

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БОЛИДА ПОТОКА ПЕРСЕИДЫ ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ БАЗИСНОГО ВИДЕОМОНИТОРИНГА SKYLINE

© 2022 г. К. И. Иванов^{1, *}, Е. С. Комарова¹, С. А. Язев^{1, 2}

¹ Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

*E-mail: ivorypalace@gmail.com

Поступила в редакцию 19.10.2021 г.

После доработки 01.02.2022 г.

Принята к публикации 31.03.2022 г.

Проведено детальное исследование яркого метеора, зафиксированного над горным массивом Хамар-Дабан 12.08.2020 в 14:37:35 UT двумя автоматическими станциями видеомониторинга, действующими на территории Тункинской долины (республика Бурятия) в рамках проекта SkyLine. Определены астро- и фотометрические параметры события, установлена его принадлежность к конкретному метеорному потоку, восстановлены пространственные параметры траектории с проекцией на местность. Получены сведения об основных физических характеристиках метеорной частицы, включая геоцентрическую скорость и орбитальные параметры. Проанализирован химический состав метеороида на основе спектральных данных трека. Рассмотрена потенциальная возможность использования метеорных явлений в качестве инструмента для изучения верхних слоев атмосферы.

Ключевые слова: метеор, метеороид, болид, базисные наблюдения, астрометрия, фотометрия, спектральный анализ

DOI: 10.31857/S0004629922070039

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день популярность исследований метеорных явлений не слишком высока. Объясняется это, в первую очередь, преимущественным интересом к более фундаментальным и масштабным направлениям астрономии, возросшим на фоне стремительного прогресса в области инженерных решений, лежащих в основе механизмов получения и обработки наблюдательных данных. Однако метеорная астрономия, практически исчерпавшая себя на исходе XX века ввиду технического несовершенства применявшегося оборудования и методов [1], переживает сегодня второе рождение. Высокочувствительные детекторы на базе компактных скоростных ПЗС- и КМОП-сенсоров, оснащенные широкопольными асферическими объективами сверхвысокой светосилы и находящиеся под управлением мощных ЭВМ, впервые в истории позволяют не только уверенно детектировать метеоры на обширных участках небесной сферы в широком диапазоне длин волн и режиме реального времени, но также отслеживать динамику сопутствующих процессов с временным разрешением порядка 0.01 с и выше.

Под метеором принято понимать совокупность физических явлений, сопровождающих

движение метеорной частицы (метеороида) в атмосфере небесного тела [2]. Помимо оптического, метеор является источником теплового, акустического, собственного и отраженного радиоизлучения [3]. В некоторых случаях имеет место электроакустический (так называемый электрофонный) эффект [4], присущий, как правило, метеорам ярче -4^m (болидам). Особо крупные метеороиды способны проникать в глубокие слои атмосферы и порождать яркие болиды, сопровождающиеся развитием вспышек, ударных волн и нередко оканчивающиеся выпадением метеорита [5].

Разнообразие наблюдаемых эффектов свидетельствует в пользу широкого спектра физических процессов, характеризующих метеор как атмосферное явление, развивающееся преимущественно в мезосфере [6]. С другой стороны, его источником является частица мелкой фракции реликтовой материи, входящей прежде в состав астероидов и комет [7] и недоступная для непосредственных наблюдений. Таким образом, явление метеора можно рассматривать как уникальный инструмент для решения целого ряда актуальных задач фундаментального и прикладного характера, среди которых особо стоит отметить

тему происхождения и эволюции Солнечной системы [8], исследование экзопланетных систем [9], планирование и реализацию космических миссий [10], обширный ряд вопросов в рамках концепции астероидно-кометной опасности [11], а также исследование физико-химических свойств атмосферы в диапазоне высот 80–130 км, практически недоступном для систематического изучения иными методами [12–14].

Настоящая работа посвящена результатам наблюдений отдельно взятого болида, зарегистрированного вблизи максимума потока Персеиды средствами автоматизированного комплекса Sky-Line. Определены основные астрофотометрические, физические, геометрические и географические параметры события, исследован химический состав исходного метеороида по данным спектрального анализа. Обсуждается потенциальная возможность использования метеоров в качестве инструмента исследования верхней атмосферы Земли. Кратко описывается современное состояние проекта.

2. ПРОЕКТ SKYLINE

В основу проекта положена концепция непрерывного видеомониторинга обширных участков небесной сферы с целью выявления, распознавания и регистрации транзитных явлений, частным случаем которых являются метеоры. Мониторинг выбранных областей производится параллельно с помощью двух идентичных автоматизированных наблюдательных станций, географически разнесенных на расстояние от нескольких десятков до нескольких сотен километров, что позволяет реализовать наиболее информативный на сегодняшний день метод базисных видеонаблюдений [15].

