

СВЕРЖДАЮ  
ЯУ МИФИ

Стриханов

М.П.

## ПРОГРАММА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА БАЗЕ УНУ «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НЕВОД» НА 2014-2015 ГОДЫ

### 1. Цель Программы

Целью Программы является получение новых знаний в следующих областях исследований:

- физика высоких энергий, включая космические лучи сверх- и ультравысоких энергий;
- прогнозирование состояния окружающей среды, в том числе атмосферы и магнитосферы Земли и физических процессов в них, на основе изучения космических объектов (Солнце, гелиосфера) и протекающих в них активных процессов.

### 2. Задачи исследований, решаемые Программой

#### 2.1. Конкретные научные проблемы, решаемые в ходе выполнения Программы

Исследования в рамках Программы направлены на решение двух актуальных проблем, связанных с исследованием и использованием космических лучей различных энергий.

Первая проблема связана с происхождением, распространением и взаимодействием космических лучей, в первую очередь в области сверх- и ультравысоких энергий. Проблема имеет междисциплинарный характер, так как в ней объединились физика макромира и физика микромира. Это направление в мировой науке получило название Astroparticle Physics. Важной частью этой проблемы являются энергетический спектр и массовый состав космических лучей во всем наблюдаемом интервале энергий от 10 ГэВ до 10 ЭэВ.

Вторая проблема связана с использованием космических лучей, в основном не очень больших энергий (до 100 ГэВ), для исследования ближайшего астрофизического объекта – Солнца – и окружающей его гелиосферы, активные процессы в которых существенно влияют на состояние магнитосферы и атмосферы Земли. Поэтому исследования по этой проблеме имеют как фундаментальный, так и прикладной аспекты.

#### 2.2. Современное состояние проблем

Исследования, направленные на решение первой проблемы, ведутся более 50 лет. Были созданы крупномасштабные установки, предназначенные для исследования космических лучей сверх- ( $> 10^{15}$  эВ) и ультра- ( $> 10^{18}$  эВ) высоких энергий (ШАЛ-МГУ, KASCADE-Grande, Якутск, AGASA), которые работали на сцинтилляционных детекторах. В последние годы стала широко применяться регистрация флуоресцентного и черенковского излучений ШАЛ (HiRes, Тунка, TA, Auger). Основным недостатком перечисленных установок является сравнительно узкий динамический диапазон измеряемых энергий и отсутствие взаимных кросс-калибровок, что приводит к различию в энергетических шкалах и может быть причиной сильных различий между спектрами, полученными на основе данных разных установок. Очень серьезные разногласия имеются и в результатах оценки массового состава космических лучей, которые часто противоречат друг другу. В последние годы возникла еще одна проблема – так называемая мюонная загадка ('muon puzzle'), суть которой состоит в наблюдении избытка групп мюонов в ШАЛ по сравнению с модельными расчетами даже для чисто железного

состава КЛ, а также в появлении избытка мюонов с энергиями выше 100 ТэВ.

Исследования в промежуточной области энергетического спектра ( $10^{11} - 10^{15}$  эВ) космических лучей на установках, расположенных на поверхности Земли, в последнее время развиваются не столь интенсивно, т.к. в этой области энергий проводятся спутниковые и баллонные эксперименты, которые обладают определенными преимуществами, связанными с отсутствием необходимости учитывать влияние атмосферы на регистрируемый поток частиц. Однако эти эксперименты обладают и серьезными недостатками, обусловленными весовыми ограничениями на аппаратуру, что приводит к существенным ограничениям ее возможностей как по площади детекторов, так и по точности измерений (например, использование тонких калориметров). К тому же большинство экспериментов проводится в достаточно короткие периоды времени.

Таким образом, несмотря на огромные усилия, данная проблема не только не была решена, но и пополнилась новыми задачами, которые связаны с самой методикой исследований. Дело в том, что исследования характеристик потока космических лучей сверх- и ультравысоких энергий могут проводиться только по результатам их взаимодействия с атмосферой Земли. Поэтому без решения задачи разделения изменений, вызванных космофизическими и ядернофизическими причинами, решить проблему невозможно.

