

# Сфера над Антарктидой

Кандидат технических наук  
**Д.В. Чернов**



Летит себе спокойно из глубин Вселенной частица с огромной энергией, и ежели ее изловить — очень многое об этой Вселенной узнать можно. Но частица та — одна-одинешенька, и вероятность того, что она попадет в детектор, такова, что нули на странице не поместятся. Что делать?



ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

## Как заметить редкие частицы

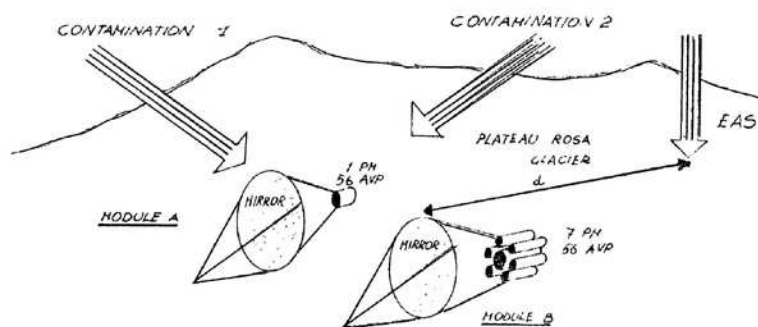
В 1911—1912 годах австрийский физик Виктор Гесс, используя ионизационную камеру и аэростаты, которые дали ему военные, установил, что значение фоновой радиации в атмосфере растет с увеличением высоты. Так были открыты космические лучи; их исследование принесло Гессу в 1936 году Нобелевскую премию по физике.

Энергетический спектр космических лучей — распределение числа частиц в зависимости от их энергии — простирается от  $10^6$  до  $10^{20}$  эВ и выше, где импульс одной частицы сравним с импульсом летящей хоккейной шайбы. Если бы такая частица попала в человека, то, скорее всего, он получил бы серьезную дозу облучения от всего того, во что она превратилась и что породила. Энергия  $10^{20}$  эВ — уже вполне макроскопическая энергия — наперсток воды она нагрела бы на несколько градусов. Однако опасность получить по голове такой «шайбой» даже в космосе ничтожна, так как интенсивность самых высокоэнергичных космических лучей составляет около одной частицы на один квадратный километр за 100 лет. Спектр космических лучей — сильно падающий, с десятикратным ростом энергии частиц интенсивность потока уменьшается в 1000 раз. Кроме того, до поверхности Земли такая частица долететь не может, в верхних слоях атмосферы она неизбежно столкнется с молекулами воздуха. Земная атмосфера — естественный щит, примерно как сталь толщиной более метра.

Из-за малой интенсивности космических лучей наблюдать их напрямую — проблема. Для области энергий ниже  $10^{15}$  эВ

космические лучи относительно хорошо изучены, поскольку размеры установок для ловли частиц сравнительно невелики. Детекторы поднимали на аэростатах и космических аппаратах, данные по спектру и составу космических лучей, полученные на этих установках, хорошо согласуются с теоретическими моделями происхождения и распространения частиц в межзвездной среде. В области высоких энергий ситуация иная. Эти космические лучи регистрируют уже около 30 лет, но до сих пор неясно, что заставляет частицы набирать такую чудовищную энергию. Причем для исследования диапазона выше  $10^{15}$  эВ возможно применение лишь косвенных методов. По сути, современные установки способны регистрировать только след от вспышки быстро «сгорающей» в атмосфере первичной частицы.

При столкновении частицы с атомами газов атмосферы происходит ядерная реакция, которая порождает расходящийся каскад вторичных частиц — так называемый широкий атмосферный ливень (ШАЛ). Он состоит из адронов, мюонов, электронов и гамма-квантов и трех видов излучения: Вавилова — Черенкова, флуоресцентного света, который возникает при возбуждении молекул воздуха частицами ШАЛ, и радиоизлучения. Изучая компоненты ШАЛ, можно довольно много узнать о первичных частицах. Особый интерес представляет диапазон энергий  $10^{18}$ — $10^{20}$  эВ; сейчас в этом диапазоне работает несколько больших наземных экспериментальных установок в Аргентине, США и России. Самая большая — Pierre Auger Observatory в Аргентине — состоит из 1600 детекторов заряженных частиц на площади 3000 км<sup>2</sup> и четырех станций флуоресцентных оптических детекторов. Детекторы заряжен-



