

## РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ НАБЛЮДЕНИЙ БОЛИДНЫХ ЯВЛЕНИЙ В РОССИИ

Кругликов Н.А.<sup>1,2,3</sup>, Рычков Д.А.<sup>4,5</sup>, Короткий С.А.<sup>6</sup>, Янковский И.С.<sup>7</sup>, Кичев А.Н.<sup>8</sup>,  
Борболин А.Д.<sup>1</sup>, Белева Е.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург,

*nick@imp.uran.ru*

<sup>3</sup>Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург

<sup>4</sup>ООО «Газпром трансгаз Краснодар», г. Анапа

<sup>5</sup>International Meteor Organization, *dmitr.rychkov@gmail.com*

<sup>6</sup>Обсерватория Ка-Дар, г. Нижний Архыз

<sup>7</sup>МОУ «Гаевская основная общеобразовательная школа», д. Гаева, *starvisor.ural@gmail.com*

<sup>8</sup>Российская болидная сеть

Разработка болидной сети – длительный и затратный процесс. Немногие страны могут похвастаться функционирующей сетью. Такой прибор позволяет оперативно обнаруживать новые падения и получать информацию об их доатмосферных траекториях. Большая территория России и хорошо развитая инфраструктура дает возможности для развития такой сети. Мы уже несколько лет изучаем известные решения и ведём разработку своих вариантов оборудования и программного обеспечения в этой области. Основные факторы, которые понижают эффективность использования болидной сети на территории России – климат нашей страны, рельеф и большие незаселенные территории.

Наш опыт использования алгоритмов распознавания при наблюдениях продемонстрировал, что камеры, использующие фотометод, могут обслуживаться компьютерами на базе процессоров Pentium IV под управлением Windows XP с использованием медленного интерпретатора языка Python (без специализированных библиотек) [Борболин, 2018]. Иногда для камер высокого разрешения используются и более дорогие решения (Австралийская болидная сеть использует вычислительные устройства на базе встраиваемого компьютера с полным набором команд, камеры Canon 810 с разрешением КМОП матрицы 36 МП и широкоугольного объектива типа «рыбий глаз», стоимость системы ~2000\$) [Howie et al., 2017]. Могут быть использованы и недорогие одноплатные компьютеры с RISC процессорами (Raspberry PI, 35\$) [Vida et al., 2018]. Такой подход позволяет быстро развивать сеть без существенных затрат и оперативно обучать новых пользователей. Библиотека OpenCV с использованием компилятора C++ дает более высокую скорость распознавания, но требует создания специализированных приложений под разные операционные системы. Для более производительных систем

могут быть использованы более современные версии интерпретатора Python (3.6, 4.2) интегрированного с библиотекой OpenCV. Дополнительное повышение скорости или точности распознавания может быть получено при использовании машинного обучения [Белева, 2019]. Быстрое развитие и массовое производство многоядерных одноплатных систем с низким энергопотреблением, появление на рынке видеокамер на базе недорогих КМОП матриц SONY IMX290/291 и кодеков H.264/H.265, которые в свою очередь, поддерживаются центральными процессорами (или сопроцессорами) встраиваемых систем с открытой архитектурой, дают возможность эффективной работы с видеопотоком. Такие решения уже известны и используются. К примеру, любительская сеть GMN (Global meteor network) [<https://globalmeteonetwork.org/>] на базе Raspberry PI с открытым кодом (используются разработки университета Северного Онтарио) активно развивается и значительная часть станций уже работает на территории России [Vida et al., 2016]. При этом может быть реализовано решение для камеры всего неба с использованием более мощного компьютера, оснащенного процессором с полным набором команд и шестью - семью камерами с перекрывающимися полями зрения [[www.allskycams.com](http://www.allskycams.com)]. Авторы настоящей статьи инициировали процесс внедрения различных систем на основе RaspberryPI и программного кода GMN на территории России, координируют деятельность и активно участвуют в развитии проекта. Опыт показывает, что при пониженной стоимости минимального комплекта для наблюдений (около 12 тысяч рублей против 2000\$ за комплект на базе ПЗС камер Watec французской сети FRIPON с меньшим разрешением) данное решение не лишено минусов. К примеру, пока нет сервера обработки данных на территории России. Программное обеспечение, не может быть легко установлено на