Исследования в рамках второй проблемы направлены как на получение новых знаний о ближайшем к нам астрофизическом объекте, так и на решение задачи раннего обнаружения геоэффективных процессов в гелиосфере, вызванных солнечной активностью, которые могут вызвать потенциально опасные явления в магнитосфере и атмосфере Земли. Эта проблема также имеет комплексный характер. Для ее решения задействован целый арсенал средств наземного и космического базирования. Основным недостатком большинства спутниковых детекторов является то, что они могут регистрировать гелиосферные возмущения лишь на расстояниях  $\sim 1$  млн. км от Земли, что существенно ограничивает время для принятия каких-либо решений.

Для наблюдений за состоянием атмосферы используются контактные (аэрологическое зондирование, наблюдения на метеорологических мачтах и башнях, самолетах, привязных аэростатах и т.п.) и дистанционные (акустические, лидарные, радиолокационные, спутниковые) методы. Основным недостатком контактных методов, влияющим на точность выводов о состоянии воздушного бассейна, является фрагментарность данных во времени и в пространстве. К тому же многие наземные станции наблюдения в России и странах СНГ закрыты, а на существующих значительно уменьшилась эффективность работы.

Исследования космических лучей, характеристики потока которых могут сильно меняться при прохождении через гелиосферу, магнитосферу и атмосферу Земли, дают возможность дистанционно изучать изменения в этих средах и использовать полученную информацию для разработки методов раннего обнаружения геоэффективных процессов. В основном для решения этих задач используются нейтронные мониторы и мюонные телескопы. Мюоны по сравнению с нейтронами имеют два преимущества: во-первых, они генерируются первичными частицами более высоких энергий, чем нейтроны, а во-вторых, сохраняют направление движения первичной частицы, что открывает возможность проследивать перемещения возмущений в пространстве.

К настоящему времени накоплен обширный материал по исследованию гелиосферных, магнитосферных и атмосферных процессов и явлений различными методами, однако их прогностический потенциал находится на довольно низком уровне.

### 2.3. Актуальность и значимость планируемых исследований.

Экспериментальный комплекс НЕВОД является единственным, который может обеспечить регистрацию ШАЛ практически во всей области сверхвысоких энергий от  $10^{15}$  до  $10^{19}$  эВ. По данным многочисленных экспериментов, основанных на регистрации ШАЛ, в спектре ядер первичного космического излучения (ПКИ) наблюдается излом (увеличение показателя наклона спектра на 0.3 – 0.5) при энергиях вблизи 3 ПэВ (на ядро). Современные модели потока ПКИ (т.н. poly-gonato) и гипотезы

ускорения космических лучей (механизм ускорения в остатках сверхновых) предполагают, что такая форма спектра всех частиц ПКИ является результатом суперпозиции спектров разных групп ядер с гораздо более резким изломом (либо даже экспоненциальным обрезанием) при одинаковой магнитной жесткости частиц около 2 – 3 ПВ. В этом случае спектр первичных нуклонов (протонов и нуклонов, «упакованных» в ядра) должен иметь столь же яркую особенность, которая должна проявиться и в спектре мюонов. Регистрация каскадных ливней по их черенковскому излучению – один из основных методов исследования характеристик потока высокоэнергичных мюонов и нейтрино космических лучей в нейтринных телескопах (IceCube, ANATARES, HT200). В то же время, при больших объемах этих установок, определяющих потенциально высокую статистическую обеспеченность результатов, регистрирующие системы подводных (подледных) нейтринных телескопов представляют собой весьма редкую решетку измерительных модулей (с расстояниями десятки – сотни метров, много больше характерных размеров ливня), что приводит к неизбежности использования различного рода моделей при интерпретации отклика детекторов. Как правило, каскадные ливни рассматриваются в точечном приближении, что может приводить к существенным методическим неопределенностям в оценке параметров ливня. Благодаря наличию плотной решетки измерительных модулей, НЕВОД, при его несравнимо меньшем объеме (но, тем не менее, достаточном для изучения каскадов от мюонов в диапазоне энергий 10 ГэВ – 10 ТэВ), является единственным в мире ЧВД, позволяющим измерять полную каскадную кривую и все основные характеристики ливней по их черенковскому излучению.

