

Экспертный центр по научно-методическому  
сопровождению создания и функционирования  
карбоновых полигонов на территории РФ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ  
ПРОВЕДЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ,  
ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И  
СОСТАВЛЯЮЩИХ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА НА  
КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНАХ И ИХ ОБРАБОТКИ

Москва 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### ВВЕДЕНИЕ

#### А. Рекомендации по проведению метеорологических наблюдений

- А1. Состав оборудования
- А2. Установка оборудования (основные положения)
- А3. Регламент проведения измерений и обработки
- А4. Особенности морских метеорологических измерений.

#### Б. Рекомендации по проведению пульсационных измерений потоков парниковых газов

- Б1. Состав оборудования
- Б2. Установка оборудования (основные положения)
- Б3. Регламент проведения измерений и обработки
- Б4. Особенности проведения пульсационных наблюдений в прибрежной зоне и над водной поверхностью

#### В. Рекомендации по проведению стационарных и мобильных камерных наблюдений за потоками парниковых газов у поверхности почвы

##### В1. Рекомендации по проведению стационарных камерных наблюдений за потоками парниковых газов у поверхности почвы

- 1) Состав оборудования
- 2) Установка оборудования (основные положения)
- 3) Регламент проведения измерений и обработки данных

##### В2. Рекомендации по проведению мобильных камерных наблюдений за потоками парниковых газов у поверхности почвы

- 1) Состав оборудования
- 2) Установка оборудования и регламент проведения измерений и обработки данных

#### Г. Рекомендации по проведению наблюдений за свойствами подстилающей поверхности с помощью БПЛА

- Г1. Состав оборудования
- Г2. Регламент проведения измерений
- Г3. Регламент обработки результатов

#### Г4. Замечания по организации наблюдений

Д. Рекомендации по определению характеристик и свойств растительности и почвы, химического анализа образцов растительности, почвы и воды

Д1. Состав оборудования

Д2. Регламент проведения измерений и обработки

Е. Рекомендации по проведению анализа образцов воздуха

Е1. Состав оборудования

Е2. Регламент проведения измерений и обработки

Ж. Рекомендации по проведению измерений параметров карбонатной системы природных вод

Ж1. Состав параметров

Ж2. Приборы и особенности регламента проведения измерений отдельных параметров.

З. Рекомендации по формированию массивов данных и частоте наблюдений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ  
ЛИТЕРАТУРА

## ВВЕДЕНИЕ

Данные Методические рекомендации разработаны для организации проведения метеорологических наблюдений, а также измерений потоков парниковых газов и составляющих углеродного баланса на карбоновых полигонах, развиваемых в рамках пилотного проекта, реализуемого Министерством науки и высшего образования России (<https://carbon-polygons.ru/>).

Инструментальные наблюдения на карбоновых полигонах предполагают получение высокоточных достоверных оценок потоков климатически активных газов на ограниченных по площади наблюдательных площадках, являющихся репрезентативными для различных типов ландшафтов. Точность оценок потоков климатически активных газов имеет принципиальное значение, поскольку величины потоков могут меняться в широком диапазоне и существенно различаться в зависимости от типов ландшафта. Над сушей пространственные изменения могут достигать нескольких сотен процентов и менять знак на масштабах нескольких десятков метров. Над морской и водной поверхностью пространственно-временная изменчивость потоков несколько меньше, однако коэффициенты турбулентного обмена энергии и газов варьируют в очень широком диапазоне. Все это говорит о том, что применение исключительно расчетных методов, основанных на интегральных параметризациях и полуэмпирической теории турбулентности в приземном (приводном) слое, для получения устойчивых и высокоточных оценок потоков климатически активных газов на выбранных площадках крайне затруднительно. Они обязательно должны быть сопряжены с прямыми измерениями потоков, которые позволяют адаптировать существующие расчетные методы к конкретным ландшафтам и морским акваториям.

Данные методические указания направлены на начальное обеспечение сотрудников, работающих на карбоновых полигонах, знаниями о порядке и основных особенностях проведения измерений потоков климатически активных газов, а также сопряженных с ними характеристик биогеохимического баланса экосистем. Измерения потоков климатически активных газов в экосистемах является высокотехнологичным процессом, требующим детального знания о физике процессов обмена в приземном (приводном) слое, владения детальной технической информацией о приборах, используемых для проведения измерений, и практического опыта. В настоящее

время существует достаточно большое количество публикаций, детально описывающих как теоретические основы проведения измерений, так и все необходимые практические шаги. В этом смысле данный документ ни в коей мере не заменяет эти источники, а является своеобразным введением в проблему, обозначающее основные блоки работ и отсылающее читателя к уже существующим документам и публикациям. Другими словами, он без сомнения будет полезен для специалистов, начинающих работы по измерениям потоков климатически активных газов на карбоновых полигонах, но он требует безусловного ознакомления с базовыми документами и методиками, на которые приводятся ссылки.

## **А. Рекомендации по проведению метеорологических наблюдений**

### А1. Состав оборудования

Состав оборудования для проведения метеорологических наблюдений включает стандартизированные системы для высокоточных измерений метеорологических параметров в автоматическом режиме в соответствии со стандартами ВМО (Всемирной метеорологической организации) ([http://ipk.meteorf.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=283](http://ipk.meteorf.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=283)).

В состав станции для метеорологических наблюдений входят высокоточные датчики для измерения температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра с близким к нулю порогом чувствительности (начальное пороговое значение  $<0.4$  м/с и точность  $<0.17$  м/с, для ультразвуковых датчиков пороговое значение  $<0.01$  м/с), атмосферного давления, суммарной солнечной радиации, количества и интенсивности осадков, температуры и влажности почвы, установленные на стандартной метеорологической мачте высотой 10 метров.

В качестве дополнительных измерительных устройств метеорологическая станция может включать датчики для измерения: отраженной солнечной радиации, составляющих радиационного баланса (восходящей и нисходящей длинноволновой и коротковолновой солнечной радиации, альбедо), высоты снежного покрова, погодных условий, формы осадков, и др.

Оборудование требует проведения регулярной калибровки согласно рекомендациям производителя.

Система сбора информации предполагает возможность подключения станции напрямую к TCP/IP сетям через Ethernet, GSM и GPRS модемы.

Метеорологическая станция должна быть оборудована автономным электропитанием, накопителем измеряемой метеорологической информации и устройством первичной обработки данных (логгер), комплексной защитой

накопителя и электронных систем станции от попадания влаги (дождя), а также защиты всего комплекса оборудования от попадания молнии.

## A2. Установка оборудования (основные положения)

Оборудование устанавливается на открытом горизонтальном участке земной поверхности с подстриженным травянистым покровом на некотором удалении от препятствий (зданий и сооружений). Удаление от препятствий определяется их влиянием на локальную динамику ветра и, как правило, должно составлять не менее 40 метров при высоте измерений скорости ветра 10 метров и до 60 метров при высоте измерений 2 метра (если такие наблюдения ведутся).

