологии и метеорологии.

В заключение автор выражает искреннюю признательность бывшему магистранту Алтайского государственного технического университета К. Уварову за неоценимую помощь в разработке программно-технического обеспечения и проведении экспериментальных исследований.

Библиографический список:

1. Крутиков, В. А., Полищук Ю. М. Геоинформационное обеспечение мониторинга окружающей среды и климата // Оптика атмосферы и океана. 2002. №1. С. 12-20
2. Васильев А.В., Мельникова И.Н. Коротковолновое солнечное излучение в атмосфере земли, расчеты, измерения, интерпретация // СПб, Изд-во НИИХ СПбГУ, 2002. 350 с.
3. Nuijens L., Siebesma A.P. Boundary Layer Clouds and Convection over Subtropical Oceans in our Current and in a Warmer Climate // Current Climate Change Reports. 2019. vol.5. No. 2, pp.80-94. DOI: 10.1007/s40641-019-00126-x
4. Yue Q., Kahn B.H., Fetzer E.J. et al. Temporal and Spatial Characteristics of Short-Term Cloud Feedback on Global and Local Interannual Climate Fluctuations from A-Train Observations // Journal of Climate. 2019. vol. 32. No. 6. pp.1875-1893 DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0335.1
5. McCoy D.T., Eastman R., Hartmann D. L., Wood R. The change in low cloud cover in a warmed climate inferred from AIRS, MODIS, and ECMWF-Interim reanalysis// J. Climate. 2017. vol. 30, pp.3609-3620. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0734.1.
6. Абрамович К.Г. Об изменчивости высоты нижней границы облаков // Метеорология и гидрология. – 1968. - № 5. - С.30-41.
7. Киселев, В.Н., Кузнецов А.Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы): учеб. издание. - СПб: РГГМУ. - 2004. - 429 с

8. Kumar A., Kim H., Hancke G.P. Environmental Monitoring Systems: A Review// IEEE Sensors Journal.- 2013.- vol.13, № 4. - pp.1329 -1339. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2233469
9. Artiola J.F., Pepper I.L., Brusseau M.L. Environmental Monitoring and Characterization. - Academic Press, 2004, 410pp DOI: 10.1016/B978-0-12-064477-3.X5000-0
10. MODIS. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>
11. Yakunin M.A., Yurchenko A.V. MODTRAN5 simulations of responses from MODIS spectroradiometer channels// Technical Physics. 2015. vol. 60, No. 1. pp. 141-144
12. Yakunin M.A. A hybrid method for evaluating absorbed solar energy at the surface level using remote sensing data // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2015. vol. 8. №2. pp. 224-229
13. Yakunin M.A., Yakunin A.G., Suchkova L.I., Hussein H.M. Lighting monitoring and its application in the radiation balance research// В сб.: Измерение, контроль, информатизация. Материалы XIV Международной научно-технической конференции. Барнаул. 2013. С. 24-26.
14. Федорцев Р. В., Каролик Е.П., Кудряшов А.А. Алгоритм расчета высоты нижней границы облаков // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. - 2010. - №5. - С. 32-36. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/1414/32-36.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
15. Демин А.В., Константинов К.В. Имитационная модель оптико-электронного измерителя высоты нижней границы облака // В сб. Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. - №2, СПб.: СПбГУ ИТМО, - 2009. - с. 33-38. <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-optiko-elektronno-go-izmeritelya-vysoty-nizhney-granitsy-oblaka>
16. Атлас облаков / Под ред. А. Х. Хргиана, Н. И. Новожилова. Л.: Гидрометеиздат. - 1978. - 266 с
17. Патент РФ № 2321029 Способ определения высоты, направления и скорости движения нижней границы облачности / Зуев С. В., опубл.27.03.2008, Бюл. № 9
18. Анискин Л.В., Боровиков А.А., Персин С.М. Исследование изменчивости высоты нижней границы облаков // Труды ГГО. - 1987. - №512. - с. 92-107
19. Голицын Г.С., Руткевич Б.П., Руткевич П.Б. Нижняя граница облачности // В сб. "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", вып.3., Т1.- М.: ИКИ РАН. - 2006. – С. 263-269. URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol1-263-269.pdf>
20. Сучкова Л.И., Хуссейн Х.М., Якунин М.А., Якунин А.Г., Юрченко А.В. Многоточечная система дистанционного мониторинга пространственно-распределенных динамических процессов// Контроль. Диагностика. - 2013. - № 13. - С. 95-101
21. Yakunin A.G., Hussein H.M. Hardware-software and algorithmic provision of multipoint systems for long-term monitoring of dynamic processes // IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series.- 2017. – vol.881. DOI: 90.1088/1742-6596/881/1/012028
22. Hussein Sh. M., Yakunin A.G. Development of a Lossless Data Compression Algorithm for Multichannel Environmental Monitoring Systems//14th International scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 44894 PROCEEDINGS: Novosibirsk, 2018. - vol.1, part 2. – pp.483-486. Publ.in IEEE Xplore 29 nov. 2018. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546121
23. Патент РФ № 2377612 Моностабильный способ определения высоты нижней границы облачности / Зуев С. В., опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36
24. Hirsch, E., Agassi, E., and Koren, I.: A novel technique for extracting clouds base height using ground based imaging, Atmos. Meas. Tech., 2011.- vol 4, issue 1, 117-130, DOI: 10.5194/amt-4-117-2011.
25. Сеть персональных метеостанций - <https://www.wunderground.com/weatherstation/overview.asp>
26. Wu Z., Xu X., Xia M., Meifang Ma, Li L. Ground-based vision cloud image classification based on extreme learning machine//The Open Cybernetics & Systemics Journal, 2015, 9, 2877-2885DOI: 10.2174/1874110X01509012877URL<https://pdfs.semanticscholar.org/3091/db903893b1ce8edee83ec59dd4b600f4e8fc.pdf>
27. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms// IEEE Trans. Sys., Man., Cyber. : Journal. - 1979. vol. 9. pp. 62-66.
28. Gonzalez R.C., Woods R.E., Digital Image Processing, 4th Edition . Pearson Education Ltd,2018. 1192p
29. Открытая библиотека OpenCV. URL: <http://opencv.org>
30. Бакут П.А., Колмогоров Г.С., Ворновицкий И.Э. Сегментация изображений: методы выделения границ областей // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 10. С.25-47.