Актуальность планируемых исследований в области мюонной диагностики атмосферы определяется существующей проблемой надежного прогнозирования развития потенциально-опасных атмосферных процессов естественного и техногенного происхождения с целью снижения рисков для населения и промышленной инфраструктуры. Динамика подобных катаклизмов, в условиях изменения климата и погодных условий, приобретает в последние годы угрожающий характер. Причем катастрофические явления начинают происходить и в ранее спокойных районах. Основным фактором, влияющим на точность выводов и предсказаний, является отсутствие методов наблюдений, способных одновременно контролировать состояние воздушного бассейна по всему разрезу от приземных слоев до тропопаузы, а также на достаточно больших расстояниях от центра наблюдения. Поэтому разработка новых подходов к непрерывному мониторингу атмосферы, включая тесную интеграцию известных методов и средств (радарные измерения, мюонная диагностика, глобальная система метеонаблюдений), обеспечивающих заблаговременное обнаружение потенциально-опасных локальных атмосферных возмущений, является важной и актуальной научно-технической задачей.

#### 2.4. Методы, подходы и способы решения проблемы

Для исследования в области энергий  $10^{15}$  –  $10^{19}$  эВ будут использоваться группы мюонов наклонных ШАЛ, регистрируемых координатным детектором ДЕКОР и ЧВД НЕВОД. С этой целью будет использоваться метод спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ), разработанный ранее сотрудниками лаборатории. Эффективная площадь собирания событий с группами мюонов быстро увеличивается с ростом зенитного угла и вблизи горизонта достигает нескольких квадратных километров, что позволяет исследовать область ультравысоких энергий. В ряде экспериментов был обнаружен избыток многомюонных событий при высоких энергиях первичных частиц. Ключом к решению проблемы этого избытка является измерение энерговыделений мюонов в веществе детектора. В экспериментальном комплексе НЕВОД подготовлен и начат такой эксперимент. Недавняя модернизация измерительных систем НЕВОД и расширение динамического диапазона измерений до  $10^5$  ф.э. для каждого ФЭУ позволяет использовать ЧВД НЕВОД в качестве калориметра. Предполагается провести экспериментальное исследование энерговыделений в широком диапазоне энергий первичных частиц и их сопоставление с расчетами, выполненными в различных

предположениях о моделях взаимодействия адронов. Отклонения от ожидаемой зависимости будут свидетельствовать об изменении характера взаимодействия и включении новых процессов, а одновременное измерение характеристик групп при разных зенитных углах позволит установить энергетическую область, где эти отклонения появляются.

Область энергий  $10^{11} - 10^{15}$  эВ для наземных экспериментов является переходной от регистрации одиночных частиц к регистрации различных компонент ШАЛ. Точную границу такого перехода указать сложно из-за больших флуктуаций в адронных взаимодействиях и, как следствие, в развитии ШАЛ. Оценить область энергий, при которых на поверхности Земли практически исчезает адронная компонента космических лучей, позволит совместная работа установок СКТ, ПРИЗМА, НЕВОД. В установке ПРИЗМА используется новый и уникальный подход к регистрации адронной компоненты ШАЛ – по тепловым нейтронам. Данная установка способна регистрировать также и электронно-фотонную компоненту ливней, но при этом порог регистрации достаточно высокий – около  $10^{15}$  эВ (по энергии первичных частиц). Для снижения порога регистрации установки ПРИЗМА (вплоть до  $10^{13}$  эВ) предполагается использовать триггер от СКТ. Проведение этих работ позволит также приобрести необходимый опыт для включения детектора УРАН, первая очередь которого будет запущена в 2015 году, в единую триггерную систему экспериментального комплекса. Наличие амплитудного анализа сигналов с каждого детектора СКТ дает возможность использовать установку для регистрации ШАЛ в диапазоне плотностей от  $\sim 1$  до  $\sim 500$  частиц/м<sup>2</sup>. Применительно к установке СКТ будет развит известный метод спектров локальной плотности заряженных частиц ливней для оценки эффективных энергий первичных ядер космических лучей, соответствующих различным интервалам локальной плотности. Проверкой метода спектров локальной плотности зарегистрированных СКТ частиц будет его сопоставление в перекрывающейся области энергий  $\sim 10^{15}$  эВ со стандартным методом восстановления параметров ШАЛ по данным установки ПРИЗМА, а в среднесрочной перспективе – с данными детектора НЕВОД-ШАЛ, центральная часть которого будет введена в эксплуатацию во второй половине 2015 года. Так как в этой области энергий проводятся баллонные и спутниковые эксперименты, то сопоставление их результатов с полученными данными позволит провести проверку корректности процедур измерений и обработки, что обеспечит надежный переход к исследованиям на этих установках в области выше  $10^{15}$  эВ, где прямые измерения на больших высотах отсутствуют.