Установка оборудования производится на мачте высотой 10 метров. Датчики скорости и направления ветра устанавливаются на высоте 10 метров, а датчики для измерения температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, а также солнечной радиации на высоте 2 метра. Высота установки датчиков осадков может варьировать от 0.5 до 2 м.

При полевых исследованиях для решения отдельных научных задач по измерению метеорологических параметров (например, микроклиматические наблюдения) возможно использование метеорологической мачты высотой 2 метра, с соответствующей более низкой высотой измерения составляющих скорости ветра.

Во избежание попадания молнии в метеорологическую мачту требуется установка системы молниезащиты.

## A3. Регламент проведения измерений и обработки

Измерения проводятся непрерывно в автоматическом режиме, начиная с момента установки станции.

Измерения (температура, влажность, солнечная радиация, скорость и направление ветра) проводятся с шагом по времени от 1 до 10 секунд с последующим осреднением за 30 минутный интервал. Возможен меньший период осреднения. Атмосферные осадки оцениваются по интегральным значениям за весь соответствующий временной интервал. Для температуры, влажности, солнечной радиации, скорости и направления ветра определяются средние, максимальные и минимальные значения измеряемых параметров за

заданный временной интервал. Для осадков, при использовании многофункциональных датчиков, кроме суммарного количества выпавших осадков возможно дополнительное определение максимальной интенсивности осадков, их продолжительности и формы.

Результаты измерений хранятся в виде электронных таблиц, в форматах, совместимых с существующими статистическими программными продуктами (ASCII, Excel, Statistica, и т.д.) для их последующей обработки и анализа. Если метеорологическая станция работает в непрерывном режиме, то результаты наблюдений записываются на носители и сохраняются в виде цифровых ежесуточных файлов. Режим хранения данных и их предоставления пользователям кратко описывается в разделе 3.

#### A4. Особенности морских метеорологических измерений.

При проведении измерений в море, параметры, необходимые для определения потоков энергии и газов на границе океан-атмосфера, включают скорость ветра, направление ветра, температуру воздуха, влажность воздуха, атмосферное давление, нисходящее коротковолновое излучение, нисходящее длинноволновое излучение, осадки, температуру поверхности моря. Bradley and Fairall (2006) представили оценки требований к точности для всех этих переменных. Будет ли достигнута требуемая точность, зависит от установки приборов, их технического обслуживания и практики проведения измерений.

Существенной проблемой судовых наблюдений в отличие от наблюдений на суше, является сильное влияние суперструктуры судна или платформы на проведение измерений. Поэтому важным требованием является наличие более одного датчика каждого типа на судне. Если возможно, следует установить две конфигурации приборов, чтобы обеспечить хорошую экспозицию при любом направлении ветра или солнца относительно судна. По крайней мере, один запасной прибор каждого типа должен быть зарезервирован для замены в случае выхода из строя его работающего аналога. Запасные инструменты могут храниться на судне, если оператор считает, что их замена в море возможна.

Каждый прибор проходит калибровку в сертификационном центре, куда его следует возвращать для повторной калибровки по мере необходимости, но не реже одного раза в год. Важно вести регистрацию истории калибровки и повторной установки каждого датчика, чтобы можно было использовать наиболее недавние калибровки в случае замены или замены инструментов. Эти



данные имеют решающее значение, когда результаты измерений повторно анализируются во время пост-экспедиционного анализа.

Формирование потока данных при измерениях также должно включать входные данные от навигационной системы судна, такие как широта и долгота по GPS и истинному курсу судна, а также курс и скорость судна относительно земли и скорости относительно воды. Они необходимы для преобразования относительной скорости и направления ветра в истинные значения.

Хотя в комплект устанавливаемых приборов может входить отдельный датчик температуры морской воды, при наличии встроенного судового термосалинографа его данные следует также фиксировать и включать в массив измерений. Если судовые метеорологические измерения доступны в компьютерной сети судна, они должны быть также включены в общий массив измерений, а расположение приборов должно быть описано и включено в метаданные. Это особенно полезно при исследовании аномальных данных, выявлении того, находилось ли судно в воздухе (например, для заброса CTD) или маневрировало и создавало искажение потока, существовали ли проблемы с выбросами судовых труб, и т. д.

В идеале установка всех датчиков должна отвечать тому требованию, что они должны подвергаться воздействию воздуха до того, как он обдует палубы и надстройку. В этом смысле позиция на фок-мачте обычно является лучшим местом для метеорологических приборов. Однако достаточно высокая мачта может не существовать или быть непригодной для установки, особенно на небольших судах. Более того, такая мачта может подвергаться воздействию брызг и прямому воздействию волн. Если это целесообразно и приемлемо для данного типа судна, на носовой палубе лучше всего специально установить отдельную решетчатую мачту с оттяжками для приборов.

Альтернативным вариантом установки может быть колонна или мачта над рулевой рубкой. С одной стороны, это решение будет приводить к искажению потока и его тепловому загрязнению, что будет влиять на показания, причем оба фактора будут меняться в зависимости от относительного направления ветра. С другой стороны, это обеспечивает лучший доступ к инструментам для обслуживания.

Во всех остальных аспектах проведение метеорологических наблюдений должно соответствовать рекомендациям Bradley and Fairall (2006). Сбор и

обработка данных морских метеорологических наблюдений проводится в соответствии с рекомендациями, представленными в разделе 3.

## **Б. Рекомендации по проведению пульсационных измерений**

Метод турбулентных пульсаций (eddy covariance) в настоящее время является одним из наиболее распространенных и широко используемых прямых методов измерений потоков явного и скрытого тепла, парниковых газов между земной (водной) поверхностью и атмосферой. Альтернативный метод инерционной диссипации, основанный на использовании высокочастотных измерений самих переменных без измерений пульсаций и применении гипотезы инерционной диссипации Колмогорова, может быть достаточно эффективен для измерения потоков кинетической энергии и тепла, но имеет существенные ограничения при измерении потоков парниковых газов или других примесей в приземном (приводном) слое атмосферы.

Метод турбулентных пульсаций основан на высокочастотных (10-20 Гц) измерениях горизонтальных и вертикальных составляющих скорости ветра, температуры и влажности воздуха, концентрации парниковых газов и аэрозолей (Бурба и др. 2016, <https://labinstruments.ru/upload/5a15439594ac8-li-cor-eddy-covariance-method-book-2016-russian-min.pdf>).

Современная сеть мониторинга потоков парниковых газов между земной поверхностью и атмосферой, использующая метод турбулентных пульсаций, объединяет в настоящее время более 800 постоянно действующих станций наблюдений (FLUXNET, <https://fluxnet.fluxdata.org/>). Станции данной сети работают с использованием единой методики наблюдений, стандартизированного оборудования, и единого алгоритма обработки информации, что обеспечивает хорошую сопоставимость получаемых экспериментальных данных по потокам явного и скрытого тепла, и парниковых газов в глобальном масштабе.

Основными требованиями для проведения измерений методом турбулентных пульсаций, являются: однородность подстилающей поверхности (растительность, рельеф) вблизи станции измерений, а также наличие хорошо выраженной турбулентности в приземном слое воздуха. В качестве критерия интенсивности турбулентности обычно используется динамическая скорость. Пороговое значение динамической скорости, выше которого перенос энергии и вещества осуществляется преимущественно атмосферными вихрями и результаты измерений потоков можно считать достоверными, оценивается по

степени замыкания теплового баланса с использованием методики, описанной Бурба и др. (2016).