References:

1. Krutikov, V. A., Polishchuk YU. M. Geoinformatsionnoye obespecheniye monitoringa okruzhayushchey sredy i klimata // Optika atmosfery i okeana. - 2002. - №1. - С. 12-20 [Krutikov, V. A., Polishchuk Yu. M. Geoinformation support for monitoring the environment and climate // Optics of the atmosphere and ocean. 2002. No. 1. pp. 12-20 (In Russ)]
2. Vasil'yev A.V., Mel'nikova I.N. Korotkovolnovoye solnechnoye izlucheniye v atmosfere zemli, raschety, izmereniya, interpretatsiya // Spb, Izd-vo NIIKH SPbGU, 2002. - 350 s. [Vasiliev A.V., Melnikova I.N. Short-wave solar radiation in the earth's atmosphere, calculations, measurements, interpretation // St. Petersburg, NIIH SPbU, 2002. 350 p. (In Russ)]

3. Nuijens L., Siebesma A.P. Boundary Layer Clouds and Convection over Subtropical Oceans in our Current and in a Warmer Climate // *Current Climate Change Reports*. 2019/ vol.5. № :2, pp.80-94. DOI: 10.1007/s40641-019-00126-x
4. Yue Q., Kahn B.H., Fetzer E.J. at all. Temporal and Spatial Characteristics of Short-Term Cloud Feedback on Global and Local Interannual Climate Fluctuations from A-Train Observations // *Journal of Climate*. – 2019. – vol. 32. №6. pp.1875-1893. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0335.1
5. McCoy D.T., Eastman R., Hartmann D. L., Wood R. The change in low cloud cover in a warmed climate inferred from AIRS, MODIS, and ECMWF-Interim reanalysis// *J. Climate*. 2017. vol. 30, pp.3609-3620. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0734.1.
6. Abramovich K.G. Ob izmenchivosti vysoty nizhney granitsy oblakov // *Meteorologiya i gidrologiya*. – 1968. - № 5. - S.Z0-41. [Abramovich K.G. On the variability of the height of the lower boundary of clouds // *Meteorology and Hydrology*. - 1968. - No. 5. pp.30-41(In Russ)]
7. Kiselev, V.N., Kuznetsov A.D. Metody zondirovaniya okruzhayushchey sredy (atmosfera): ucheb. izdaniye. - SPb: RGGMU. - 2004. - 429 s [Kiselev, V.N., Kuznetsov A.D. Methods of sensing the environment (atmosphere): textbook. edition. - St. Petersburg: Russian State Medical University. 2004 . 429 p. (In Russ)]
8. Kumar A., Kim H., Hancke G.P. Environmental Monitoring Systems: A Review// *IEEE Sensors Journal*.- 2013.- vol.13, № 4. - pp.1329 -1339. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2233469
9. Artiola J.F., Pepper I.L., Brusseau M.L. Environmental Monitoring and Characterization. - Academic Press, 2004, 410pp DOI: 10.1016/B978-0-12-064477-3.X5000-0
10. MODIS. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>
11. Yakunin M.A., Yurchenko A.V. MODTRAN5 simulations of responses from MODIS spectroradiometer channels// *Technical Physics*. 2015. vol. 60, № 1. pp. 141-144
12. Yakunin M.A. A hybrid method for evaluating absorbed solar energy at the surface level using remote sensing data // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. - 2015. - vol. 8. - №2. - pp. 224-229 [Yakunin M.A. A hybrid method for evaluating absorbed solar energy at the surface level using remote sensing data // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2015. vol. 8. №2. pp. 224-229(In Russ)]
13. Yakunin M.A, Yakunin A.G., Suchkova L.I., Hussein H.M. Lighting monitoring and its application in the radiation balance research// *V sb.: Izmereniye, kontrol', informatizatsiya. Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii*. - Barnaul. - 2013. - S. 24-26. [Yakunin M.A, Yakunin A.G., Suchkova L.I., Hussein H.M. Lighting monitoring and its application in the radiation balance research// *In: Measurement, control, informatization. Materials of the XIV International Scientific and Technical Conference*.-Barnaul. 2013. pp. 24-26. (In Russ)]