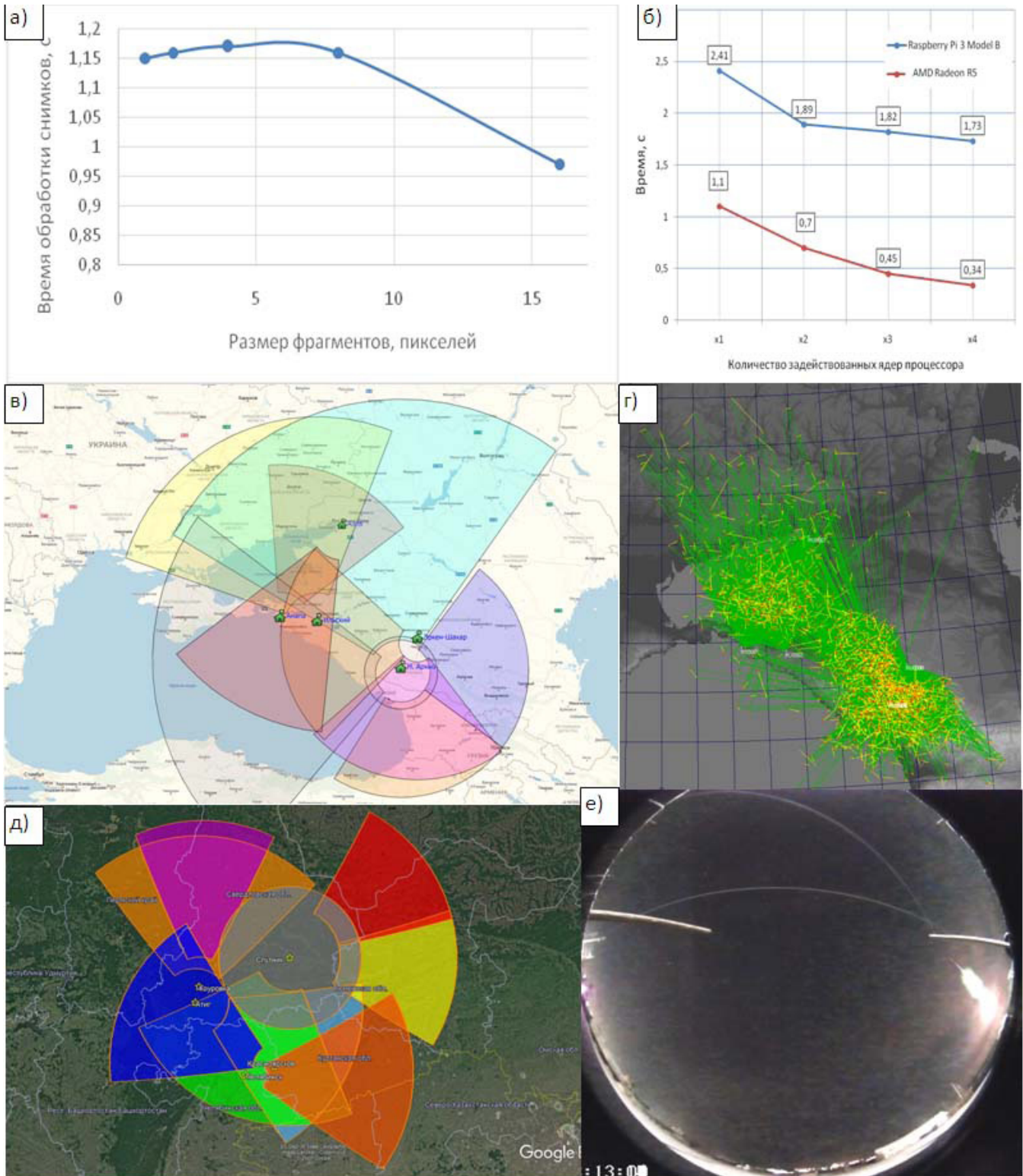


Рис. 1. а – Зависимость скорости обработки снимков от размера фрагментов (Pentium IV, 512 МБ ОЗУ, WinXP SP3, Python 3.4, 351 снимок 1360X1024 пикселей); б – график зависимости времени работы сверточной нейронной сети на различных платформах в зависимости от количества задействованных ядер, используемых для вычислений (Python 3.6 + TensorFlow, 1 снимок, 80 проходов, 1 - CPU: ARM Cortex-A53, 32-bit, 1,2ГГц, ОЗУ: 1 Гб; 2. - CPU: AMD A10-9600P Radeon R5 64-bit 2.4 ГГц RAM: 3.3 Гб ); в – покрытие болидной сетью южной части России (01.04.2020); г – результат работы с 01.01.2020 по 04.04.2020 (2257 базисных наблюдений метеоров в автоматическом режиме); д – покрытие болидной сетью Уральского региона (01.04.2020); е – изображение болида 30.01.2020 г., зарегистрированное камерой всего неба, установленной в г. Ирбит (пос. Спутник)

любой компьютер из-за несовместимости библиотек Python новой версии и 32-битных систем, при этом старые версии уже не доступны.

Современные астрометрические алгоритмы позволяют привязать поле зрения камеры даже при существенном влиянии искажений недорогих объективов, используемых в конструкции. Имеется возможность расчета доатмосферной траектории. Кроме того, можно использовать многоядерные вычислительные устройства с большим количеством процессоров и малым энергопотреблением (NVIDIA Jetson разных модификаций (от 128 до 512 ядер, от 10 до 30 Вт, 10-80 тысяч рублей) или встраиваемые устройства на базе процессоров с полным набором команд и мощной видеокартой) для более точного распознавания событий в пункте наблюдения. Использование машинного обучения (к примеру, библиотека TensorFlow) в таком случае позволит ускорить обработку данных или повысит точность классификации объектов [Белева, 2019]. Необходимо отметить, что для машинного обучения необходимо наличие размеченной выборки изображений или видео [Towner et al., 2020]. Получить эти данные можно