

**Best way to start joint work is to prepare joint papers.**

Planned titles of the TEPA reports (to be converted to journal publications) progressed from the discussions in Bern, January 29-February 1 (based also on the project working plan, see below).

1. On the feedback mode of the RREA: theory and experiment (start Feb. 2018, responsible Dolgonosov);
2. First results from Aragats Interferometer (start July 2018, responsible Soghomonyan and Kiselyov);
3. Cross correlated results of the RREA simulations with GEANT4 and CORSIKA codes: influence on EAS and ACT experiments (Start: March 2018, responsible Dolgonosov, Zelenij, Zazyan and Vanyan);
4. Characteristics of the intracloud electric fields inferred from the dynamics of energy spectra of electron and gamma ray species of TGEs (Start: March 2018, responsible Davidenko);
5. Catalog of TGE events detected on Aragats in 2017 (Start Feb. 2018, responsible Chilingarian);
6. Temporal-energetic structure of the Long Lasting Low Energy TGEs observed on Aragats (Start Feb. 2018, responsible Chilingarian);
7. Emergence of regions of strong electric field (stochastic?) in thundercloud cells: particle fluxes and lightning flashes (Start, Feb. 2018, responsible Iudin).
8. Signatures of VHF and (VLF/LF, 3-300 kHz) emission associated with TGE;
9. Possible links between the generation of TGEs and active lightning streamer dynamics;
10. Optical emission of TGEs.

**План работы на 2018 год и ожидаемые результаты по**

проекту

№ 17-12-01439<sup>[1-1]</sup><sub>SEP</sub> «Комплексные исследования источников высокоэнергичных частиц и мощного УКВ излучения в электрически активной атмосфере на основе наземных и спутниковых наблюдений»

### 3.1. План работы на 2018 год

*(в том числе указываются запланированные командировки по проекту), до 5 стр.*

План работ на 2018 год полностью соответствует общему плану работ, представленному в пункте 4.7. заявки. Некоторые уточнения и незначительные изменения планируемых работ обусловлены как собственными результатами авторского коллектива проекта в подотчётный период, так и результатами активности основных мировых научных конкурентов. За период с 2016 по 2017 годы вопросы взаимного влияния потоков энергичных частиц, молниевой активности и всплесков мощного УКВ излучения в атмосфере Земли, а также вопросы, связанные с механизмом их формирования, превратились в ключевую проблему на стыке атмосферного электричества и космической физики околоземного пространства. Молния и грозовые тучи рассматриваются сегодня как естественные ускорители частиц и гигантские источники гамма-излучения. Предварительная интерпретация измерений потоков и энергетических спектров электронов и гамма-лучей, выполненных, в том числе, в рамках настоящего проекта на высокогорных станциях в Арагаце, говорит о ключевой роли инициируемых космическими лучами лавин релятивистских убегающих электронов (RREA) в формировании наземных грозовых превышений (TGE). Кроме того, до недавнего времени считалось, что именно RREA лежат в основе механизма инициации молниевых разряда. Однако вопросы описания свойств и происхождения затравочных электронов RREA и механизма инициации молниевых разрядов в настоящее время остаются во многом открытыми. В этой связи, с одной стороны, необходим детальный анализ ускорения энергичных частиц различного происхождения в стохастическом электрическом поле грозового облака. С другой стороны, согласно результатам недавних исследований плотность электронов, создаваемая RREA, слишком мала для развития молнии, и научное сообщество в настоящее время возвращается к идее традиционного пробоя, развивающегося в виде положительной стримерной системы с поверхности гидрометеора. В свою очередь, всплеск интереса к стримерным разрядам

привёл к обсуждению новых механизмов инициирования как кратковременных вспышек гамма-излучения, зарегистрированных спутниками (TGF), так и длительных последовательностей гамма-вспышек регистрируемых на уровне земли (TGE). Таким образом, вопросы формирования потоков энергичных частиц и излучений и развития молниевых разрядов в грозовом облаке оказываются тесно связанными. На решение этих вопросов будет направлена дальнейшая работа по настоящему проекту. С учётом сказанного план работ на 2018 год выглядит следующим образом. 1. Подготовка и проведение синхронной с измерениями потоков высокоэнергичных частиц и гамма-излучения широкополосной регистрации электромагнитного излучения грозовой активности в условиях высокогорных станций в Арагаце с использованием, созданного в рамках проекта мобильного УКВ интерферометра. Проведение корреляционного анализа широких атмосферных и облачных ливней энергичных частиц. Проведение работ по улучшению точности широкополосной интерферометрии грозового облака за счёт улучшения программного кода обработки синхронных записей с разнесенных широкополосных антенн. Работы по улучшению характеристик программного кода планируется вести в следующих направлениях: разработка дополнительных критериев оценки точности получаемых данных, улучшение алгоритмов фильтрации шума, регистрация многих событий с малым временным разбросом.