Для изучения характеристик потока космических лучей в промежуточной области энергий первичных частиц (100 ГэВ – 100 ТэВ) будет проводиться анализ каскадных ливней, образованных в результате взаимодействий мюонов в водном объеме ЧВД НЕВОД. На первом этапе предполагается исследовать характеристики каскадов в событиях с известным положением оси (в которых трек мюона, проходящего вдоль бассейна, восстанавливается по данным СМ ДЕКОР, расположенных в противоположных коротких галереях). Такой отбор использовался нами в предварительных исследованиях, основанных на статистическом материале первой серии эксперимента, в результате которых были впервые измерены средние каскадные кривые в черенковском свете и измерен энергетический спектр каскадных ливней, образованных мюонами в воде, в интервале энергий 10 – 1000 ГэВ. Хотя, вследствие относительно малой светосилы (около 0.4 кв. м ср) такая выборка событий не позволяет достичь существенно более высоких энергий каскадов, она позволяет надежно исследовать пространственную картину отклика ЧВД на каскадные ливни, и результаты этого анализа могут служить надежной методической основой дальнейшей работы. На втором этапе планируется разработка методики отбора и восстановления параметров каскадов (положение оси, направление, энергия) по данным ЧВД (независимо от прохождения мюона через другие детекторы комплекса – ДЕКОР и СКТ). Это позволит на 2 порядка увеличить геометрический фактор собирания событий, и, соответственно, статистическую обеспеченность результатов для каскадов высоких энергий (вплоть до 10 ТэВ). Разрабатываемая методика будет апробироваться на результатах моделирования отклика ЧВД с помощью пакета Geant4 и на выборке событий с известным положением трека (мюоны, прошедшие через

супермодули ДЕКОР). Подобная методика может стать основой для будущего применения в больших ЧВД, где независимая оценка положения каскада отсутствует.