1  
Схема эксперимента Джанни Наварры в Альпах на высоте 3500 м. Рисунок из оригинальной статьи 1981 года. На рисунке показаны сферические зеркала, направленные на ледник, и блоки детекторов, расположенные в фокусе зеркал. CONTAMINATION — световой фон от звезд, EAS — широкий атмосферный ливень

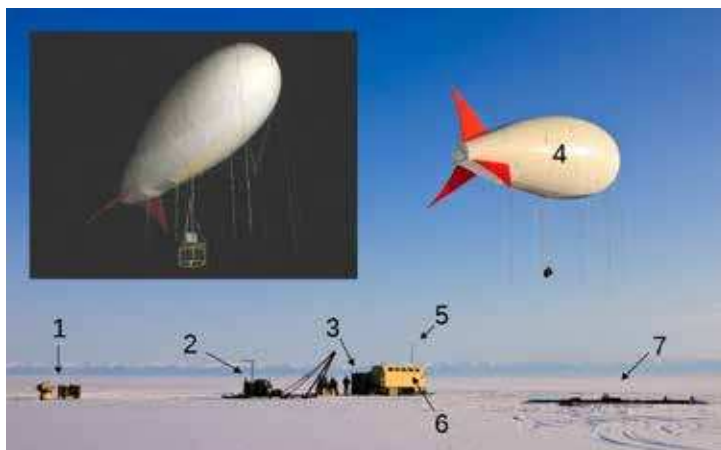
ных частиц позволяют зарегистрировать те немногие из них, которые доходят до поверхности Земли, а флуоресцентные детекторы — соответствующее излучение. Детекторы заряженных частиц работают круглосуточно, оптические детекторы — только в ясные и безлунные ночи, но зато они дают более точную информацию об энергии и типе первичной частицы.

Можно вынести систему наблюдения в космос и обозревать атмосферу и ШАЛ с расстояния, например, в 400 км. В этом случае площадь регистрации увеличивается в 50—250 раз по сравнению с Pierre Auger Observatory. Но для этого нужно вывести на орбиту телескоп, сопоставимый по размерам с телескопом Хаббла. Есть, однако, промежуточное решение — и не наземное, и не космическое.

## Откуда возникла «Сфера»

В середине 60-х годов прошлого века академик А.Е.Чудаков из ФИАНа выдвинул идею о возможности регистрации отраженного от заснеженной поверхности излучения Вавилова — Черенкова — того самого, которое порождает ШАЛ при сверхвысоких энергиях частиц. Регистрируя полный поток этого излучения, можно восстановить наименее зависимое от теоретических моделей — а значит, и наиболее точное — значение энергии первичной частицы. В отличие от наземных установок, которые измеряют плотность излучения в отдельных точках на поверхности, можно будет регистрировать величину светового потока, пропорциональную энергии первичной частицы, напрямую, с минимальными методическими погрешностями. Изображение

2  
Пробный запуск аэростата с эквивалентной нагрузкой для регулировки угла атаки аэростата и ночной запуск в марте 2013 года на озере Байкал. Оборудование стартовой площадки: 1 — кабель питания (1 км) и резервный генератор (он очень шумный); 2 — лебедка; 3 — ящик с установкой «Сфера-2»; 4 — аэростат БАПА, 250 м<sup>3</sup>; 5 — антенна доступа в Интернет; 6 — центр управления; 7 — направляющая система для троса



вспышки излучения на снегу — световое пятно диаметром несколько сотен метров с относительно ярким центром. Это пятно настолько слабое, что даже приборы могут заметить его только в безлунные ночи. Поэтому все измерения должны были проводиться именно в таких условиях.

Для регистрации вспышек А.Е.Чудаков предложил установить на борту самолета два фотоэлектронных умножителя (ФЭУ) и два расположенных рядом электронно-оптических преобразователя (ЭОП) с одинаковыми углами зрения 45°. Все приборы должны были обозревать одну и ту же область заснеженной поверхности Земли с высоты порядка 10 км. Использование двух пар детекторов в режиме работы «на совпадении» должно надежно исключать помехи. Одновременное срабатывание двух ФЭУ включало два фотоаппарата, установленных на ЭОПах. Последующая обработка снимков должна была дать информацию об энергии и направлении прихода первичной частицы.