2. Изготовление и установка на высокогорных станциях в Арагаце блоков многоканальной «быстрой» электроники. В рамках проекта на высокогорной станции в Арагаце проводится корреляционный анализ потоков частиц и молний, что предъявляет дополнительные требования к временному разрешению и синхронизации детекторов частиц, датчиков поверхностного электрического поля и регистраторов радиоволн от атмосферных разрядов. Разработанная концепция и детальная структура блока многоканальной «быстрой» электроники решает эти проблемы. В 2018 году для проведения исследований быстрых физических процессов, таких как распространение лидера молнии и соответствующего радиоизлучения, точность синхронизации зарегистрированных удаленных событий будет доведена до нескольких десятков наносекунд. С этой целью система блоков многоканальной «быстрой» электроники (DAQ) будет оснащена GPS приемниками. Еще одной целью использования DAQ в 2018 году является регистрация широких атмосферных ливней (EAS) - гигантских каскадов частиц, распространяющихся в атмосфере со скоростью, достигающей

**Проект No 17-12-01439/2017 Страница 23 из 29**

скорости света. При этом уровень энерговыделения от проходящих частиц в теле пластических сцинтилляторов будет давать дополнительную

информацию о типе частиц и их энергии. Калибровку амплитудно-цифровых преобразователей (АЦП) планируется проводить с помощью изотопов в области низких энергий и с хорошо известными энергетическими спектрами в области высоких энергий.

3. Моделирование наземных грозových превышений с помощью кодов GEANT4 и CORSIKA; анализ формирования TGE в рамках модели разряда с релятивистской обратной связью. Планируется разработать стохастическую модель инициирования TGE, основанную на идее суперпозиции слабого внешнего поля со стохастическим полем заряженных гидрометеоров. Будет показано, что суперпозиция даже слабого внешнего поля со стохастическим полем гораздо эффективнее ускоряет электроны, чем более сильное постоянное поле без шума. Кроме того, в модель будет инкорпорирован авторский сценарий инициирования молниевых разрядов, обусловленный присутствием стохастического поля заряженных гидрометеоров. Будет показано, что отрыв электронов от отрицательных ионов, возникающих на первой стадии сценария, может быть источником электронов затравки, особенно при низких электрических полях. Развитие реакторной модели образования TGF и TGE (модель RL-TGE) с учётом транспорта электронов и позитронов между элементарными ячейками, а также образования нейтронов в фотоядерных реакциях и временного распределения частиц образовавшихся в элементарной ячейке. Расширить возможности модели RL-TGE включением данных других моделей, учитывающих нестационарность электрического поля, влияние ионизации ячеек на величину поля, диффузию электрического заряда и образование микроразрядов. Проведение сравнительного анализа результатов рассчитанных на основе реакторной модели со следующими экспериментальными данными: энергетическим, угловыми и временными спектрами гамма-квантов, электронов и нейтронов измеряемых на высокогорных станциях в Арагаце, энергетическими спектрами гамма-квантов с орбитального гамма-телескопа GBM FERMI, координатами и интенсивностью микроразрядов, определяемых мобильным УКВ интерферометром. Моделирование взаимодействия TGF с конструктивными элементами обшивки спутниковых обсерваторий и фюзеляжей самолетов, используемых при исследовании гамма-излучения грозových облаков, для объяснения особенностей измеренного спектра. Моделирование распространения низко-энергичных электронов в электрическом поле в программе COMSOL Multiphysics.

4. Исследование влияния асимметрии свойств положительных и отрицательных стримерных разрядов на предварительной стадии CID на свойства развитых биполярных стримерных структур и характеристики излучения на основной стадии компактного разряда; сопоставление спутниковых данных и результатов расчётов всплеска высокочастотного

излучения компактных разрядов. Построение модели положительных и отрицательных стримерных разрядов на предварительной стадии компактных внутриоблачных разрядов (CID) с учётом асимметрии развития стримеров разной полярности, проявляющейся в том, что поле инициации отрицательных стримеров вдвое превышает соответствующее поле для положительных стримеров, при этом заметно отличаются и поля распространения. Ожидается, что асимметрия развития стримерных разрядов разной полярности окажет существенное влияние на свойства высокочастотного излучения CID. Анализ выявленных особенностей, а также сопоставление спутниковых данных и результатов модельных расчётов всплесков высокочастотного излучения компактных разрядов [5]. Анализ крупномасштабной пространственной электрической структуры грозовых и электрифицированных облаков на высокогорных станциях в Арагаце на основе их широкополосного электромагнитного излучения и данных измерений пространственно-разнесённых датчиков электростатического поля. Проведение исследования крупномасштабной электрической структуры грозовых облаков по данным наземных измерений квазиэлектростатического и электромагнитного полей и результатам радарного зондирования. Радарные данные, помимо поперечного размера и высоты верхней границы грозового облака, позволяют определить положение сравнительно тонкой области наибольшей концентрации крупных частиц, как правило соответствующей наибольшей плотности электрического заряда, и число конвективных ячеек, связанное с общей структурой конвекции. Важную информацию об электрической структуре облака предполагается получить на основе анализа данных УКВ интерферометра с учётом специфики высокочастотного излучения разрядов разной полярности, что позволит определить высоты областей положительного и отрицательного пространственного заряда. Для количественной оценки электрического поля грозового облака предполагается создать его численную электродинамическую модель, учитывающую геометрию облака и возмущение электрической проводимости внутри облака, роль источника в которой играет распределённый ток разделения зарядов силами неэлектрической природы. Неизвестные параметры модельного облака можно оценить путём сопоставления модельных расчётов с данными сети пространственно-разнесённых распределённых датчиков квазиэлектростатического поля. Помимо крупномасштабной квазистатической электрической структуры грозового облака, значительный интерес с точки зрения динамики энергичных частиц представляет средне- и мелкомасштабные возмущения электрического поля и плотности заряда, обусловленные электрическими разрядами. Развитие разрядов различного масштаба предполагается описывать в рамках развиваемой участниками проекта фрактально-диссипативной модели, позволяющей для заданной структуры