## Б1. Состав оборудования

Состав оборудования для проведения пульсационных измерений включает стандартизированные системы для высокоточных и высокочастотных измерений горизонтальных и вертикальной составляющих скорости ветра (3D), температуры воздуха, удельной влажности воздуха, концентрации диоксида углерода, метана и других (при наличии соответствующего оборудования) парниковых газов. Для измерений составляющих скорости ветра используются 3D ультразвуковые анемометры, а для измерений концентрации парниковых газов (водяной пар, диоксид углерода, метан) инфракрасные анализаторы (открытого или закрытого типа).

Используемое оборудование должно обладать способностью быстрой регистрации исследуемых параметров на разных частотах (10-20 Гц) с высокой точностью, и обладать низкой инерционностью для обеспечения необходимой чувствительности к небольшим изменениям параметров внешней среды (<https://labinstruments.ru/upload/5a15439594ac8-li-cor-eddy-covariance-method-book-2016-russian-min.pdf>). Газоанализатор требует проведения регулярной калибровки согласно рекомендациям производителя.

## Б2. Установка оборудования (основные положения)

Основные требования по установке пульсационного оборудования перечислены в кратком практическом руководстве по методу турбулентных пульсаций (Бурба и др. 2016, <https://labinstruments.ru/upload/5a15439594ac8-li-cor-eddy-covariance-method-book-2016-russian-min.pdf>).

Пульсационное оборудование для измерения потоков над низкой растительностью и водной поверхностью устанавливается на высоте около 2-3 метров над верхней границей растительности или почвы. Высота крепления оборудования может меняться в зависимости от свойств окружающего ландшафта и размеров исследуемого участка.

Пульсационное оборудование для измерения потоков над кустарниковой и лесной растительностью устанавливается на метеорологической мачте на высоте от 3 до 10 метров и более над верхней границей растительности. Данная

высота определяется степенью неоднородности растительного покрова, размерами исследуемого участка и рельефом местности. Для количественной оценки зоны выноса необходимо определение "зоны влияния" (footprint). Растительность и рельеф в зоне влияния должны быть максимально однородными. Для растительности важно учитывать ее видовой состав, плотность, высоту, степень повреждения, и др.

При установке оборудования необходимо чтобы приборы были максимально открыты для набегающего потока и мачты, и крепления не создавали для оборудования ветровой тени.

Метеорологическое оборудование, входящее в комплект станции, размещается вблизи оборудования для пульсационных измерений. Датчик радиационного баланса должен быть расположен на выносной штанге над соответствующим типом поверхности (лес, кустарник, травянистый покров, почва, водная поверхность) который репрезентативен исследуемого пульсационным оборудованием типу ландшафта.

Метеорологическая вышка должна быть обеспечена системой защиты от удара (попадания) молнии и по возможности автономным источником энергоснабжения (солнечные панели).

### Б3. Регламент проведения измерений и обработки

Основные требования по проведению пульсационных измерений, обработке и интерпретации данных перечислены в кратком практическом руководстве по методу турбулентных пульсаций (<https://labinstruments.ru/upload/5a15439594ac8-licor-eddy-covariance-method-book-2016-russian-min.pdf>), а также в обобщающих статьях и монографиях (Aubinet et al. 2012).

Измерения пульсационным оборудованием составляющих скорости ветра, температуры, влажности, концентрации парниковых газов проводятся с частотой 10-20 Гц. Потоки рассчитываются за 30 минутные временные интервалы. Метеорологические параметры измеряются с частотой от 0.1 до 1 Гц и усредняются также за 30 минутный временной интервал.

Обработка данных измерений осуществляются существующими программными продуктами EddyPro (<https://www.licor.com/env/support/EddyPro/software.html>),

EasyFlux (<https://www.campbellsci.eu/easyflux-pc>), EddyUH ([https://www.atm.helsinki.fi/Eddy\\_Covariance/EddyUHsoftware.php](https://www.atm.helsinki.fi/Eddy_Covariance/EddyUHsoftware.php)), и др.

Анализ результатов предполагает расчет потоков с учетом всех необходимых поправок и коррекций. В список основных поправок для измерений входит поворот системы координат, акустическая поправка для измеряемой анемометром температуры, поправка на отклонение направления набегающего воздушного потока от горизонтали, учет запаздывания записи сигнала (оценивается методом максимизации ковариации), поправки для частотных характеристик (восстановление высокочастотной и низкочастотной части энергетического спектра), поправка на устранения влияния флуктуаций плотности воздуха, удаление выбивающихся значений, и др. Обязательным этапом является расчет и анализ зоны влияния (footprint) соответствующей участку земной поверхности с наветренной стороны от измерительной мачты с которого осуществляется перенос энергии и вещества (субстанций) к измерительному оборудованию. Площадь зоны влияния при разных направлениях ветра и условиях стратификации атмосферы не должна превышать размеров исследуемой экосистемы.

Заполнение пропусков во временных рядах осуществляется с использованием имеющихся программных продуктов (например, REddyProc, <https://www.bgc-jena.mpg.de/bgi/index.php/Services/REddyProcWeb>). Возможно применение для заполнения пропусков процесс ориентированных моделей, а также статистических моделей, основанных на использовании методов машинного обучения.

Результаты измерений хранятся в виде электронных таблиц, в форматах, совместимых с существующими статистическими программными продуктами (ASCII, Excel, и т.д.) для их последующей обработки и анализа. Результатом измерений потоков с помощью радиационных измерений являются исходные записи пульсаций в высокочастотном диапазоне и взаимные спектры пульсаций, интегрирование которых позволяет рассчитывать потоки. Исходные данные как правило сохраняются оператором в составе его базовых массивов, поскольку они нужны для проведения тарировок, а также пост-проверки результатов интегрирования спектров. Результаты интегрирования (то есть значения потоков) должны сохраняться отдельно и передавать в центр сбора информации. Частота получения таких оценок для одной точки наблюдений не может быть более 1 раза в час. Отметим, что существующие программные

продукты (например, EddyPro) обеспечивают режим формирования файлов данных после завершения каждой серии наблюдений.