Исследования в области низких энергий до  $10^{11}$  эВ будут проводиться с использованием созданного в НИЯУ МИФИ мюонного годоскопа УРАГАН, который позволяет выделять мюоны различных энергий, изменяя зенитный угол регистрируемых частиц. Для проверки корректности измерения спектра мюонов будут использованы данные по абсолютной интенсивности потока мюонов при различных энергиях, получаемые на комплексе НЕВОД-ДЕКОР. Опыт таких измерений имеется, но важно провести их в тот же период времени, что и на мюонном годоскопе, так как энергетический спектр мюонов в области малых энергий существенно зависит от уровня солнечной активности. Отметим, что длительных исследований изменений энергетического спектра мюонов в течение солнечного цикла практически нет, есть лишь разрозненные данные по интегральной интенсивности. Для изучения влияния гелиосферных возмущений и активных атмосферных процессов локального характера на вариации потока космических лучей на поверхности Земли будет использоваться новый метод изучения околоземного пространства – метод мюонной диагностики, основанный на проникающей способности мюонов, поток которых формируется в атмосфере на высотах 15 – 20 км и чувствителен к различным термодинамическим процессам как естественного, так и техногенного происхождения. Одновременная регистрация потока мюонов с различных направлений позволяет получать полную картину состояния верхних слоев атмосферы и проследивать динамику ее изменения, в частности, выявлять возмущенные области, определять направления и скорости перемещения и оценивать время их появления в заданной точке. Важно подчеркнуть, что данный подход обеспечивает сплошное зондирование атмосферы над территорией ~ 30 тыс. кв. км, а наличие такой информации существенно повышает надежность предсказаний скорости и направления движения зарегистрированных возмущений. Метод мюонной диагностики является всепогодным и безопасным для окружающей среды. Важным преимуществом метода является возможность исследовать характерные волновые процессы (внутренние гравитационные волны, ВГВ), генератором которых выступают мощные турбулентные явления, в том числе и потенциально-опасного характера (грозы, бури, торнадо, ураганы и т.п.). Данный метод также чувствителен к процессам, приводящим к резким изменениям плотности воздуха, но без явных внешних проявлений (зоны локальной турбулентности ясного неба).

Для проведения исследований мюонный годоскоп УРАГАН будет дополнен антенным комплексом «Алиса» для приема информации с метеоспутников. Эти данные несут важную информацию об атмосфере и будут использоваться как базис для развития принципиально новых методов исследования динамики атмосферы в режиме реального времени. Для измерения метеопараметров в точке расположения мюонного годоскопа будут использоваться данные автоматизированной метеостанции Vaisala.

## 2.5. Имеющийся задел

Экспериментальный комплекс НЕВОД функционирует с 1994 года. Он постоянно модернизируется и расширяется. Соответственно изменяется и расширяется круг решаемых задач и проводимых исследований. Для их обеспечения было разработано множество программных продуктов и методик измерений. К настоящему времени создана стройная система проведения экспериментов, обеспечения надежной работы аппаратуры, непрерывного контроля ее функционирования и экспресс-анализа экспериментальных данных. Создан целый ряд вычислительных программ для анализа экспериментальных данных, которые достаточно легко могут быть адаптированы к требованиям, выдвигаемым новыми задачами. В коллективе НОЦ НЕВОД хорошо освоены известные программы CORSIKA и Geant4 и имеется опыт их применения для расчетов как развития ливней в атмосфере, так и откликов различных детекторов. Все получаемые экспериментальные данные, подготовленные для физического анализа, хранятся на сервере, который через локальную вычислительную сеть доступен всем сотрудникам НОЦ НЕВОД. Из полученных ранее физических результатов можно отметить следующие:

- измерена абсолютная интенсивность потока мюонов в широком интервале зенитных углов для пороговых энергий от 1,5 до 7 ГэВ;
- измерен альбедный (из-под горизонта) поток мюонов с энергией выше 7 ГэВ;
- предложен и развит метод спектров локальной плотности мюонов, позволяющий исследовать характеристики космических лучей в диапазоне энергий  $10^{15} - 10^{19}$  эВ;
- получено указание на увеличение наклона спектра первичных частиц при энергиях порядка  $10^{17}$  эВ («второе колено»);
- обнаружен избыток групп мюонов, растущий с энергией первичных частиц;
- впервые экспериментально исследовано влияние геомагнитного поля на интенсивность групп мюонов на поверхности Земли;
- предсказан и экспериментально выделен эффект компланарности треков мюонов в группах в плоскости, определяемый осью ШАЛ и вектором силы Лоренца;
- предложен и развит новый подход к интерпретации результатов исследований космических лучей при энергиях выше «излома».