Ранее проект уже был освещен достаточно подробно [16, 17], однако к настоящему моменту серьезно модернизирован для решения более актуальных задач. В текущей конфигурации в его состав входят две наблюдательные станции, каждая из которых представляет собой полноценный самостоятельный комплекс, обеспечивающий получение и глубокий анализ данных в одностороннем режиме. Обе станции оборудованы четырьмя высокочувствительными детекторами на базе ПЗС-камеры Watec WAT-910HX, формирующей видеоряд с разрешением 768×576 точек при частоте 25 кадр/с. За построение изображения отвечает сверхсветосильный широкоугольный объектив Smartec STL-3080DC (F0.95, 6 мм), обеспечивающий поле зрения $48^\circ \times 36^\circ$ в масштабе 3.75'/пиксель. Фотометрическая глубина кадра по звездам и метеорам, достигаемая при оптимальных метеоусловиях, составляет 7^m и $4^m.5$ соответственно. Поле зрения, покрываемое

детекторами каждой установки, превышает 5000 град^2 .

Расположение наблюдательных станций подобрано с учетом благоприятных астроклиматических условий, потребной длины базиса и наличия необходимой инфраструктуры. По итогам анализа имеющихся возможностей были выбраны два пункта, удовлетворяющие всем вышперечисленным требованиям. Первый пункт расположен на территории Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН ($51^\circ 37' 18''$ с.ш., $100^\circ 55' 07''$ в.д., 2010 м), второй – в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН ($51^\circ 48' 37.5''$ с.ш., $103^\circ 04' 37.4''$ в.д., 680 м), на расстоянии 150 км от первого [18]. В целях обеспечения максимально эффективного покрытия небесной сферы поля зрения трех детекторов каждой станции ориентированы смежным образом (рис. 1). При этом области пространства, контролируемые соответствующими детекторами в обоих пунктах, максимально перекрывают друг друга, обеспечивая возможность двухсторонних синхронных регистраций. Суммарное поле зрения детекторов позволяет уверенно обнаруживать метеоры, сторающие над территорией общей площадью не менее $400\,000 \text{ км}^2$, более половины из которых – в базисном режиме. Общий объем детектируемого слоя атмосферы в диапазоне высот 80–120 км составляет около 15 млн. км^3 в одностороннем и более 6 млн. км^3 в базисном режиме. Эффективность проекта в базисном режиме достигает 55% от числа всех регистрируемых событий.

Четвертый детектор, входящий в состав каждой станции, представляет собой бесцелевой спектрограф на базе прозрачной дифракционной решетки ThorLabs GT50-08 с плотностью штрихов 830 шт/мм. Прибор покрывает общую с одним из основных детекторов область неба и служит для получения спектральных изображений метеоров ярче -1^m с разрешением около $15 \text{ \AA}/\text{пикс}$ в зависимости от условий наблюдений. Такого рода решение позволяет исследовать химический состав метеороидов в контексте их принадлежности к тем или иным потокам.

Вычислительная часть комплекса по-прежнему представлена программным пакетом японской компании Sonotaco [19] и дополнена авторским приложением SkyLine Database, разработанным на основе СУБД Microsoft Access 2010 для обеспечения удобства хранения и формирования произвольной выборки данных в любых разрезах. Автоматизированное управление системой осуществляется с помощью высокопроизводительной ЭВМ промышленного класса, разработанной компанией AdvantiX.