14. Fedortsev R. V., Karolik Ye.P., Kudryashov A.A. Algoritm rascheta vysoty nizhney granitsy oblakov // *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta: nauchno-tehnicheskii zhurnal*. - 2010. - №5. - S. 32-36. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/1414/32-36.pdf?sequence=4&isAllowed=y> [Fedortsev R.V., Karolik E.P., Kudryashov A.A. Algorithm for calculating the height of the lower boundary of the clouds // *Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal*. 2010. No. 5. pp. 32-36. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/1414/32-36.pdf?sequence=4&isAllowed=y>(In Russ)]
15. Demin A.V., Konstantinov K.V. Imitatsionnaya model' optiko-elektronnogo izmeritelya vysoty nizhney granitsy oblaka // *V sb. Nauchno-tehnicheskii vestnik SPbGU ITMO*. - №2, SPb.: SPbGU ITMO, - 2009. - c. 33-38. <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-optiko-elektronnogo-izmeritelya-vysoty-nizhney-granitsy-oblaka> [Demin A.V., Konstantinov K.V. A simulation model of an optoelectronic measuring device for the height of the lower boundary of the cloud // *In Sat. Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University ITMO*. No. 2, St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2009. pp. 33-38. <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-optiko-elektronnogo-izmeritelya-vysoty-nizhney-granitsy-oblaka> (In Russ)]
16. Atlas oblakov / Pod red. A. KH. Khrgiana, N. I. Novozhilova. L.: Gidrometeoizdat. - 1978. - 266 s [Atlas of the clouds / Ed. A. Kh. Khrgiana, N.I. Novozhilova. L.: Hydrometeoizdat. 1978. 266 p. (In Russ)]
17. Patent RF № 2321029 Sposob opredeleniya vysoty, napravleniya i skorosti dvizheniya nizhney granitsy oblachnosti / Zuyev S. V., opubl.27.03.2008, Byul. № 9 [RF patent No. 2321029 A method for determining the height, direction and speed of movement of the lower border of clouds / Zuev S.V., publ. March 27, 2008, Bull. Number 9(In Russ)]
18. Aniskin L.V., Borovikov A.A., Persin S.M. Issledovaniye izmenchivosti vysoty nizhney granitsy oblakov // *Trudy GGO*. - 1987. - №512. - c. 92-107 [Aniskin L.V., Borovikov A.A., Persin S.M. Study of the variability of the height of the lower boundary of the clouds // *Proceedings of GGO*. 1987. No. 512. pp. 92-107(In Russ)]
19. Golitsyn G.S., Rutkevich B.P., Rutkevich P.B. Nizhnaya granitsa oblachnosti // *V sb. "Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"*, vyp.3., T1.- M.: IKI RAN. - 2006. – S. 263-269. URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol1-263-269.pdf> [Golitsyn G.S., Rutkevich B.P., Rutkevich P.B. The lower boundary of clouds // *In Sat. "Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"*, issue 3., T1.- M.: IKI RAS. 2006. pp. 263-269. URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol1-263-269.pdf> (In Russ)]
20. Suchkova L.I., Khusseyin KH.M., Yakunin M.A., Yakunin A.G., Yurchenko A.V. Mnogotochechnaya sistema distantsionnogo monitoringa prostranstvenno-raspredeleennykh dinamicheskikh protsessov// *Kontrol'. Diagno-stika*. - 2013. - № 13. - S. 95-101 [Suchkova L.I., Hussein H.M., Yakunin M.A., Yakunin A.G., Yurchenko A.V. Multipoint system