Реализовать эту идею тогда не удалось, и первый подобный эксперимент сделал в 1970—1980 годах ученик А.Е.Чудакова, итальянский ученый Джанни Наварра, однако не на самолете. Эксперимент проводился в Альпах на высоте 3500 м над уровнем моря, оптические детекторы располагались на расстоянии 1000 м от ледника и осматривали область с радиусом 30 м (рис. 1). Наварра получил интегральный спектр энергий первичных космических частиц, в котором интенсивность событий соответствовала ожидаемой.

Однако дальше эта работа не развивалась. Тему продолжила в России группа под руководством доктора физико-математических наук Р.А.Антонова (МГУ). Он предложил использовать в качестве фотоприемника мозаику из 19 ФЭУ, установленную в фокусе сферического зеркала, а измерительную аппаратуру поднимать на аэростате. Так как основной оптический элемент установки — сферическое зеркало, проекту дали название «Сфера». В начале 90-х годов в горах Тянь-Шаня на высокогорной станции ФИАНа был повторен эксперимент Наварры. Со склона горы прототип установки осматривал заснеженную поверхность застывшего Большого Алматинского озера. Геометрически невыгодное расположение установки на склоне горы, при котором оптическая ось находилась под углом 10—12° к поверхности наблюдения, привело к искажению регистрируемого изображения и ошибкам при восстановлении низкоэнергичной области спектра. Тем не менее в области больших энергий интенсивность зарегистрированных вспышек согласовалась с результатами других установок.

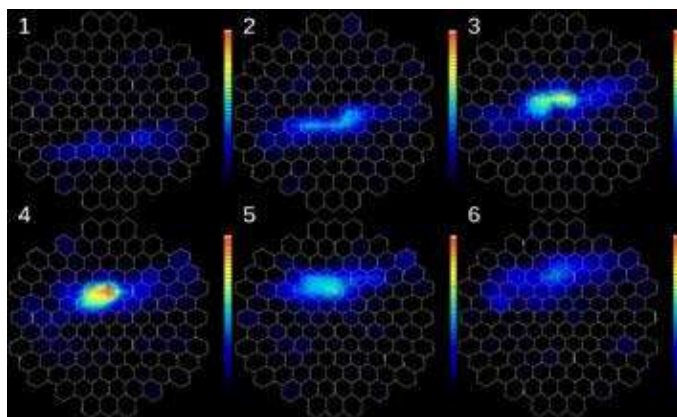
## «Сфера» взлетает

В начале 90-х годов был начат следующий этап исследований и разработана более совершенная система и методика измерений. Пробные запуски установки «Сфера-1» на привязном аэростате с новой аппаратурой произвели в 1997 и 1998 году, а в феврале 2000 года сделали первые полноценные измерения. С высоты около 900 м зарегистрировали более 400 событий и построили спектр космических лучей в области 10<sup>16</sup>—10<sup>17</sup> эВ, с использованием предложенной А.Е.Чудаковым методики. Запуск состоялся в Саратовской области, где доля ясных ночей зимой крайне мала.

Для регулярных измерений НИИЯФ МГУ и ФИАН решили совместно подготовить серию запусков привязного аэростата в Антарктиде в условиях полярной ночи. Планируемое время экспозиции установки должно было составить несколько сотен часов. Однако в 2004 году при первом же запуске аэростата на антарктической станции Новолазаревская, трос, удерживающий установку, оборвался, аэростат с аппаратурой унесло в сторону океана, и найти ее не удалось.

С учетом опыта эксплуатации «Сферы-1» была начата разработка новой аппаратуры. Установка «Сфера-2» получила мозаику уже из 109 ФЭУ и полностью цифровую систему регистрации формы импульсов каждого из них. Пробные запуски «Сферы-2»





3  
Пример восстановления вспышки света от ШАЛ на снежной поверхности по данным установки «Сфера-2». Интервалы времени между кадрами 50 нс. Характерный диаметр светового пятна 200 м (на половине амплитуды). Энергия первичной частицы для этого события — около  $10^{17}$  эВ. Шестиугольники — координатная сетка, привязанная к осям ФЭУ