#### Б4. Особенности проведения пульсационных наблюдений в прибрежной зоне и над водной поверхностью

Установка пульсационного оборудования для измерения турбулентных потоков над водной поверхностью производится на плавсредствах на выносных стрелах, сопряженных с носовыми мачтами или бортовыми кран-балками. При использовании платформ или морских вышек установка производится на выносных стрелах, сопряженных с конструкцией самой платформы или вышки. Длина выноса в обоих случаях должна быть не менее 1 метра на судне и не менее 1.5 м на платформе. При этом контролируется расположение акустического анемометра непосредственно над водной поверхностью. Особенности морских наблюдений предполагают особые требования к сопряжению газовых анализаторов с системой пульсационных измерений. При проведении наблюдений в морских условиях могут использоваться газовые анализаторы как открытого, так и закрытого типа. Измерительный объем датчика открытого типа подвергается воздействию атмосферы и устанавливается рядом с акустическим анемометром. Датчики закрытого типа необходимо располагать отдельно от акустического анемометра, а проба воздуха при этом всасывается насосом из воздухозаборника, расположенного рядом с акустическим анемометром. Протекание пробы воздуха через трубку приводит к временной задержке между ее поступлением на вход и моментом отбора, что ведет к эффекту ослабления турбулентных пульсаций за счет взаимодействия воздушного потока со стенками трубки. Эти эффекты могут быть достаточно сильными и приводить к ошибкам в величинах измеряемых потоков до 40-50% [например, Leuning and Judd, 1996]. Над морем или водоемом следует стремиться использовать системы открытого типа, основным преимуществом которых является отсутствие ухудшения сигнала, связанного с протекаем по трубке. Однако в этом случае важным фактором становится необходимость введения больших поправок на влияние потока явного и скрытого тепла (так называемой поправки Уэбба или Webb-correction).

Технология введения поправки Уэбба для потока водяного пара хорошо описана в McGillis et al. [2001] и может быть использована на практике. При измерении потоков  $\text{CO}_2$  над океаном надо учитывать, что система пульсационных наблюдений, сопряженная с газовым анализатором, не измеряет соотношение смеси  $\text{CO}_2$ , а измеряет молярную плотность  $\text{CO}_2$  между

источником и детектором. На измеренную молярную плотность будут влиять изменения плотности воздуха из-за концентраций водяного пара, температуры и давления. Для получения потока  $\text{CO}_2$  эта оценка требует введения поправки Уэбба для удаления части измеренной молярной плотности  $\text{CO}_2$ , вызванной флуктуациями плотности фонового воздуха. Помимо введения поправки Уэбба по McGillis et al. [2001] можно осуществлять ее введение на инструментальном уровне с использованием многотрубного мембранного осушителя (например, Nafion PD-200T, PermaPure) с противотоком сухого воздуха.

Второй особенностью использования систем открытого типа является то, что производительность датчиков, подверженных воздействию морских условий, может быстро (в течение нескольких десятков минут) ухудшаться из-за скопления солевого налета на окнах датчика.

Если же используются датчики газовых анализаторов закрытого типа, то можно их настроить так, чтобы свести к минимуму влияние поправок Уэбба, однако требуется коррекция ухудшения сигнала из-за потока в пробу, а также измерение сигнала  $\text{CO}_2$  (или другого газа), возвращаемого датчиками, становится высокочувствительно к движению платформы, что особенно принципиально для судовых платформ. Идеальным (но трудно реализуемым) подходом является объединение преимуществ двух типов датчиков путем преобразования датчика открытого типа (менее чувствителен к эффектам движения платформы) в конфигурацию закрытого типа (гарантирующего уменьшение поправок Уэбба и уменьшение потери данных из-за загрязнения окон датчика морскими брызгами).

Идеальным вариантом является использование двух быстродействующих систем, установленных последовательно, когда пробы воздуха, отобранные на входе в выносную стрелу носовой мачты, анализируются отдельно таким образом, что одна система (например, LI7000 или его более поздние аналоги) используется для расчета потока водяного пара, а вторая (например, LI7500) для расчета потока  $\text{CO}_2$ . При этом первая является системой закрытого типа, в то время как вторая – системой открытого типа, который преобразуется в конфигурацию закрытого типа путем вставки цилиндрической стеклянной ячейки (обычно длиной 10-12.5 см и внутренним диаметром 1.0 – 1.6 см) в оптический тракт прибора.

Если это реализовано, то необходимо проводить контроль скорости подачи воздуха через входное отверстие с фильтром, при этом скорость должна



находиться в пределах 16–18 л/мин. Это гарантирует время прохождения воздуха в трубке примерно 1.2 с, что является оптимальным для оценки корреляции между температурой акустического анемометра и концентрацией CO<sub>2</sub> в ячейке газового анализатора.

Сама практика измерений и их обработки достаточно хорошо согласуется с рекомендациями для суши с некоторыми особенностями, в деталях описанными в McGillis et al. (2001) и Blomquist et al. (2014).

Учитывая, что большинство полигонов использует (или планирует использовать для пульсационных наблюдений аппаратуру LI-COR, в Приложении 1 приводится Инструкция по измерению потоков энергии и климатически активных газов методом вихревой ковариации с использованием пульсационной аппаратуры и газоанализаторов, представляющая собой адаптированный перевод документа ICOS Ecosystem Instructions «TURBULENT FLUX MEASUREMENTS OF CO<sub>2</sub>, ENERGY AND MOMENTUM» в редакции от 23.08.2022, ICOS ETC, 2022.

## **В. Рекомендации по проведению стационарных и мобильных камерных наблюдений за потоками парниковых газов у поверхности почвы**

### В1. Рекомендации по проведению стационарных камерных наблюдений за потоками парниковых газов у поверхности почвы

#### *1) Состав оборудования*

Система для стационарных камерных наблюдений состоит из набора стационарных камер (прозрачных или непрозрачных) произвольного размера (объема), соединенных через коммутирующее устройство с газоанализатором мобильного или стационарного типа. Принцип работы камеры закрытого типа основан на измерении скорости потока газа у поверхности почвы по изменению концентрации соответствующего газа внутри камеры, температуры воздуха внутри камеры, ее объему и площади основания.

Число измерительных камер в системе зависит от задачи исследования, свойств почвенного покрова и растительности, наличия мультиплексера для соединения газоанализатора с различными камерами. Количество камер увеличивает точность проводимых измерений, обеспечивая исследователя данными о пространственной изменчивости эмиссии и поглощения парниковых газов. Желательным является укомплектование каждой из камер датчиками температуры и влажности почвы. При измерениях на участках почвы покрытых растительностью с применением прозрачных камер целесообразно, по возможности, дополнительное использование датчиков приходящей ФАР и ИК температуры поверхности для каждой камеры. Для оптимизации измерений атмосферных характеристик при камерных измерениях целесообразна установка метеорологической станции вблизи измерительной системы, регистрирующей весь спектр атмосферных параметров (температура, влажность, осадки, солнечная радиация) с высоким временным разрешением. Для обеспечения равномерного перемешивания воздуха внутри камеры (не фабричного производства) в ней устанавливается вентилятор малой мощности.

Газоанализатор требует проведения регулярной калибровки согласно рекомендациям производителя.

## *2) Установка оборудования (основные положения)*

Стационарные камеры устанавливаются на заранее выбранных участках с однородным почвенным покровом на специальных основаниях, гарантирующих герметичность камеры. Для определения исключительно гетеротрофного почвенного дыхания целесообразно удаления корней растений из верхних почвенных горизонтов. При измерении потоков  $\text{CO}_2$  и метана в камерах возможно использование "гидравлического затвора". Время экспозиции (закрытия) камеры для проведения измерений определяется типом камеры, ее объемом, видом измеряемого парникового газа.