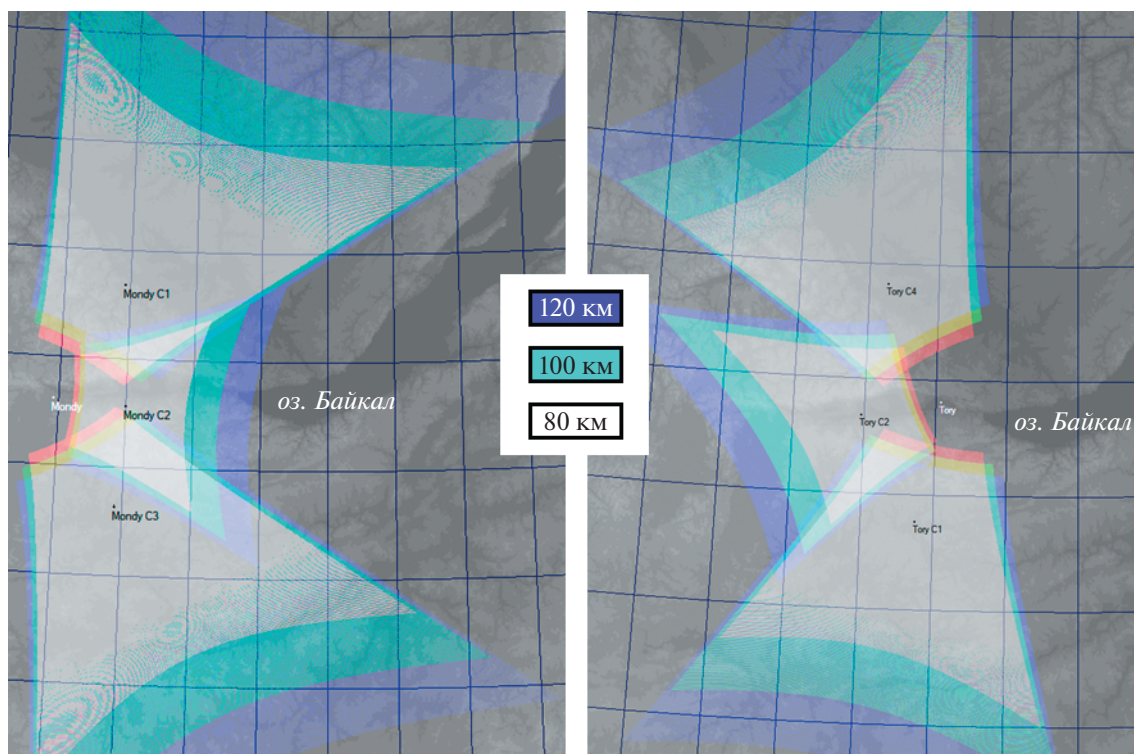


Рис. 1. Области покрытия детекторов в пунктах “SkyLine – Монды” (слева) и “SkyLine – Торы” (справа) на высотах сгорания метеоров.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ БОЛИДА PER 12.08.2020 Г. 14:37:35 UT

12 августа 2020 г. в 14:37:35 UT комплексом SkyLine был зафиксирован яркий метеор. Событие зарегистрировано в базисном режиме при хороших метеоусловиях, что позволило выполнить его подробное исследование, результатам которого посвящен данный раздел. Пиковое композитное изображение события представлено на рис. 2.

Максимальная звездная величина метеора, измеренная средствами ПО SonotaCo UFOAnalyzer 2.43 [20] для пунктов “Торы” и “Монды”, составила $-2.37^m \pm 0.27^m$ и $-2.70^m \pm 0.23^m$ соответственно. При этом абсолютная звездная величина по данным двухсторонних измерений равна $-4.03^m \pm 0.21^m$, что дает основание причислить событие к классу болидов. Расчетные координаты радианта по данным астрометрического анализа трека лежат в пределах действующего на момент регистрации метеорного потока Персеиды (рис. 3). Параметры орбиты, рассчитанные посредством ПО SonotaCo UFOOrbit 2.53 [21], соответствуют допустимому для рассматриваемого потока диапазону [22–24], графическое представление орбиты показано на рис. 4. Трехмерная модель траектории, построенная по данным анализа траектории, приведена на рис. 5. Астрофотомет-

рический анализ выполнен в автоматическом режиме на базе каталога звезд сравнения SKY2000 [25], основные результаты даны в табл. 1–3.

Технические возможности проекта SkyLine позволяют выполнять покадровую прецизионную фотометрию метеорных явлений с временным разрешением 0.04 с, обеспечивая возможность изучения характера взаимодействия метеорного тела с атмосферой как функции высоты

Таблица 1. Астрометрические параметры метеора

Координаты радианта, град	RA = 47.150585 ± 0.73 Dec = 57.470444 ± 0.71
Проекция начальной точки траектории, град	50.836044N, 102.723938E
Проекция конечной точки траектории, град	49.981411N, 101.941368E
Высота загорания, км	130.7 ± 1.72
Высота погасания, км	80.2 ± 1.75
Длина трека истинная, км	126.983 ± 1.13
Длина проекции трека, км	116.743 ± 1.21
Угловая скорость, град/с	16.377 ± 0.31
Геоцентрическая скорость, км/с	55.08 ± 1.12