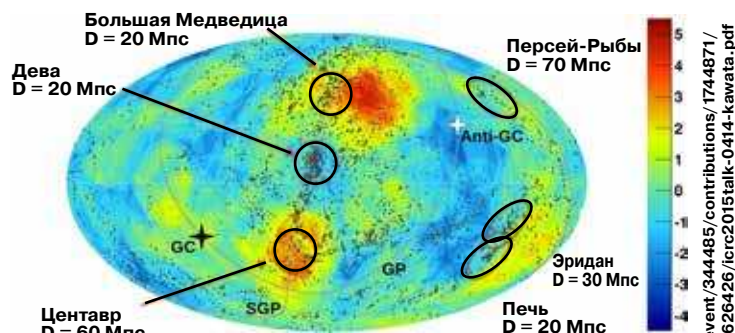
начали с 2008 года, а наиболее успешные измерения провели с 2011 по 2013 год над заснеженным льдом озера Байкал (рис. 2). Предварительные результаты уже не раз публиковались, но обработка продолжается. Много машинного времени отбирает моделирование развития каскадов в атмосфере от высокоэнергичных первичных частиц. Моделей как минимум три, а без моделирования интерпретация результатов невозможна. Главный результат: резко уменьшилась (до 20% от общего потока) интенсивность легкой компоненты — протонов и ядер гелия космических лучей при энергиях  $5 \cdot 10^{16}$ — $10^{17}$  эВ по сравнению с меньшими энергиями (рис. 3). Такие резкие изменения в спектре космических лучей говорят о существовании в нашей Галактике неизвестных источников с гигантским энерговыделением. То есть поскольку состав космических лучей другой, источник — какой-то новый для нас космический объект.

## Антарктида: между Землей и космосом

Следующий этап — это проект «Сфера-Антарктида». Цель его — продвижение в направлении фундаментальных проблем физики космических лучей и астрофизики, то есть выяснение происхождения, механизма ускорения и распространения космических лучей в межзвездной среде. На сегодня нет общепринятого механизма ускорения частиц до энергий выше  $3 \cdot 10^{18}$  эВ, неизвестна природа источников таких частиц, непонятны причины расхождения данных, полученных разными исследователями. В области энергий выше  $6 \cdot 10^{19}$  эВ эксперименты показывают анизотропию — космические лучи приходят не со всех направлений. Поскольку частицы таких энергий слабо отклоняются в магнитных полях космического пространства, эта анизотропия указывает на какие-то важные особенности устройства Вселенной. Однако непонятно, на какие.

Общего количества зарегистрированных событий пока недостаточно для надежного обнаружения источников космических лучей сверхвысоких энергий, но делаются попытки выявить характерные направления, где регистрируется больше всего событий. Для этого ученые попробовали отобрать события с энергией более  $57 \cdot 10^{18}$  эВ. Их хватило для выделения «горячих точек». Однако расположение этих точек плохо коррелирует с известными кандидатами на роль таких мощных источников (рис. 4).

Важная задача проекта — получение наиболее достоверных данных об энергетическом спектре и массовом составе космических лучей в области энергий от  $10^{18}$  эВ. Эти данные потребуются для сравнения с данными, которые предполагается получить в планируемых орбитальных экспериментах. Так как космические аппараты находятся на большом расстоянии от поверхности



4  
Карта неба для космических лучей сверхвысоких энергий ( $E > 57 \cdot 10^{18}$  эВ) по данным установок Telescope Array (Северное полушарие, за семь лет 109 событий) и Pierre Auger Observatory (Южное полушарие, за десять лет 157 событий). Шкала справа показывает значимость событий в условных единицах, верхний конец шкалы соответствует примерно  $3\sigma$ , то есть весьма надежной фиксации направления прихода космических лучей. Сплошные кривые указывают на галактическую плоскость (GP) и сверхгалактическую плоскость (SGP), направление на центр Галактики GC и противоположное направление Anti-GC. Сверхгалактическая плоскость проходит через Солнце, центр нашей Галактики и центр скопления галактик в Деве.

Черными точками показаны галактики, кругами и овалами — кластеры (скопления галактик), D — расстояния до них в мегапарсеках

Земли, яркость вспышек света от ШАЛ мала, а нижний энергетический порог для таких установок достаточно высок — несколько единиц  $10^{19}$  эВ. Наземные же установки регистрируют вспышки начиная от  $10^{17}$  эВ, но чрезвычайно редко могут «поймать» события выше  $10^{19}$  эВ из-за малого времени экспозиции и малых размеров установок с оптическими детекторами. В проекте «Сфера-Антарктида» должны хорошо детектироваться события в области энергий, характерной как для существующих наземных, так и для будущих орбитальных установок. Таким образом, данные стратосферной установки будут играть роль мостика между результатами наземных и орбитальных детекторов.