## *3) Регламент проведения измерений и обработки данных*

Измерения потоков парниковых газов камерами проводятся в соответствии с рекомендациями и настройками производителя камер. При отсутствии предустановленного алгоритма проведения измерений целесообразно проводить измерения в нескольких повторностях (для каждой камеры) с последующим осреднением потоков за 30 минутные интервалы (соответствующие временным интервалам метеорологических и пульсационных измерений).

Обработка данных, включая расчет скорости эмиссии и поглощения парниковых газов, осуществляется с применением специализированного или стандартного программного обеспечения.

Результаты измерений хранятся в виде электронных таблиц, в форматах, совместимых с существующими статистическими программными продуктами (ASCII, Excel, и др.) для их последующей обработки и анализа.

## B2. Рекомендации по проведению мобильных камерных наблюдений за потоками парниковых газов у поверхности почвы.

### *1) Состав оборудования*

Система для мобильных камерных наблюдений состоит из переносной камеры (прозрачной или непрозрачной) произвольного размера (объема), соединенной через коммутирующее устройство с мобильным газоанализатором. Желательным является укомплектование каждой из камер датчиками

температуры и влажности почвы. Возможно использование датчика ИК температуры. При проведении измерений необходимо проведение точной географической привязки каждой точки измерений (GPS). Газоанализатор требует проведения регулярной калибровки согласно рекомендациям производителя.

## *2) Установка оборудования и регламент проведения измерений и обработки данных*

В зависимости от типа измерительной камеры ее установка на маршруте осуществляется или на специальных (обычно заранее установленных) основаниях, углубленных внутрь почвы, или без оснований (для камер с мягким герметичным основанием) на выровненных участках почвы. Измерения рекомендуется проводить в нескольких повторностях (не менее 3) с параллельной регистрацией температуры и влажности верхнего горизонта почвы (0 - 10 см). Возможно использование в камерах "водного затвора" при измерениях, не предусматривающих определение скорости испарения.

Для последующей интерпретации измерений целесообразно измерение в каждой точке сопровождать коротким техническим описанием измеряемого участка (почва, растительность). Возможно использование фотографии. При наличии элементов растительности внутри измерительной камеры требуется определение количества фотосинтезирующей и нефотосинтезирующей биомассы.

Обработка данных, включая расчет скорости эмиссии и поглощения парниковых газов осуществляется с применением специализированного программного обеспечения. Результаты измерений хранятся в виде электронных таблиц, в форматах, совместимых с существующими статистическими программными продуктами (ASCII, Excel и др.) для их последующей обработки и анализа. Режим хранения данных и их предоставления пользователям кратко описывается в разделе 3. Наиболее важные технические аспекты проведения наблюдений с использованием автоматических камер приводятся в адаптированный перевод рекомендаций Рабочей Группы по мониторингу экосистем ICOS в части стандартов автоматических камерных систем для измерений потоков климатически активных газов с поверхности почвы

## **Г. Рекомендации по проведению наблюдений за свойствами подстилающей поверхности с помощью БПЛА**

### Г1. Состав оборудования

Состав оборудования для проведения мультиспектральной съемки подстилающей поверхности включает беспилотный летательный аппарат с установленным оборудованием для мультиспектральной съемки поверхности высокого разрешения, лазерного сканирования поверхности (лидар, 903 нм). Мультиспектральная аппаратура в разных модификациях может включать датчики для измерений в видимом, ближнем ИК и ИК диапазоне. Разрешение мультиспектральной аппаратуры (видимый и ближний ИК диапазон) не должно превышать 10 см/пиксель при высоте 100 метров. Дополнительно БПЛА может быть экипирован портативным газоанализатором или лидаром с дифференциальным поглощением (ИК диапазон) для измерения концентраций парниковых газов.

В настоящее время наиболее традиционным и рекомендуемым для проведения измерений является комплекс Геоскан 401, который в зависимости от используемых полезных нагрузок позволяет получать исходные данные для получения геопространственной основы на различную территорию. В комплект комплекса Геоскан 401 входит в базовой конфигурации три полезные нагрузки:

- мобильный лазерный сканер АГМ МС1 с совмещенной RGB камерой
- мультиспектральная камера
- RGB камера высокого разрешения Sony RXRM2 42 Мр

### Г2. Регламент проведения измерений

Использование комплекса можно разделить на несколько этапов, таких как:

- Построение полетных заданий в Geoscan Planner в зависимости от типа территории, снимаемого объекта и использования полезной нагрузки.
- Выполнение по АФС/ВЛС (аэрофотосъемочных работ и воздушного лазерного сканирования)
- Предобработка материалов, полученных с выполнения АФС/ВЛС
- Обработка материалов АФС/ВЛС
- Анализ полученных данных

## *(1) Построение полетных заданий*

Построение полетных заданий в Geoscan Planner (входит в комплект поставки) в зависимости от типа территории, снимаемого объекта и использования полезной нагрузки. В зависимости от использования полезной нагрузки и территории съемки в Geoscan Planner задаются различные параметры полета БВС АГМ МС1 + RGB камера

При использовании мобильного лазерного сканера АГМ МС1 с совмещенной RGB камерой полетное задание строится относительно RGB камеры, т. к. угол поля зрения камеры уже, чем у мобильного лазерного сканера. При этом нужно не забывать, что для получения полноты данных без не отснятых участков, превышение относительно поверхности не должно превышать 150 метров и на сложных участках с ярко выраженным рельефом необходимо уменьшать значение «Шаг разбиения» до 20-40 метров в свойствах полетного задания.

Уменьшение высоты полета 80-100 метров необходимо для получения большего количества точек на земле при съемке лесных массивов в летний период, когда на деревьях есть листва, т.к. листья забирают на себя примерно 50-60% излучения мобильного лазерного сканера. Перекрытие для равнинных участков с лесом должно примерно составлять: поперечное 80%, продольное 30%-40. При полетах в горных участках местности продольное перекрытие рекомендуется увеличить до 60%.

## *(2) Регламент проведения измерений с использованием различных типов оборудования*

Съемка **мультиспектральной камерой** выполняется на лесных и луговых участках для получения ортофотопланов CIR/NDVI с размещающей способностью снимка 10-15 см/пиксель. В зависимости от задач возможно увеличение разрешающей способности снимка до 5 см/пиксель. Перекрытие при использовании мультиспектральной камеры выбирается: поперечное 80%, продольное 60-70%.

Съемка **RXRM2** выполняется на лесных и луговых участках с разрешением 4-5 см/пиксель с поперечным перекрытием 80%, и продольным 60-70%. Поперечное перекрытие 80% выбирается из-за того, что лес является достаточно сложной поверхностью, особенно когда дует ветер. Поэтому для

корректной обработки снимков точка на снимаемой поверхности должна попадать на большее количество проекций снимков.