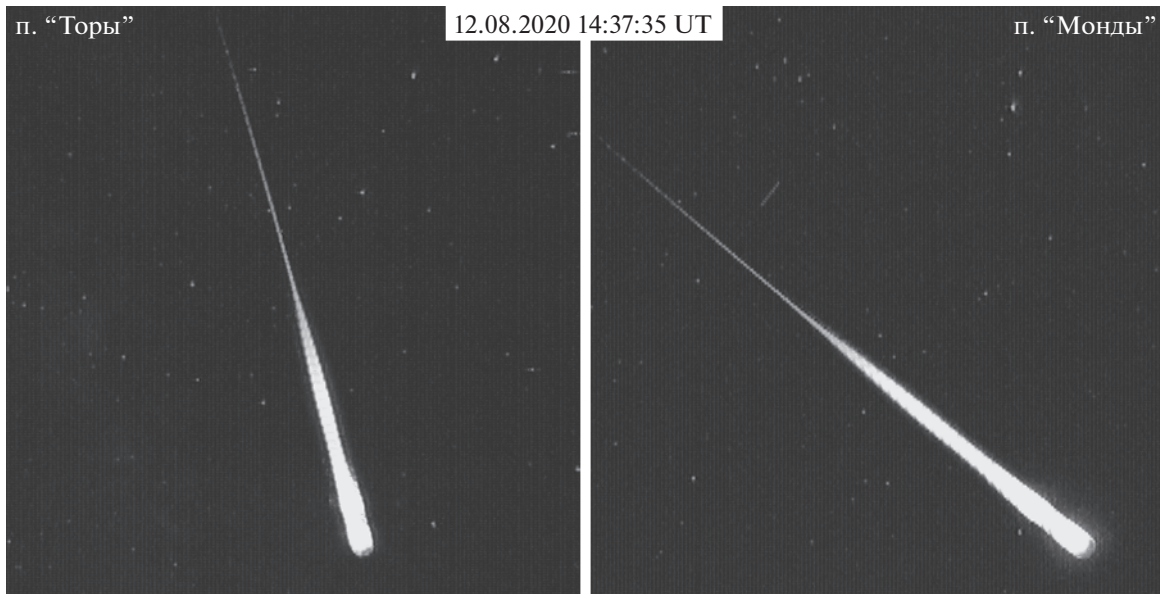


Рис. 2. Общий вид трека болида Per 12.08.2020 14:37:35 UT по данным детекторов С1 (п. “Торы”) и С4 (п. “Монды”).

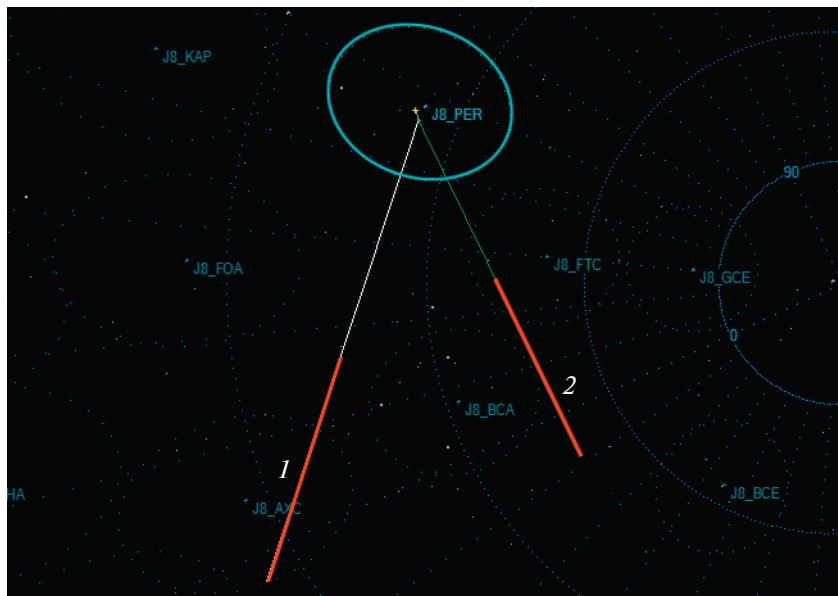


Рис. 3. Радиант болида Per 12.08.2020 14:37:35 UT, построенный по результатам базисных наблюдений для п. Монды (1) и п. Торы (2).

над уровнем моря. Результаты измерений представлены на рис. 6. Погрешность определения звездной величины составила 0.23^m и 0.27^m в

Таблица 2. Фотометрические параметры трека

Звездная величина, п. “Торы”	$-2.37^m \pm 0.27^m$
Звездная величина, п. “Монды”	$-2.70^m \pm 0.23^m$
Звездная величина абсолютная	$-4.03^m \pm 0.21^m$

пунктах “Монды” и “Торы” соответственно. Линия тренда определена полиномом 6-го порядка.

Рассматриваемый болид также был зафиксирован спектрографом на базе детектора С3 пункта “Монды”. Общий вид явления со спектром 1-го порядка представлен на рис. 7, хорошо заметны эмиссионные линии входящих в его состав химических элементов. Энергетический спектр, исправленный за функции пропускания атмосферы, дифракционной решетки и объекти-

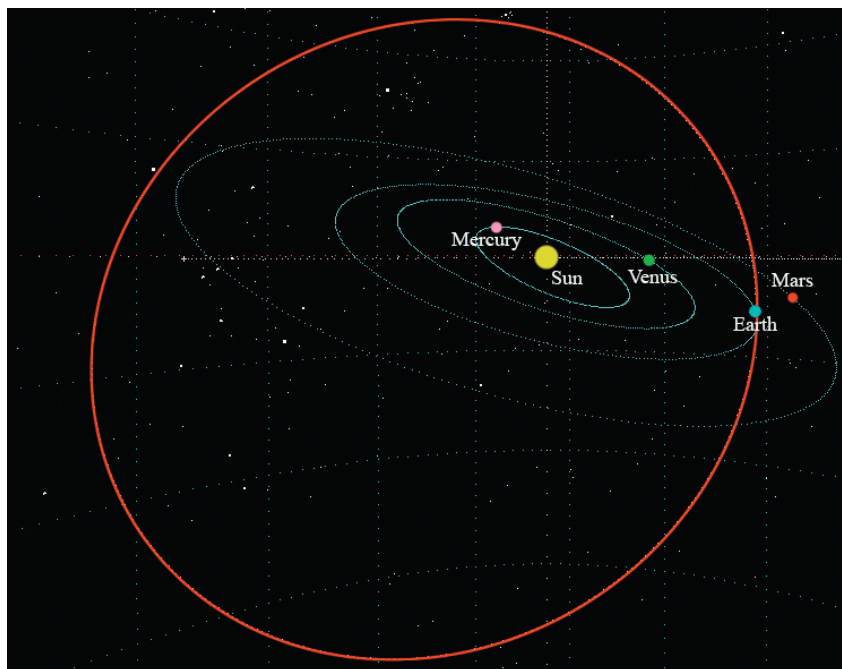


Рис. 4. Орбита метеороида Per 12.08.2020 14:37:35 UT.