## О вреде полярного сияния

Для успеха эксперимента нужны прозрачность атмосферы и чистота снежной поверхности. Антарктида — одно из немногих мест на Земле, где с этим дело обстоит хорошо. По данным многолетних наблюдений, с мая по сентябрь облачность там — 0—10% в приполярных областях, а в прибрежных зонах на широтах около  $70^\circ$  — до 40—50%. Так как облачность может искажать результаты измерений, лучше было бы проводить измерения в приполярных областях, но там средние температуры —  $60^\circ\text{C}$  ниже нуля. Поэтому запуски планируется делать с береговых станций «Новолазаревская» или «Прогресс», где средние температуры в июне и июле  $-15$ — $20^\circ\text{C}$ . Ветры сильные, но, как правило, один раз в месяц на несколько дней ветер стихает до 1—2 м/с. Тогда возможен старт для малых воздушных аппаратов с временем запуска менее 12 часов.

Во время полярной ночи над Антарктидой устанавливается устойчивый антициклон, и, согласно многолетним наблюдениям, запущенные с прибрежных станций аэростаты дрейфуют в направлении Южного полюса. Кроме того, с июня по август кромка ледового покрытия отодвигается далеко от материковых границ Антарктиды, а область покрытого снегом льда — более чем на 1000 км, так что измерения можно проводить даже при дрейфе аэростата за пределами континента. В диапазоне длин волн 300—600 нм относительный коэффициент отражения для чистого снега стабилен в пределах 3% для зенитных углов источника света 0— $80^\circ$ , поэтому снег — хороший экран для регистрации вспышек.

Конечно, имеются и минусы. Появление луны над горизонтом снижает время, подходящее для измерений, вдвое — из-за стократного увеличения фоновой засветки. Но все равно оно оказывается в разы больше, чем у наземных установок.

Полярные сияния также снижают время экспозиции аппаратуры. Хотя свечение возникает на высотах выше 100 км и не попадает в поле зрения аппаратуры, но оно увеличивает общий световой поток и ухудшает соотношение сигнала к фону. К сожалению, довольно трудно предсказать, когда и где оно начнется. Яркость полярных сияний оценивается в баллах по международной шкале, где 1 балл соответствует свечению Млечного Пути, 4 балла — полной луне. Уровень 1—2 балла позволяет проводить измерения с увеличенным энергетическим порогом регистрации, а при 3—4 баллах аппаратура автоматически выключается, пока фоновая засветка не снизится до допустимого уровня. Лучшее время для измерений — периоды минимума солнечной активности, когда интенсивность полярных сияний снижается. В 2018 году как раз и наступает такой период.

## Что сначала, что потом

Сначала будет изготовлен простейший прибор с несколькими датчиками и спутниковым модемом для передачи коротких сообщений. Прибор будет поднят небольшим аэростатом. Цель запуска — определить траекторию движения аэростата,

измерить интенсивность фонового света, температуру, давление и влажность. Эти данные используют при разработке аппаратуры и расчете конструкции установки.

На втором этапе начнутся тестовые измерения с прототипом установки. Прототип будет полностью функциональным детектором, но с меньшими размерами оптической системы и матрицы детектора. При этом энергетический порог увеличится до  $5 \cdot 10^{18}$  эВ. Регистрироваться будут только самые «яркие» события от высокоэнергетичных первичных частиц. За 30 суток полета может быть зарегистрировано около 100 таких событий. Этого недостаточно для получения статистически значимых результатов, но позволит оценить эффективность работы системы регистрации и надежность элементов аппаратуры.

После получения результатов работы прототипа (одного или нескольких) будут проведены измерения с экспериментальной установкой «Сфера-А». Далее — регулярные измерения нескольких установок в течение 3—10 лет. Затем анализ результатов — и лучшее понимание устройства Вселенной.



## Немного деталей

Отраженный от снежной поверхности полный поток черенковского света слабо зависит от типа первичного ядра, а при регистрации флуоресцентного света доля рассеянного назад черенковского света мала. Таким образом снимается характерная для наземных установок проблема разделения черенковского и флуоресцентного света: у них разное время прихода на детектор, к тому же вклад рассеянного в атмосфере черенковского излучения невелик. Точность определения зенитного угла прихода ШАЛ будет обусловлена регистрацией не только амплитуды, но и временной структуры импульсов, а также временных интервалов между импульсами черенковского и флуоресцентного света. Регистрация нескольких точек на кривой дает возможность определить глубину максимума развития ливня и зенитный угол наклона его оси. Эти данные позволяют анализировать массовый состав и энергетический спектр космических лучей.