Основные научные результаты в области использования мюонной компоненты космических лучей как средства изучения атмосферы и околоземного пространства были получены при исследовании различных солнечных и гелиосферных событий (солнечные вспышки, форбуш-понижения, события GLE и т.д.). Несколько новых результатов было получено при исследовании атмосферных явлений (грозы и ураганов). В частности, было показано, что мощные атмосферные явления (ураган в Дубне 20 июня 2005 года, снежный ураган в Москве 7 декабря 2009 года и др.) сопровождаются генерацией т.н. внутренних гравитационных волн в атмосфере, которые могут регистрироваться по изменению потока мюонов за несколько часов на расстояниях до  $\sim 100$  км. Наличие уникальной аппаратуры (мюонные годоскопы) и оригинальные подходы к обработке получаемых данных (по мюонным матрицам) позволили коллективу исполнителей занять лидирующие позиции в мире по развитию метода мюонной диагностики атмосферы Земли и околоземного пространства. На разработанные подходы и методики были получены патенты:

- №2406919 «Способ и устройство для получения мюонографий»,
- №2461903 «Способ калибровки мюонных годоскопов»,
- №2446495 «Способ обнаружения гелиосферных возмущений»,
- №110531 «Устройство для измерения вариаций плотности атмосферы».

Метод мюонной диагностики атмосферных и внеатмосферных явлений был разработан на основе экспериментальных данных, полученных с помощью не имеющего аналогов мюонного годоскопа УРАГАН. Были разработаны физические основы мюонной диагностики процессов в гелиосфере, выявлены предикторы мощных магнитных бурь на основе анализа анизотропии пространственно-угловых вариаций потока мюонов, регистрируемого на поверхности Земли в годоскопическом режиме.

## 2.6. Ожидаемые результаты исследований

В области высоких энергий ( $10^{11} - 10^{19}$  эВ):

- Будет измерено энерговыделение групп мюонов, регистрируемых в широком интервале зенитных углов и множественностей частиц, которые соответствуют интервалу первичных энергий  $10^{15} - 10^{19}$  эВ.
- Будет получен спектр локальной плотности заряженных частиц по данным системы калибровочных телескопов в области энергий  $10^{13} - 10^{15}$  эВ.
- Будут получены характеристики ПКЛ в диапазоне энергий  $10^{13} - 10^{16}$  эВ на основе данных одновременной регистрации нейтронной и электронно-фотонной компонент ШАЛ с помощью детектора нейтронов УРАН и установок СКТ и НЕВОД-ШАЛ.
- Будет измерен энергетический спектр каскадных ливней, генерируемых мюонами космических лучей в черенковском водном детекторе с плотной пространственной решеткой квазисферических измерительных модулей, в широком интервале энергий от 10 ГэВ до 10 ТэВ.
- Будут измерены сезонные вариации интенсивности групп мюонов в наклонных ШАЛ по данным НЕВОД-ДЕКОР.
- Будут проанализированы феноменологические характеристики событий,



регистрируемых ЧВД совместно с детекторами ДЕКОР и СКТ, для обеспечения абсолютной калибровки откликов КСМ.

В области энергий до  $10^{11}$  эВ:

- Будут получены данные по пространственно-временным вариациям потока мюонов космических лучей во время различных гелиосферных и атмосферных возмущений за 2014-2015 гг.
- Будут получены экспериментальные данные об изменениях энергетического спектра мюонов в 2014-2015 гг., которые будут объединены с накопленными ранее данными за 2007-2013 гг., что позволит исследовать изменения энергетического спектра мюонов на разных фазах цикла солнечной активности.
- Будут получены уникальные данные одновременных исследований атмосферных процессов на МГ УРАГАН и доплеровском метеорологическом радиолокаторе за 2014-2015 гг. и разработаны методы совместного анализа мюонографий, полученных с помощью мюонного годоскопа, и карт радиолокатора.
- Будут исследованы возможности различных методов и алгоритмов идентификации геоактивных солнечных процессов средствами мюонной диагностики.
- Будет разработан метод выделения потока мюонов с направления от Солнца по данным мюонного годоскопа УРАГАН и изучены механизмы формирования вариаций потока мюонов во время мощных вспышек.

## 2.7. Научная новизна и значимость результатов исследований

Впервые исследования космических лучей в широком интервале энергий будут проведены в рамках единого подхода на одном экспериментальном комплексе, обеспечивающем возможность регистрации одних и тех же событий различными детекторами, и будут получены уникальные экспериментальные данные по различным компонентам космических лучей.

