

## ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертационную работу

Казариной Юлии Андреевны

**“Исследование структуры радиоизлучения каскадного ливня от космических лучей высоких энергий в Тункинском эксперименте”**,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальностям: 01.04.03 - радиофизика, 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертационная работа Ю.А. Казариной связана с изучением характеристик космических лучей (КЛ) галактического и внегалактического происхождения в энергетическом диапазоне  $10^{16}$ - $10^{19}$  эВ, посвящена исследованию возможностей детектирования продуктов взаимодействия первичных космических лучей высоких энергий с атмосферой Земли и выполнена в рамках основного научного направления ИГУ “Исследование фундаментальных проблем гамма-астрономии, астрофизики элементарных частиц, физики околоземного пространства, гео- и радиофизики”.

Одним из продуктов взаимодействия космических лучей с земной атмосферой являются широкие атмосферные ливни (ШАЛ). Наиболее известным методом исследования КЛ является метод регистрации черенковского оптического излучения ШАЛ. Данный метод в целом позволяет определять характеристики отдельного ливня. Однако детектирование космических лучей посредством наблюдений черенковского оптического излучения имеет ряд ограничений. Наиболее существенное из них заключается в том, что оптические измерения ШАЛ возможны только в ночное время суток с удовлетворительными погодными условиями и фазой Луны и не обеспечивают достаточной статистики. Поэтому в последнее время для детектирования космических лучей высоких энергий, наряду с оптическим излучением, мировая научная общественность обратила пристальное внимание на радиоизлучение ШАЛ, заметное не только ночью, но и днем, а также в ненастную погоду.

Являясь аспирантом кафедры радиофизики и радиоэлектроники ИГУ и, одновременно, активным участником международной коллаборации Tunka-Rex, Ю.А. Казарина провела обширные экспериментальные исследования на астрофизическом полигоне ИГУ в Тункинской долине (республика Бурятия), где развернута измерительная система для регистрации радиоизлучения ШАЛ в частотном диапазоне 30-80 МГц. Измерения проводились совместно установкой Тунка-133, которая регистрирует черенковское излучение, генерируемое теми же атмосферными ливнями. Совместные измерения радиоизлучения и черенковского света позволили Ю.А. Казариной осуществить энергетическую кросс-калибровку этих двух калориметрических методов.

Для интерпретации результатов измерений структуры ШАЛ Ю.А. Казарина использовала электродинамическую модель исследуемого объекта. Для изучения особенностей формирования пространственно-временного распределения радиоизлучения ШАЛ требовался большой объем математического моделирования радиоизлучения в метровом диапазоне длин волн для широкого спектра энергий первичных космических лучей. Для расчета радиоизлучения вторичных частиц в настоящее время наиболее развит микроскопический подход с использованием схемы Монте-Карло (разновидности кода REAS, Технологический институт, Карлсруэ, Германия). Данный подход является существенно затратным по времени и требовал использования современных суперкомпьютеров. Полученная в 2014/2015 учебном году стипендия Президента РФ для обучения за рубежом в институте Карлсруэ позволила Ю.А. Казариной не только выполнить математическое моделирование результатов измерений характеристик радиоизлучения ШАЛ, но и приобрести большой опыт решения сложных вычислительных задач.

В ходе выполнения диссертационной работы Ю.А. Казарина провела анализ шумовой обстановки в месте расположения эксперимента Tunka-Rex и показала возможность исследования космических лучей с энергетическим порогом 10 ТэВ путем детектирования радиоизлучения ШАЛ в частотном диапазоне 30-80 МГц. Провела исследование влияния расположения антенн на прием радиосигнала ШАЛ. Разработала оригинальную методику выделения радиосигналов ШАЛ из экспериментальных данных, полученных на установке Tunka-Rex, что позволило ей обнаружить асимметрию зарегистрированных событий в направлении север-юг, подтверждающей геомагнитный механизм генерации радиоизлучения ШАЛ. Ю.А. Казарина предложила методики восстановления основных характеристик первичной космической частицы по данным о пространственной и временной структуре радиовсплесков от ШАЛ. Эти методики обеспечивают точность восстановления энергии первичной частицы 20 % и глубины максимума ливня  $50 \text{ г / см}^2$ , что соответствует возможностям ведущих мировых экспериментов по регистрации космических лучей и подтверждает перспективность установки Tunka-Rex.

Практическая и научная значимость диссертации заключается в том, что полученные Ю.А. Казариной результаты будут использоваться для дальнейших исследований при совместной работе установки Tunka-Rex и сцинтилляционной установки Tunka-Grande, что в значительной степени позволит увеличить статистику при регистрации космических лучей высоких энергий и провести поиск гамма – квантов высоких энергий. Разработанные методики восстановления параметров ШАЛ в Тункинском эксперименте могут быть использованы для анализа данных действующих и будущих радиоустановок.

Достоверность выводов, полученных в диссертации, обеспечивается адекватным использованием математического аппарата, совпадением аналитических результатов в предельных частных случаях с известными из литературы. Данные измерений на установке Tunka-Rex не противоречат результатам других экспериментов, регистрирующих радиоизлучение ШАЛ.

Как исследователь, Ю.А. Казарина отличается добросовестностью, инициативностью и самостоятельностью, имеет основательную теоретическую подготовку, хорошо владеет современными методами численной обработки экспериментальных данных.

В целом результаты, полученные Ю.А. Казариной, достаточно полно отражены в ее публикациях и были доложены на Всероссийских и Международных научных конференциях и семинарах. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Считаю, что подготовленная диссертационная работа представляет законченное научное исследование и полностью отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Ю.А. Казарина заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03. – радиопизика, 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

Научный руководитель  
профессор кафедры радиопизики  
и радиоэлектроники ИГУ,  
д.ф.-м.н., профессор  
nta@api.isu.ru



Н.Т. Афанасьев