только используя болидную сеть в течение существенного времени, причем, количество времени сильно зависит от климатических условий. К примеру, в Свердловской области, количество наблюдательных ночей с сентября 2019 по декабрь 2020 не превысило 15. Мы уже провели эксперименты в этой области и отладили технологию на изображениях, полученных фотометодом [Борболин, 2018; Белева, 2019]. На рис. 1 а, б приведены графики производительности алгоритма машинного зрения и нейронной сети.

Появление чувствительных, недорогих и доступных КМОП сенсоров, кодеков и одноплатных компьютеров с низким энергопотреблением привело к увеличению количества любительских наблюдательных станций, как в России, так и по всему миру [Кругликов и др., 2019]. Деятельность авторов данной работы в предыдущие годы позволила выбрать и внедрить несколько недорогих, но достаточно эффективных организационных и технических решений [Кругликов и др., 2018-2019], что дало возможность отладить методику наблюдений, определения районов падения, траекторий болидов. Активная реклама в СМИ позволила привлечь к этому виду деятельности большое количество энтузиастов – любителей астрономии, что расширило возможности сети и повысило продуктивность работы.

В частности, за последний год в кооперации с Хорватской болидной группой, благодаря активной деятельности Дмитрия Рычкова и Станислава Корот-

кого была создана значительная по площади покрытия и диапазону яркостей (метеоры до  $6^m$  – ночные болиды) наблюдательная сеть [Рычков и др., 2020]. Зона покрытия этой сети и результат работы с января по апрель 2020 года показаны на рис. 1 в, г.

Расширились возможности на Урале (рис. 1 д). Появилось три новые наблюдательные станции по образцу GMN в Челябинской области. Станции, организованные в предыдущие годы, стали использовать дополнительно автоматическую регистрацию при помощи решения на базе GMN, что открывает возможность автоматических базисных наблюдений.