**Выполнение аэрофотосъемочных работ и воздушного лазерного сканирования (АФС/ВЛС)** не рекомендуется выполнять в дождь и при ветре более 12 м/с. При выполнении полетов должна стоять GNSS базовая станция или в зоне 25 км должна присутствовать постоянно действующая базовая станция с частотой записи данных 1-20 Гц. При использовании конфигурации AGM MC1 + RGB камера надо иметь ввиду, что мобильный лазерный сканер, в отличие от камер, можно использовать при низкой освещенности и даже ночью. При этом если присутствует дымка или туман, то полеты не рекомендуется производить из-за получения ложных переотражений и неотражений импульса от поверхности. Также, при съемке местности с черной или близко к темной поверхности (мокрый асфальт, чернозем, угольная поверхность) будет очень маленькое количество отражений от поверхности.

### *(3) Профилактические работы с мультиспектральной камерой*

При выполнении полетов необходимо перед началом и окончанием каждого вылета необходимо фотографировать калибровочную пластину мультиспектральной камеры, которая входит в комплект поставки.

Рекомендуется производить съемку для получения лучшего результата при постоянной освещенности (равномерной освещенности). При изменении освещенности при кучевых облаках, когда освещенность может меняться в течении двух минут, возможно ухудшение результатов и дополнительная обработка снимков, чтобы выронить освещенность на снимках.

## Г3. Регламент обработки результатов

### *(1) Предобработка материалов, полученных с выполнения АФС/ВЛС*

После полета производится следующая предобработка измерений полученных с помощью устройств:

- Мобильный лазерный сканер АГМ MC1 с совмещенной RGB камерой – обработка траектории и инерциальной системы от GNSS базовой станции в программных продуктах AGM Poswork, AGM ScanWork с

последующим получением облака точек лазерного сканирования в нужной системе координат.

- Мультиспектральная камера - обработка траектории от GNSS базовой станции для получения точных центров фотографирования для последующей обработки в ПО Agisoft Metashape.
- RGB камера высокого разрешения Sony RXRM2 42 Мр - ПО Agisoft Metashape.

## *(2) Базовая обработка материалов АФС/ВЛС*

Данные с мультиспектральной камеры и RGB обрабатываются с помощью Agsoft Metashape с получением следующих данных:

- Ортофотоплан RGB
- Ортофотоплан CIR/NDVI (для мультиспектральной камеры), на выходе можно получить ортофотоплан с пятью каналами в одном файле и выполнить синтез каналов единого изображения в стороннем ПО, или через инструмент «Растровый калькулятор» произвести синтез каналов и вывести геопривязанный ортофотоплан уже в необходимых цветах для последующего анализа.

По ортофотопланам с мультиспектральной камеры можно определить угнетенные растения, разделить деревья по породному составу, т. к. каждое дерево светиться в CIR по-разному. На ортофотоплане CIR угнетенные деревья получаются в зеленоватом цвете, хвойные породы в красном цвете, при этом елка в более насыщенном красном, по сравнению с сосной.

- Цифровая Модель Местности (ЦММ) - модель можно получить или фотограмметрическим методом в ПО Agisoft Metashape или по данным лазерного сканирования, она не содержит отметок на земле, кроме открытых участков от растительности, и содержит отметки высоты по верху растительности и сооружений.
- Цифровая Модель рельефа – практически в автоматическом режиме ЦМР можно получить по данным лазерного сканирования, причем минимальная плотность точек земли 0,5 – 10 точек на метр квадратный. Если лес не густой, например сосновый, где значение сомкнутости полого небольшое и фотограмметрическим методом можно увидеть участки земли на ЦММ и фотограмметрическом облаке точек.



- Производные данные по лазерному сканированию. При обработке данных лазерного сканирования можно разделить точки на различные классы: высокая растительность, средняя растительность, строения и прочие объекты. В различных программных продуктах по обработке данных лазерного сканирования таких как: Lidar 360, Кредо 3d Скан, TerraSolid, можно применять дополнительные инструменты, например, чтобы выделить облако точек каждого дерева в свой класс ID, т.е. сегментировать и распознать каждое дерево. По результатам сегментации можно вычислить характеристики дерева такие как: высоту, радиус кроны, площадь кроны, и объем кроны.

Соединяя все геопространственные данные, полученные после обработки, можно получить большую информацию об объекте. Полученную информацию можно загрузить в стороннее ПО, где дополнительно машинным обучением можно распознавать по RGB изображению породный состав (qgis с библиотекой Saga и DeepForest). Породный состав мы можем проанализировать с ортофотопланов RGB и CIR, а подгрузив векторный слой (Shapefile) с атрибутами по каждому дереву, полученному при обработке лазерного сканирования, мы дополним картинку информацией по каждому дереву. В дальнейшем можно посчитать биомассу на участок и таксационные характеристики в соответствии с Таблицей 1.

Таблица 1. Основные блоки информации, получаемые в результате обработки

Название блока	Выходные данные по блоку
Биологическая продуктивность древостоя по фракциям биомассы	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Биомасса стволов, кг/га</li> <li>2. Биомасса коры стволов, кг/га</li> <li>3. Биомасса ветвей, кг/га</li> <li>4. Биомасса листвы/хвои, кг/га</li> <li>5. Биомасса корней, кг/га</li> </ol>
Наличие депонированного углерода в древостое по фракциям биомассы	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Углерод биомассы стволов, кг/га</li> <li>2. Углерод биомассы коры стволов, кг/га</li> <li>3. Углерод биомассы ветвей, кг/га</li> <li>4. Углерод биомассы листвы/хвои, кг/га</li> <li>5. Углерод биомассы корней, кг/га</li> </ol>
Биоэнергетический потенциал древостоя по фракциям биомассы	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Энергетический протенциал биомассы стволов, Гдж/га</li> <li>2. Энергетический протенциал биомасса коры стволов, Гдж/га</li> <li>3. Энергетический протенциал биомассы ветвей, Гдж/га</li> <li>4. Энергетический протенциал биомассы листвы/хвои, Гдж/га</li> <li>5. Энергетический протенциал биомассы корней, Гдж/га</li> </ol>

#### Г4. Замечания по организации наблюдений

Надо отметить, что организация измерений с помощью БПЛА определяется типом подстилающей поверхности, погодными условиями и текущими исследовательскими задачами. Для регулярных мультиспектральных измерений состояния растительности рекомендуется проведение съемки не реже 1 раз в месяц. При решении задачи по восстановлению потоков парниковых газов с поверхности (для дальнейшего построения моделей, в том числе, с применением методов машинного обучения) повторяемость проведения облета с зависанием в точке установки измерительной мачты определяется техническими возможностями научной группы и планом исследовательских работ.

Регламент проведения измерений БПЛА, оборудованных портативным газоанализатором или лидаром с дифференциальным поглощением для измерения концентраций парниковых газов, проводится в виде интенсивных полевых компаний (раз в неделю в теплое время года при солнечной и маловетреной погоде) на исследуемых участках полигона.

Результаты измерений хранятся в ГИС совместимых растровых форматах.