Оптическая система экспериментальной установки состоит из системы линз с коррекцией сферической аберрации и диаметром входного окна 48 см. Свет фокусируется на матрицу из 3300 кремниевых фотоумножителей, которые работают в режиме счета фотоэлектронов. В этом режиме можно отказаться от применения в измерительной электронике сложных и энергозатратных аналого-цифровых преобразователей. Вместо них на выход каждого фотоумножителя подключаются аналоговые компараторы напряжения с цифровыми счетчиками срабатываний. Напряжение срабатывания компаратора устанавливается на уровне, соответствующему одному фотоэлектрону, индивидуально для каждого умножителя. Система записывает

информацию сразу в «штуках» фотоэлектронов. Отбор событий из светового фона выполняется с помощью отдельного электронного блока, так как объем поступающей информации существенно превышает возможности обработки бортовым компьютером. Алгоритм программы позволяет вырабатывать сигнал для записи события в память компьютера, когда в двух, трех или четырех расположенных рядом ячейках появляется сигнал выше среднего фона. При поступлении сигнала информация о событии формируется в кадр, сжимается и передается в центр сбора информации через спутниковый терминал.

Для определения местоположения измерительной аппаратуры используется модуль GPS/ГЛОНАСС. Модуль выдает географические координаты, высоту детектора и сигнал точного времени. Так как аппаратура может свободно вращаться вокруг оси, появляется задача определения ориентации детектора в горизонтальной плоскости. Применение магнитных датчиков положения (электронного компаса) малоэффективно в полярных широтах. Гироскопический датчик хотя и обладает высокой точностью, имеет свои недостатки — высокое потребление электроэнергии и большую массу. Поэтому будут применены датчики звездной ориентации, которые используются в системах космических аппаратов и микроспутников. Они имеют малые габариты, массу и энергопотребление и могут дублировать навигационные данные GPS/ГЛОНАСС-приемника. Кроме того, привязка к звездным координатам упрощает процедуру определения направления прихода первичной частицы.

Основные факторы в выборе спутниковой системы — зона покрытия (Антарктида) и ограничение на потребляемую мощность приемно-передающей аппаратуры. Лучше всего подходят по данным критериям системы «Iridium» (США) и «Гонец» (РФ).

Обе они используют спутники с круговыми полярными орбитами, что позволяет работать в полярных областях Земли, а низкие орбиты спутников (780 км — «Iridium» и 1400 км — «Гонец») дают возможность использовать терминалы с низким потреблением электроэнергии и ненаправленными антеннами. В настоящее время в группировке «Iridium» задействовано 66 спутников, в системе «Гонец» — 13.

В условиях полярной ночи использовать солнечные батареи, естественно, невозможно. Питание электроники происходит с помощью литиевых элементов. Элементы Li/SOCl<sub>2</sub> обеспечивают удельную энергию до 600 Вт·ч/кг. Серийно выпускаемые стандартные элементы питания предназначены для эксплуатации в диапазоне температур от -60°C. При этих температурах источники выдают очень маленький ток и пониженное напряжение. Однако при работающей аппаратуре температура в боксе должна быть существенно выше из-за выделения тепла приборами.

Для подъема измерительной аппаратуры планируется использовать специально разработанную оболочку аэростата. Ориентировочный объем оболочки — 6500 м<sup>3</sup> (при начальном объеме 55 м<sup>3</sup> на уровне моря). Ожидаемое время нахождения оболочки на рабочей высоте (20—30 км) — до 30 суток, а возможно, и больше, поскольку значительных перепадов температур на этой высоте во время полярной ночи не ожидается. Чтобы наполнить одну оболочку, требуется не более десяти стандартных 40-литровых баллонов с гелием.

Поиск и подбор отработавшего оборудования станет возможен после анализа траектории движения первых тестовых полетов аппаратуры. Один из вероятных вариантов — принудительное прекращение полета при пересечении аэростатом трассы ежегодного конвоя со станции Мирный или Прогресс на станцию Восток.