Использование данных болидной сети и web-камер в описываемый период позволило определить траекторию яркого болида над Тюменью 30.01.2020 и предполагаемую зону поиска метеоритного вещества. Болид был зарегистрирован двумя камерами, установленными в г. Ирбит (рис. 1 е). Дополнительно использовались видеозаписи web-камер с открытым публичным доступом (провайдер «Интерсвязь») в Челябинске, Кургане, Озерске [www.is74.ru]. Для определения района поиска можно было применить экспертный метод, который требует значительного времени для привязки полей зрения камер по местным признакам. Это не позволило поисковым группам оперативно приступить к поиску в предполагаемом районе падения, несмотря на хорошую погоду в первые дни после явления. По этим причинам, а также из-за отсутствия в зоне поиска проезжей дороги (расстояние от дороги до зоны поиска ~ 10 км) и существенных осадков в последующие дни поиск не дал результата.

#### **Выводы**

1. Используя имеющиеся наработки, наша группа может создать прототипы самых современных автоматических наблюдательных станций;

2. Опыт использования решения хорватской болидной группы на базе Raspberry PI следует считать успешным и продолжать развитие сети с использованием этого решения с адаптацией к местным условиям;

3. Необходима дальнейшая разработка алгоритмов распознавания в целях использования их как в пунктах наблюдения, так и на сервере;

4. Имеет смысл продолжить поиск вещества болида 30.01.2020 после схода снега в конце апреля – начале мая 2020 года.

*Работа выполнена в рамках бюджетной темы «Давление», №АААА18-118020190104-3, авторы признательны коллективу Коуровской астрономической обсерватории за предоставленное оборудование.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белева Е.А. Автоматический визуальный контроль удаленных объектов с использованием нейронной сети // ВКР Бакалавра, рук. Кругликов Н.А. УрФУ: 2019, 39 с.
2. Борболин А.Д. Контроль траекторий объектов средствами автоматической системы машинного зрения // ВКР Бакалавра, рук. Кругликов Н.А. УрФУ: 2018, 68 с.
3. Кругликов Н.А., Крушинский В.В., Янковский И.С., Рычков Д.А., Борболин А.Д., Белева Е.А., Гроховский В.И., Кутков О.Е., Назаров С.В. Методические особенности наблюдения болидов с использованием специализированных сетей // X Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «Минералы: строение, свойства, методы исследования». ИГГ УрО РАН. 2019. С. 138–140.
4. Кругликов Н.А., Крушинский В.В., Гроховский В.И. Современные методики поиска и сбора внеземного вещества // Физика космоса: Тр.47-й международ. студ. науч. конф. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. С. 204–205.
5. Рычков Д.А., Короткий С.А., Вида Д. Опыт развертывания метеорной сети на Юге России // Научные труды Института Астрономии РАН. 2020. (в печати).
6. Howie R.M.; Paxman J., Bland P.A., Towner M.C., Cupak M., Sansom E.K., Devillepoix H.A.R. How to build a continental scale fireball camera network // *Experimental Astronomy*. 2017. V. 43(3). P. 237–266.
7. Kruglikov N.A., Krushinsky V.V., Nazarov S.V., Kutkov O.E., Grokhovsky V.I., Borbolin A.D., Kruglikov N.N. Towards digital Russian fireball network for meteorite recovery // *Meteoritics & Planetary Science*. 2018. V.53S. P. 6361.
8. Towner M.C., Cupak M., Deshayes J., Howie R.M., Hartig B.A.D., Paxman J., Sansom E.K., Devillepoix H.A.R., Jansen-Sturgeon T., Bland P.A. Fireball streak detection with minimal CPU processing requirements for the Desert Fireball Network data processing pipeline // *Publications of the Astronomical Society of Australia*. 2020. V. 37. e008.
9. Vida D., Mazur M., Šegon D., Zubović D., Kukič P., Parag F., and Macan A. First results of a Raspberry Pi based meteor camera system // *WGN, Journal of the International Meteor Organization*. 2018. V. 46(2). P. 71–78.
10. Vida D., Zubović D., Šegon D., Gural P., and Cupec R. Open-source meteor detection software for low-cost single-board computers // *Proceedings of the International Meteor Conference (IMC2016)*, Egmond, The Netherlands. 2016. P. 2–5.