## **Д. Рекомендации по определению характеристик и свойств растительности и почвы химического анализа образцов растительности, почвы и воды**

### Д1. Состав оборудования

Определение характеристик и свойств растительности и почвы проводится на основе общепринятых методов геоботанических и почвенных описаний. Закладку пробных площадей и инвентаризацию растительного и почвенного покрова рекомендуется осуществлять согласно «Методическим рекомендациям по проведению государственной инвентаризации лесов», утвержденных приказом Рослесхоза N 472 от 10.11.2011 (Приложения 10-15). Отбор (опробование), хранение и подготовку проб растительности, почвы и воды для физико-химического анализа (включая анализ отношений стабильных изотопов) следует осуществлять согласно утвержденным ГОСТам (напр. ГОСТ Р 58595—2019, ГОСТ 17.4.3.01—2017, ГОСТ ISO 11464-2015, ГОСТ 31861-2012, ГОСТ Р 58588—2019 и т.д.).

Для определения химического и изотопного состава образцов растительности, почвы может использоваться широкий спектр методов и оборудования, обеспечивающих достаточную точность измерений, соответствующую международным нормативам и стандартам.

### Д2. Регламент проведения измерений и обработки

План проведения измерений обуславливается поставленной задачей – анализом запасов элементов в компонентах экосистемы и/или выявления особенностей физиологических и биогеохимических процессов.

Определение валового содержания углерода и азота может осуществляться химико-аналитическими методами соответственно, на основе методов Тюрина и Кьельдаля (<http://agrohimiya24.ru/agrohimicheskie-metody/1691-opredelenie-gumusa-pochvy-po-metodu-ivtyurina.html>, <http://agrohimiya24.ru/agrohimicheskie-metody/1695-metod-keldalya.html>), но предпочтительнее использование автоматических анализаторов на основе каталитического окисления/сжигания,

обеспечивающих более высокую производительность. Для анализа соотношения стабильных изотопов лёгких элементов (углерод, водород, кислород, сера, азот и т.д.) в образцах растительности, почвы и воды применяется оборудование на основе метода ионизации электронным ударом. В случае постановки задачи определения соотношения стабильных изотопов водорода и кислорода в водных образцах возможно использование инфракрасных спектрометров на основе лазерной спектроскопии по затуханию света с кольцевой многоходовой кюветой. Этот метод также применяется при анализе изотопного состава углерода гидрокарбонатов и карбонатов в природных водах (морских и пресных (поверхностных, почвенных и грунтовых)). Точность и воспроизводимость результатов должна удовлетворять требованиям соответствующих ГОСТ и/или международных стандартов (МАГАТЭ в случае изотопного состава). Для обеспечения удовлетворительного качества результатов анализа и их воспроизводимости необходимо регулярное использование международных стандартных образцов с известным составом (элементы, стабильные изотопы). При рутинных анализах для поддержания качества измерений рекомендуется применение внутреннего лабораторного стандарта(ов), откалиброванного(ых) относительно международных стандартных образцов. Также рекомендуется участие в периодическом межлабораторном тестировании единых образцов, предоставляемых Центром.

Определение запасов элементов в компонентах экосистем (растительности и почве) осуществляется на основе результатов определения их содержания в растительности и почве и расчетных величин соответствующих фракций фитомассы и удельной плотности почвы (почвенных горизонтов).

Обработка данных физико-химического и изотопного анализа осуществляется с применением специализированного программного обеспечения, предоставляемого поставщиком с соответствующим оборудованием. Результаты измерений хранятся в виде электронных таблиц, в форматах, совместимых с существующими статистическими программными продуктами (ASCII, Excel, и т.д.) для их последующей обработки и анализа. Наблюдения химического и изотопного состава образцов растительности и почвы осуществляется в ходе проведения маршрутных отборов образцов на карбоновом полигоне, проводимых не реже двух раз в течение календарного сезона. Данные формируются по времени проведения маршрутных отборов для всех точек отбора. Количество точек отбора определяется структурой растительности на полигоне и ландшафтным разнообразием и может составлять от 5-10 до 50 точек.

## **Е. Рекомендации по проведению анализа образцов атмосферного и почвенного воздуха**

Анализ образцов воздуха может базироваться на двух методических подходах: дискретном и квази-непрерывном.

### Е1. Состав оборудования

При дискретном методе отбора проб атмосферного воздуха используются специализированные стеклянные емкости (темного стекла или покрытые светонепроницаемым материалом) объемом 1 л и компрессор для прокачки анализируемого воздуха. При отборе проб почвенного воздуха используются стальные трубки с перфорированным наконечником, погружаемые на необходимую глубину почвы, и медицинские шприцы объемом 50/60 мл (соединение Луер Локк) с трехходовым краном, подсоединяемые к трубке при отборе образца. Для измерения состава воздуха в отобранных образцах может использоваться широкий спектр методов и оборудования, обеспечивающих достаточную точность измерений, соответствующую международным нормативам и стандартам.

При квази-непрерывном высокоточном мониторинге концентраций газового состава атмосферного воздуха система измерения включает в себя воздухозаборник, воздухопровод, вакуумные насосы и анализатор. В качестве анализатора может использоваться широкий спектр оборудования, обеспечивающего достаточную точность измерений, соответствующую международным нормативам и стандартам.

При квази-непрерывном мониторинге концентраций диоксида углерода в почвенном воздухе могут использоваться инфракрасные сенсоры, помещенные в гидрофобные мембраны. Точность измерений относительно невелика, но достаточна для оценки высоких уровней насыщения CO<sub>2</sub>, как правило, наблюдаемых в поровом пространстве почвы (>>1000 ppm).

### Е2. Регламент проведения измерений и обработки

При дискретном методе отбор проб атмосферного воздуха осуществляется периодически (временной шаг зависит от поставленных задач) в стеклянные емкости (темного стекла или покрытые светонепроницаемым материалом) при помощи специализированного компрессора для прокачки анализируемого воздуха. Отобранные образцы воздуха в герметично запечатанных стеклянных емкостях доставляются в лабораторию, где производится анализ их газового состава. Для измерений рекомендуется использование газовых хроматографов с пламенно-ионизационным детектором для определения  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , детектором электронного захвата для определения  $\text{N}_2\text{O}$ . Для анализа соотношения стабильных изотопов в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  может использоваться оборудование на основе метода ионизации электронным ударом и лазерной спектроскопии по затуханию света с кольцевой многоходовой кюветой.

При использовании квази-непрерывного измерения концентраций газового состава атмосферного воздуха система включает в себя воздухозаборник(и), оснащенные 5-мкм полиэфировым фильтром (во избежание попадания пыли и водяных капель), и размещаемые на одной или нескольких высотах на специализированных (высотных) мачтах. Через воздухопроводы атмосферный воздух по металлопластиковым трубкам (напр. SERTOflex 12S) подается мембранным насосом в лабораторное помещение с контролем скорости входного воздушного потока ( $15 \text{ л мин}^{-1}$ ). В термостатированном лабораторном помещении, воздух через 40 мкм стальной фильтр проходит в Т-образное соединение, где с помощью вакуумного насоса отделяется из общей линии – "линии отбора воздуха" в "измерительную линию". По измерительной линии со скоростью  $0.5 \text{ л мин}^{-1}$  поток воздуха поступает непосредственно в анализатор для оценки содержания газовых примесей в приземной атмосфере (напр.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и т.д.). Точность измерений обеспечивается регулярной калибровкой инструмента тремя поверочными газовыми смесями (ПГС) с низкой, средней и высокой концентрацией (парниковых газов). Рекомендуется использование ПГС, сертифицированных ВМО и/или ЦМиС РФ. Целевая ("target") газовая смесь, где концентрации ПГ сходны с их значениями в атмосфере, используется для корректировки временного дрефта показаний анализатора и проведения интеркалибровочных процедур.