крупномасштабного

## Проект No 17-12-01439/2017 Страница 24 из 29

поля рассчитать пространственно-временную структуру тока разряда и соответствующее электромагнитное излучение. При этом особый интерес представляет мелкомасштабная разрядная активность, обеспечивающая эффективный крупномасштабный перенос электрического заряда в подпороговых электрических полях.<sup>[1]</sup>6. Формирование совместной базы измерений потоков энергичных частиц, широкополосного электромагнитного и квазистатического полей, а также метеорологических параметров атмосферы при наземных грозовых превышениях в условиях высокогорных станций на Арагаце.

7. Подготовка публикаций и годового отчета.

Запланированные по проекту командировки, связанные с представлением результатов проекта: Япония, 17 - 22 июня 2018, два члена коллектива (the 16th International<sup>[1]</sup>Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2018) in Nara Japan)

### 3.2. Ожидаемые в конце 2018 года конкретные научные результаты

*(форма изложения должна дать возможность провести экспертизу результатов и оценить степень выполнения заявленного в проекте плана работы), до 5 стр.<sup>[1]</sup>1.* Осуществлено развитие и повышение точности широкополосной интерферометрии грозового облака за счёт улучшения программного кода обработки синхронных записей с разнесенных широкополосных антенн. Проведено расширение базы данных непрерывных наблюдений потоков энергичных частиц и гамма-квантов, квазистатического электрического поля грозовых облаков и метеорологических параметров атмосферы результатами синхронных измерений широкополосного электромагнитного излучения грозового облака.

2. С использованием системы блоков многоканальной «быстрой» электроники (DAQ) осуществлена регистрация широких атмосферных ливней (EAS) - гигантских каскадов частиц, распространяющихся в атмосфере со скоростью, достигающей скорости света.<sup>[1]</sup>3. Разработана стохастическая модель инициирования TGE, основанная на идее суперпозиции слабого внешнего поля со стохастическим полем заряженных гидрометеоров. Построенная модель включает авторский сценарий инициирования молниевых разрядов, обусловленный присутствием стохастического поля заряженных гидрометеоров. 4. Построена модель положительных и отрицательных стримерных разрядов на предварительной

стадии компактного разряда на основе вероятностного подхода с учётом асимметрии развития стримерных разрядов разной полярности. Осуществлена интерпретация различных типов временной структуры зарегистрированных всплесков высокочастотного излучения. Определены параметры фрактальной модели компактного разряда, при которых мощность и спектр расчётного высокочастотного излучения соответствует данным наблюдений на спутнике «Чибис-М». 5. Разработана модель крупномасштабной пространственной электрической структуры грозовых и электрифицированных облаков на высокогорных станциях в Арагаце на основе результатов радарного зондирования, данных УКВ интерферометра и наземных измерений квазиэлектростатического поля в пространственно-разнесённых точках. Проведена оценка возмущения внутриоблачного электрического поля и плотности заряда при развитии электрических разрядов разного типа, анализ влияния мелкомасштабной разрядной активности на формирование крупномасштабной электрической структуры грозового облака.

6. Сформирована совместная база данных, включающая результаты измерений потоков энергичных частиц, широкополосного электромагнитного и квазистатического поля, возникающих при наземных грозовых превышениях в условиях высокогорных станций на Арагаце. Полученные на этапе 2018 года результаты позволят ответить на ряд ключевых вопросов современной теории атмосферного электричества, в частности значительно продвинуться в создании адекватных моделей широкого класса разрядных явлений в грозовых облаках и в выяснении их связи с высокоэнергичными процессами в атмосфере. Кроме того, полученные в ходе реализации проекта результаты могут оказаться важными с точки зрения предсказания условий возникновения и свойств опасных (в частности, для воздушных судов) всплесков сверхмощного высокочастотного излучения в диапазоне до нескольких сотен мегагерц, на порядок величины превышающих по амплитуде соответствующее излучение от обычных разрядов облако-земля.