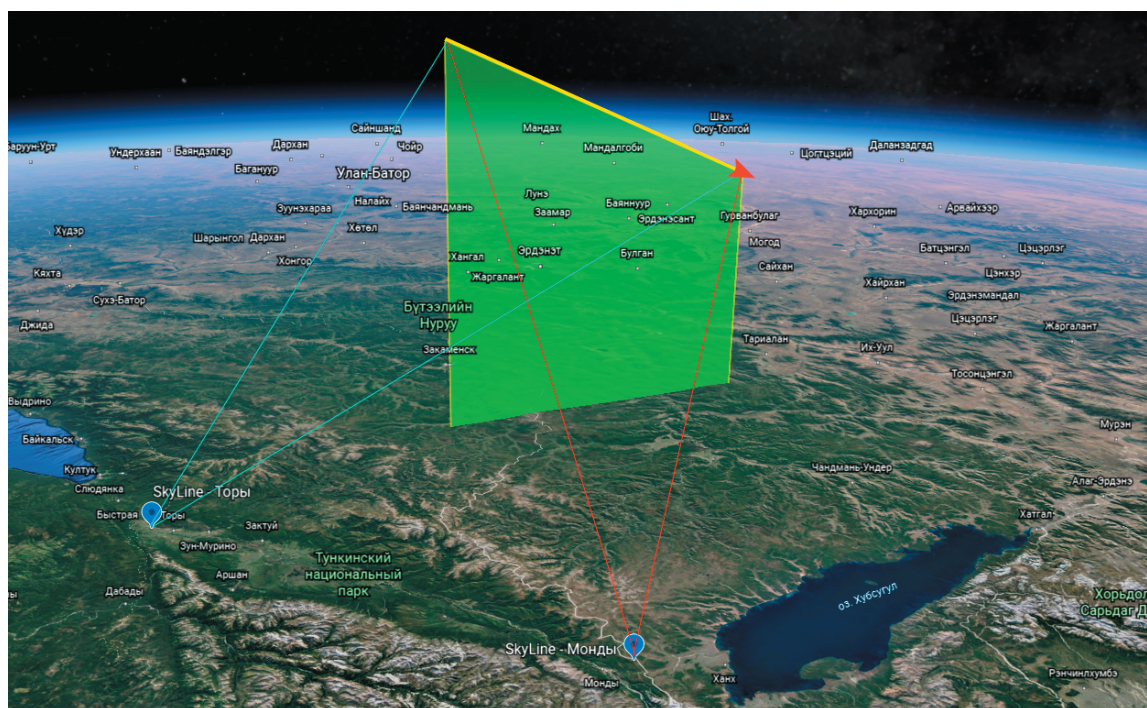


Рис. 5. Пространственная модель болида Per 12.08.2020 14:37:35 UT с проекцией на местность. Стрелкой указано направление движения метеорного тела.

Таблица 3. Орбитальные параметры метеороида

Большая полуось орбиты, а.е.	1.958 ± 0.095
Перигелийное расстояние, а.е.	0.927 ± 0.017
Эксцентриситет орбиты	0.526 ± 0.011
Орбитальный период, лет	2.741 ± 0.098
Аргумент перицентра, град	138.897 ± 0.21
Долгота восходящего узла, град	140.057 ± 0.37
Наклонение орбиты, град	109.610 ± 0.29

ва, а также функцию чувствительности сенсора, приведен на рис. 8. Обработка производилась с помощью ПО RSpec 2.0 [26], отождествление спектральных линий выполнено на основании спектральных справочных таблиц [27].