Впервые с хорошей статистической и методической точностью будет измерено энерговыделение мюонной компоненты ШАЛ в интервале энергий  $10^{15} - 10^{19}$  эВ и будут проверены модели адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях.

Впервые область  $10^{14} - 10^{16}$  эВ будет исследована четырьмя различными детекторами, что позволит устранить многие неопределенности, связанные с переходом от исследования одиночных частиц к регистрации ШАЛ, и впервые будет получен энергетический спектр ШАЛ по нейтронной компоненте.

Будут разработаны методы восстановления характеристик каскадных ливней, применение которых в черенковских детекторах большого объема (IceCube, ANTARES, Байкал) позволит впервые измерить энергетический спектр и угловое распределения мюонов в области сверхвысоких энергий (более 100 ТэВ).

Полный набор ожидаемых экспериментальных результатов позволит либо оценить вклад ядерно-физических процессов в формирование наблюдаемых особенностей в результатах исследований КЛ, в том числе решить «мюонную загадку», либо оценить необходимую статистическую точность для решения этой задачи в будущих экспериментах.

В целом, ожидаемые результаты соответствуют мировому уровню исследований космических лучей, а в некоторых отношениях (по широте энергетических интервалов, по кросс-калибровке различных детекторов и методов) превосходят их.

С практической точки зрения интерес представляют методы и результаты исследования влияния гелиосферных возмущений на энергетический спектр космических лучей, которые могут быть использованы для прогнозирования геоэффективных возмущений и их влияния на магнитосферу Земли. Планируемые результаты являются пионерскими и будут играть важную роль для дальнейшего развития методов изучения высокоэнергичных процессов на Солнце.

Впервые будут проведены комплексные исследования активных атмосферных процессов с использованием уникальных данных мюонного годоскопа и современных прогностических моделей атмосферы, результаты которых будут соответствовать

мировому уровню и позволят качественно улучшить существующие методы прогнозирования развития потенциально-опасных явлений в атмосфере и, соответственно, уменьшить риски от их воздействия на жизнедеятельность человека.

### 3. Перечень выполняемых и планируемых к выполнению научно-исследовательских работ в 2014-2015 годах

№ п/п	Наименование и краткое содержание работы	Ожидаемые результаты выполнения работы	Сроки проведения исследований
1.	Исследование космических лучей в широком диапазоне энергий 10 ГэВ - 10 ЭэВ	<p>1. Будут проведены исследования космических лучей в широком интервале энергий в рамках единого подхода на одном экспериментальном комплексе.</p> <p>2. Будет измерено с хорошей статистической и методической точностью энергосодержание мюонной компоненты ШАЛ в интервале энергий <math>10^{15}</math> – <math>10^{19}</math> эВ.</p> <p>3. Будут проверены модели адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях.</p> <p>4. Будет исследована область <math>10^{13}</math> – <math>10^{16}</math> эВ четырьмя различными детекторами, что позволит устранить многие неопределенности, связанные с переходом от исследования одиночных частиц к регистрации ШАЛ.</p> <p>5. Будет измерен энергетический спектр каскадных ливней, генерируемых в черенковском водном детекторе с плотной решеткой измерительных модулей в интервале энергий от 10 ГэВ до 10 ТэВ.</p>	Планируется в 2014 – 2016 гг.
2.	Развитие метода заблаговременной идентификации геоэффективных возмущений в межпланетной среде	<p>1. Будут проведены измерения пространственно-временных вариаций потока мюонов космических лучей.</p> <p>2. Будет разработан метод идентификации геоактивных солнечных процессов на основе наблюдения пространственно-временных вариаций потока космических лучей, вызываемых прохождением солнечной плазмы через межпланетное пространство.</p> <p>3. Будут исследованы возможности различных методов и алгоритмов идентификации геоактивных солнечных процессов методом мюонной диагностики.</p> <p>4. Будет проведен поиск и проверка предикторов геоактивных солнечных</p>	01.01.2011 – 30.11.2015