- for remote monitoring of spatially distributed dynamic processes // Control. Diagnostics. 2013. No. 13. pp. 95-101(In Russ)]
21. Yakunin A.G., Hussein H.M. Hardware-software and algorithmic provision of multipoint systems for long-term monitoring of dynamic processes // IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series.- 2017. – vol.881. DOI: 90.1088/1742-6596/881/1/012028
 22. Hussein Sh. M., Yakunin A.G. Development of a Lossless Data Compression Algorithm for Multichannel Environmental Monitoring Systems//14th International scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 44894 PROCEEDINGS: Novosibirsk, 2018. - vol.1, part 2. – pp.483-486. Publ.in IEEE Xplore 29 nov. 2018. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546121
 23. Patent RF № 2377612 Monostaticheskiy sposob opredeleniya vysoty nizhney granitsy oblachnosti / Zuyev S. V., opubl. 27.12.2009, Byul. № 36 [RF patent No. 2377612 Monostatic method for determining the height of the lower border of cloudiness / Zuev S.V., publ. 12 nov. 2009, Bull. Number 36
 24. Hirsch, E., Agassi, E., and Koren, I.: A novel technique for extracting clouds base height using ground based imaging, Atmos. Meas. Tech., 2011.- vol 4, issue 1, 117-130, DOI: 10.5194/amt-4-117-2011.
 25. Personal Weather Station Network - <https://www.wunderground.com/weatherstation/overview.asp> (In Russ)]
 26. Wu Z., Xu X., Xia M., Meifang Ma, Li L. Ground-based vision cloud image classification based on extreme learning machine //The Open Cybernetics & Systemics Journal, 2015, 9, 2877-2885 DOI: 10.2174/1874110X01509012877URL<https://pdfs.semanticscholar.org/3091/db903893b1ce8edee83ec59dd4b600f4e8fc.pdf>
 27. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms// IEEE Trans. Sys., Man., Cyber. : Journal. 1979. vol. 9. pp. 62-66.
 28. Gonzalez R.C., Woods R.E., Digital Image Processing, 4th Edition .- Pearson Education Ltd,2018.-1192p
 29. Open library on image processing OpenCV. URL: <http://opencv.org> (In Russ)]
 30. Bakut P.A., Kolmogorov G.S., Vornovitskiy I.E. Segmentatsiya izobrazheniy: metody vydeleniya granits oblastey // Zarubezhnaya radioelektronika. 1987. № 10. S.25-47 [Bakut P.A., Kolmogorov G.S., Vornovitskiy I.E. Image segmentation: methods for highlighting the boundaries of regions // Foreign Radioelectronics. 1987. No. 10. pp.25-47 (In Russ)]

Сведения об авторе:

Якунин Алексей Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики, вычислительной техники и информационной безопасности; e-mail: yakunin@agtu.secna.ru

Information about the author:

Alexey G. Yakunin, Dr. Sc. (Technical), Prof., Head of the Department of Informatics, Computer Engineering and Information Security; e-mail: yakunin@agtu.secna.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.07.2019.

Принята в печать 07.09.2019.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 18.07.2019.

Accepted for publication 07.09.2019.