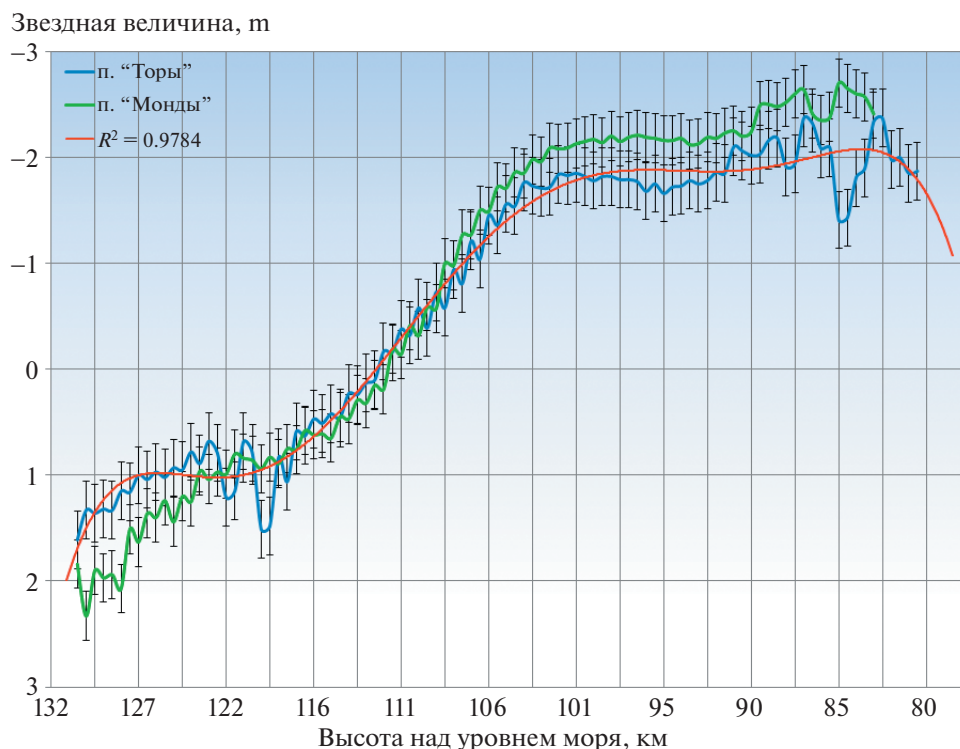
4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Согласно результатам исследования, болид Per 12.08.2020 14:37:35 UT уверенно принадлежит действовавшему на момент регистрации потоку Персеиды. Хотя расчетные орбитальные параметры метеорной частицы значительно отличаются от средних для данного потока, они все же находятся в пределах наблюдавшихся ранее значений [28]. Объясняется это, в первую очередь, значи-

тельным предполагаемым возрастом метеороидного роя Персеид, следствием которого является выраженная дисперсия кинематических параметров частиц, особенно в его афелийной части [29]. С другой стороны, орбиты крупных метеороидов, дающие начало ярким метеорам, подвержены более выраженному гравитационному воздействию иных тел Солнечной системы, что приводит к их постепенному видоизменению [30].

Реализуемый метод базисных видеонаблюдений дает возможность с высокой точностью восстанавливать пространственные параметры атмосферной траектории метеорных частиц с привязкой к местности. В рассмотренном случае метеороид, по всей видимости, полностью сгорел в верхних слоях атмосферы (см. рис. 5, табл. 1), однако более крупные тела могут выпадать в виде метеоритов вдоль известной проекции трека, что в значительной степени облегчает их поиск, а также подбор потенциальных свидетелей явления. Кроме того, анализ высот загорания и погасания метеоров потенциально может служить источником ценной информации об изменении толщины атмосферного слоя под действием различных факторов [31].

Возможность использования метеоров в качестве инструмента для исследования верхних слоев атмосферы заслуживает отдельного рассмотрения. На рис. 6 хорошо заметны три области посте-

**Рис. 6.** Кривые блеска болида Per 12.08.2020 14:37:35 UT.

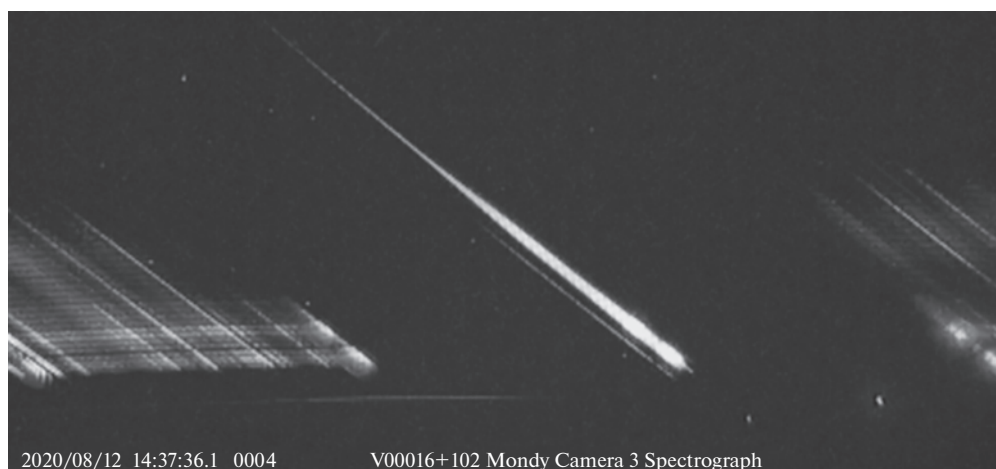


Рис. 7. Спектр болида Per 12.08.202014:37:35 UT 1-го порядка.