		процессов различного уровня и их отображение в режиме реального времени.	
3.	Исследование и прогнозирование развития атмосферных процессов на основе мюонной диагностики и современных прогностических моделей атмосферы	<p>1. Будут получены уникальные данные одновременных исследований атмосферных процессов на основе измерений на МГ УРАГАН и доплеровском метеорологическом радиолокаторе за период 2014 – 2016 гг.</p> <p>2. Будут разработаны методы совместной обработки имеющейся совокупности данных, в том числе мюонографий годоскопа и карт доплеровского метеорологического радиолокатора.</p> <p>3. Будут разработаны методы прогнозирования развития потенциально-опасных атмосферных явлений.</p> <p>4. Будет проведена оценка прогностического потенциала разработанных методов и подходов.</p>	Планируется в 2014 – 2016 гг.

#### 4. Контроль за реализацией Программы

Контроль будет осуществляться в рамках существующего порядка выполнения работ в коллективе УНУ НЕВОД, который включает в себя:

- Ежемесячное планирование работ каждого сотрудника. Месячные планы рассматриваются и утверждаются НТС НОЦ НЕВОД.
- Еженедельные оперативки, на которых рассматривается ход выполнения работ, выясняются причины невыполнения или отставания работ от плана и намечаются необходимые меры.
- По итогам месяца каждый сотрудник пишет краткий отчет и свои предложения по плану работ на следующий месяц.
- Отчеты и планы анализируются руководителями направлений и обсуждаются с руководителем УНУ.

Окончательные отчеты рассматриваются на расширенных заседаниях НТС (на которых, как правило, присутствуют практически все сотрудники). В протоколах заседания отмечаются выполненные работы и работы, отстающие от графика, формулируются важнейшие задачи на следующий месяц.

При выявлении каких-либо проблем в выполнении планов оперативно собираются рабочие совещания с участием заинтересованных лиц.

По итогам выполнения работ по проекту (или по этапу) готовится соответствующий отчет, который рассматривается и утверждается НТС НИЯУ МИФИ.

#### 5. Результаты реализации Программы, оценка ее эффективности

Важнейшим фундаментальным результатом будет измерение энергосвечения мюонной компоненты ШАЛ для различных диапазонов зенитных углов и множественности мюонов. Этот результат будет получен впервые в мире и явится основой для планирования дальнейших исследований по решению "мюонной загадки" как на УНУ НЕВОД, так и в других экспериментах.

В области энергий  $10^{13} - 10^{15}$  эВ впервые будет получен энергетический спектр ШАЛ методом локальной плотности электронов на ливневой установке с малым расстоянием между детекторами.

В области энергий  $10^{11} - 10^{13}$  эВ впервые будут получены каскадные кривые ливней,

генерируемых мюонами в черенковском водном детекторе с плотной пространственной решеткой измерительных модулей, и восстановлен энергетический спектр мюонов в этой области энергий. Ценность этого результата обусловлена тем, что во всех крупнейших черенковских детекторах, работающих в воде (Байкал, ANTARES) или во льду (IceCube), используется точечное приближение для оценки энергий каскадных ливней.

В области энергии меньше  $10^{11}$  эВ важнейшие результаты будут относиться к закономерностям связей различных процессов солнечной активности с вариациями пространственно-угловых характеристик потока мюонов. Эти данные крайне необходимы для выделения геоэффективных солнечных событий и разработки методов их раннего обнаружения в гелиосфере.

С прикладной точки зрения важным результатом будет дальнейшее развитие методов мюонной диагностики гелиосферных, магнитосферных и атмосферных процессов и явлений и повышения их прогностического потенциала.

О высокой эффективности ожидаемых результатов свидетельствует то обстоятельство, что все они будут получены на детекторах относительно небольших размеров, но являющихся конкурентоспособными с крупномасштабными установками (для исследования ШАЛ) и даже с мировыми сетями (например, нейтронных мониторов).