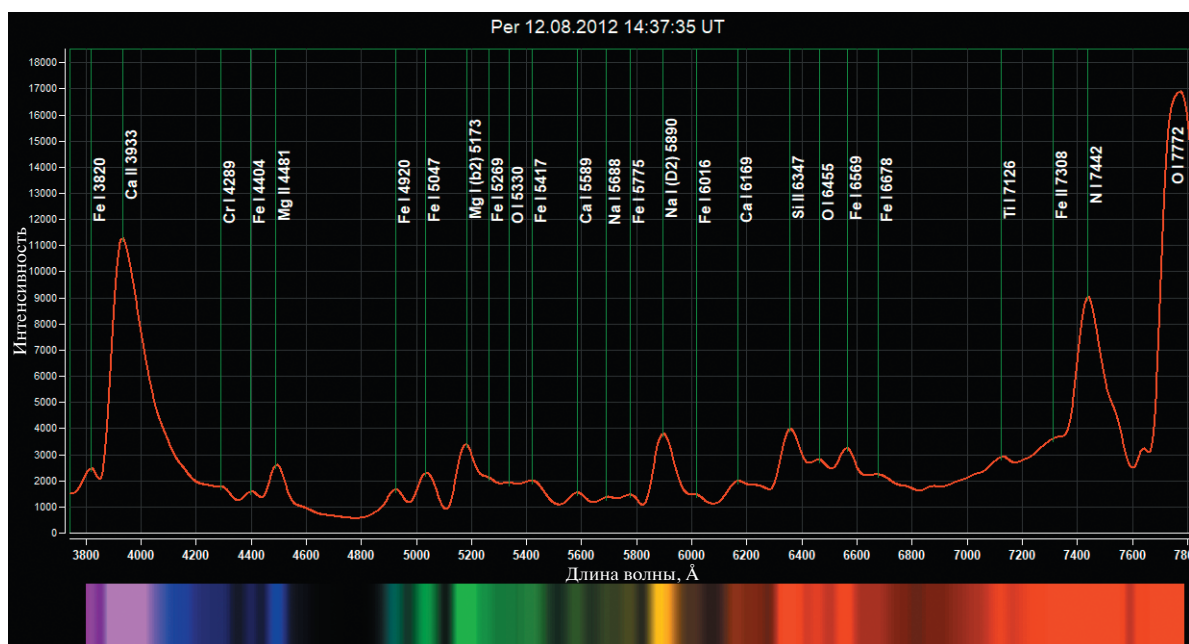


Рис. 8. Спектр болида Per 12.08.202014:37:35 UT с учетом всех необходимых поправок.

пенного увеличения яркости на высотах около 127, 98 и 83 км, в то время как на высотах 122 и 93 км наблюдается его плавное снижение. Поскольку звездная величина метеора есть функция плотности среды, сквозь которую движется порождающая его частица [1], подобное поведение может свидетельствовать о наличии в атмосфере перемежающихся слоев различной плотности на фоне ее общего возрастания по мере уменьшения высоты. Достоверная дифференциация вариаций яркости метеоров, вносимых влиянием оптиче-

ской прозрачности среды, ее плотности и химического состава, а также структурного состава порождающих их частиц, возможна при наличии достаточного количества наблюдательных данных, формирующих обширную статистику. Однако следует подчеркнуть, что четко прослеживаемая корреляция кривых блеска по данным с разных пунктов не может быть следствием местных флуктуаций прозрачности атмосферы ввиду значительной длины базиса, а также противоположной ориентации детекторов.

Уникальным отличием проекта SkyLine от многих установок подобного рода является возможность спектрографического анализа метеорных треков. Согласно рис. 8, химический состав метеорного тела достаточно прост и представлен, главным образом, железом и кальцием с включениями магния, натрия, кремния, титана и хрома. Обращает на себя внимание выраженный пик в коротковолновой части спектра, соответствующий иону Ca II 3933 Å, и, вероятно, неразрешенной линии Fe I 4005 Å, что позволяет предварительно отнести объект к классу хондритов. Умеренно выражены пики, соответствующие атомам Mg I 5173 и Na I 5890 Å, свойственные практически всем метеорам [32]. Наличие линий ионов Ca II 3933, Mg II 4481, Si II 6347 и Fe II 7308 Å в различных частях спектра может свидетельствовать в пользу значительных температур в области абляции, обусловленных высокой скоростью движения метеороида.

Наиболее мощные пики, расположенные в ближнем ИК-диапазоне, соответствуют излучению атомов атмосферного кислорода O I 7772 Å и азота N I 7442 Å. По всей видимости, данные линии никак не связаны с наличием указанных элементов в составе метеороида и возникают вследствие его взаимодействия с атмосферными газами. Таким образом, ионизационный след метеора потенциально может быть источником сведений о химическом составе верхних слоев атмосферы, который в настоящий момент является объектом пристального интереса. В частности, существует ряд работ, описывающих усиление атмосферной эмиссии в линиях различных элементов (особенно Na I, O I и OH) во время действия сильных метеорных потоков [33–38]. Также есть основания считать, что химический состав частиц отдельно взятого потока идентичен, и потому различные потоки могут преимущественно давать вклад строго определенных, конкретных элементов, прямо или косвенно определяя не только ее химический состав, но и гидродинамические характеристики [39].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена на УНУ “Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ”, поддержана Минобрнауки России (соглашение 13.УНУ.21.0007, гос. задание FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л. А. Катасев, *Исследование метеоров в атмосфере Земли фотографическим методом* (Л., 332 с., 1966).
2. В. В. Федынский, *Метеоры* (М., 112 с., 1956).

3. В. А. Бронштэн, *Метеоры, метеориты, метеороиды* (М.: Наука, 173 с., 1987).
4. И. С. Астапович, *Метеорные явления в атмосфере Земли* (М.: Физматгиз, 640 с., 1958).
5. ГОСТ 25645.112-84. *Вещество метеорное. Термины, определения и буквенные обозначения* (М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 8 с., 1984).
6. Б. Ловелл, *Метеорная астрономия* (М.: Физ.-Мат. Лит., 490 с., 1958).
7. П. Б. Бабаджанов, Ю. В. Обрубов, *Астр. вестник* **387**, 25 (1991).
8. Н. В. Куликова, А. В. Мышев, Е. А. Пивненко, *Космогония малых тел* (М.: Космосинформ, 176 с., 1993).
9. M. Ollivier, T. Encrenaz, et al., *Planetary Systems. Detection, Formation and Habitability of Extrasolar Planets* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009).
10. М. Панасюк, Л. Новиков, *Модель космоса. Том II. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов* (М.: КДУ, 1144 с., 2007).
11. Б. М. Шустов, Л. В. Рыхлова, *Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра* (М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 384 с., 2010).
12. Н. Н. Шефов, А. И. Семенов, В. Ю. Хомич, *Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики* (М.: ГЕОС, 741 с., 2006).
13. С. К. Митра, *Верхняя атмосфера* (М.: ИЛ, 640 с., 1955).
14. И. С. Астапович, *Астрон. журн.* **28**, 16 (1939).
15. П. Б. Бабаджанов, *Метеоры и их наблюдение* (М.: Наука, 92 с., 1987).
16. К. И. Иванов, Е. С. Комарова, *Известия ИГУ* **55**, 16 (2016).
17. К. И. Иванов, Е. С. Комарова, *Материалы IV Всероссийской астрономической конференции “Небо и Земля”* (ИГУ, 76 с., 2016).
18. Институт солнечно-земной физики СО РАН. URL: <http://ru.iszf.irk.ru/>
19. Sonotaco web-site. URL: http://sonotaco.com/e_index.html
20. UFO Analyser V2 Guide. URL: http://sonotaco.com/soft/download/UA2Manual_EN.pdf
21. UFO Orbit V2 Guide. URL: https://sonotaco.com/soft/UO2/UO21Manual_EN.pdf
22. P. Brown, R. J. Weryk, and D. K. Wong, J. Jones, *Icarus* **317**, 195 (2008).
23. P. Brown, D. K. Wong, R. J. Weryk, and P. Wiegert, *Icarus* **66**, 207 (2010).
24. P. Jenniskens, Q. Nénon, J. Albers, et al., *Icarus* **331**, 266 (2016).
25. SKY2000 Star Catalog. URL: <http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/sky2k.html>
26. С. Л. Мандельштам, С. М. Райский, *Таблицы спектральных линий* (М., 345 с., 1938).
27. Rspec web site. URL: <http://rspec-astro.com>
28. T. J. Jopek, G. B. Valsecchi, and Cl. Froeschle, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **751**, 304 (1999).

29. *D. Vida*, Electronic Thesis and Dissertation Repository 6944 (2020).
30. *G. B. Valsecchi, T. J. Jopek, and Cl. Froeschle*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **743**, 304 (1999).
31. *P. Koten, P. Spurny, J. Borovicka, et al.*, Meteoritics & Planetary Science **1305**, 41 (2006).
32. *S. Abe, N. Ebizuka, H. Murayama, et al.*, Earth, Moon and Planets **265**, 95 (2004).
33. *J. Ma, X. Xue, X. Dou, et al.*, J. Geophys. Res.: Space Phys. **7614**, 124 (2019).
34. *M. Gadsten*, Atmospheric terrestrial physics **51**, 30 (1968).
35. *Н. Н. Шефов*, Полярные сияния и свечения ночного неба **21**, 18 (1970).
36. *Л. М. Фишкова* *Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли* (Тбилиси: МЕЦНИЕРЕБА, 271 с., 1983).
37. *Л. М. Фишкова, К. Д. Квавадзе*, Геомагнетизм и аэрономия **858**, 27 (1987).
38. *N. Brosch and O. Shemmer*, Earth, Moon and Planets **535**, 82 (2000).
39. *Е. С. Комарова, А. В. Михалев*, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса **277**, 11 (2014).