ПГС содержатся в 40-л стальных или алюминиевых газовых баллонах высокого давления с запорными мембранными вентилями. Подача газа в измерительную линию происходит по стальной трубке и регулируется редуктором из никелированной латуни. Переключение подачи газовых смесей осуществляется посредством системы 3-х позиционных электромагнитных клапанов.

Программная надстройка анализатора автоматически управляет переключением клапанов в рамках заданного алгоритма и запускает полный цикл калибровки газоанализатора каждые 168 часов. Целевая (“target”) газовая смесь анализируется ежедневно. Необходимая точность измерения определения содержания парниковых газов в атмосферном воздухе должна соответствовать нормам WMO-GAW.

Данные измерений ПГ и сопутствующих метеорологических параметров (направление и скорость ветра, температура и влажность воздуха, атмосферное давление), необходимых, в том числе, для корректировки результатов измерений, сохраняются на центральном регистраторе данных (логгере). Результаты измерений регулярно переносятся на ПК (возможно через сеть Internet) и хранятся в виде электронных таблиц, в форматах, совместимых с существующими статистическими программными продуктами (ASCII, Excel, и др.) для их последующей обработки и анализа.

Как и в случае наблюдений за химическим и изотопным составом, анализ образцов атмосферного и почвенного воздуха осуществляется в ходе проведения маршрутных отборов на карбоновом полигоне. Для образцов атмосферного воздуха дискретность наблюдений может быть достаточно большой и должна быть желательно скоординирована с проведением пульсационных наблюдений. Отбор проб почвенного воздуха должен осуществляться не реже двух раз в течение календарного сезона. Данные формируются по времени проведения маршрутных отборов для всех точек отбора. Количество точек отбора определяется структурой почв и растительности и может, как и в случае наблюдений за химическим и изотопным составом, составлять от 5-10 до 50 точек.

## **Ж. Рекомендации по проведению измерений параметров карбонатной системы природных вод**

### Ж1. Состав параметров

Компоненты карбонатной системы в природных водах могут быть охарактеризованы путем измерения как минимум двух измеряемых параметров из следующего набора: рН, общей щелочности (ТА), общего неорганического углерода (ТСО<sub>2</sub>) и парциального давления СО<sub>2</sub>. За последние 20 лет были разработаны методы, которые в деталях описаны в руководстве Министерства энергетики США (DOE 2005) и могут быть использованы как в применении к морским, так и пресноводным водоемам. Можно использовать для измерения этих параметров. Оценки точности методов и их применимость в деталях описаны в Milero (2006) для рН, ТА, ТСО<sub>2</sub> и рСО<sub>2</sub>.

### Ж2. Приборы и особенности регламента проведения измерений отдельных параметров.

рН морской воды измеряется с помощью потенциометров и спектрофотометров. Измерения рН проводятся в периодическом и проточном режимах. Оба режима достаточно точны, но концентрация протона [Н<sup>+</sup>] в морской воде в периодическом режиме определяется иначе, чем в разбавленных растворах при проточном режиме. В этом смысле, проточный режим измерений имеет некоторые преимущества.

Более точные измерения рН можно производить с помощью индикаторов, поглощающих свет. Использование индикаторов для измерения рН морской воды было разработано Бирном. Использование этих индикаторов позволяет измерять рН морской воды с чувствительностью до 0,0004 и точностью до 0,002. Индикатором, используемым в большинстве исследований морской воды, является м-крезоловый пурпурный тестер (mCP).

Общая щелочность морской воды определяется как концентрация всех оснований, способных принять Н<sup>+</sup> при титровании НСl до конечной точки угольной кислоты. Методы, используемые для измерения общего неорганического СО<sub>2</sub>, основаны на применении системы SOMMA



(многопараметрический метаболический анализатор), которая используется наиболее широко. В данном приборе удаленный из морской воды диоксид углерода собирается в растворе, содержащем этаноламин, который реагирует с  $\text{CO}_2$ , который затем определяется кулонометрическим титрованием. Кулонометрическая система должна быть откалибрована с использованием газовых соединений с чистым  $\text{CO}_2$  и иметь точность не хуже  $1 \text{ мкмоль кг}^{-1}$ . Данный спектрометрический метод использует недисперсионный инфракрасный анализатор для обнаружения  $\text{CO}_2$ , который также должен входить в состав оборудования.

Постоянное парциальное давление  $\text{CO}_2$  в поверхностных водах измеряется с помощью балансировочной системы. Измерения проводятся на воздухе в заборнике с давлением компенсирующем давление газа в морской воде. Дальнейший анализ включает применение системы пламенно-ионизационной хроматографии. Большинство существующих систем анализируют  $\text{CO}_2$  с помощью ИК-детектора и используют два или три стандартных газа для калибровки системы, которая производится примерно каждый час. Это принципиально при проведении частых измерений парциального давления. Также необходимо проводить одновременные измерения  $p\text{CO}_2$  в воздухе, чтобы можно было определить поток  $\text{CO}_2$  между воздухом и поверхностными водами.

Детальное описание всех методик, связанных с определением параметров карбонатной системы вод морей и пресноводных водоемов приводится в Milego (2006) и DOE (2005).

### 3. Рекомендации по формированию массивов данных и частоте наблюдений

Все поименованные виды наблюдений основываются на различной приборной базе и методах и генерируют различные по типу и объемам данные, сохраняемые в различных форматах. Дальнейшее использование данных пульсационных и камерных наблюдений предполагает их совместный анализ с данными дистанционного зондирования. Метеорологические наблюдения используются как для интерпретации наблюдений над потоками, так и для уточнения параметризаций. Наконец, данные о характеристиках **и свойствах растительности и почвы, химическом составе образцов растительности и почвы и воды** используются для расчета запасов углерода.

В каждом разделе методических рекомендаций приводится краткая информация о рекомендуемой частоте измерений различных параметров и рекомендуемых форматах сохранения данных. В данном разделе она консолидирована в Таблице 2, включающей информацию о частоте измерений, видах данных, необходимыми для сохранения и передаче в центр сбора информации.

Таблица 2. Требования к формированию массивов данных и частоте наблюдений

Вид наблюдений	Рекомендуемая частота проведения измерений для разных параметров	Сохраняемые данные	Форматы данных, передаваемых в центр сбора информации	Примечание
Метеорологические наблюдения	1 час для всех параметров в случае использования метеостанции без автоматической регистрации информации 1-10 мин для станций с автоматической регистрацией	Температура воздуха Влажность воздуха Скорость и направление ветра Атмосферное давление, Суммарная солнечная радиация, Количество и интенсивность осадков, Температура и влажность почвы	ASCII, CVS Часовые данные для всех параметров	

	1-6 часов для визуальных наблюдений	Температура поверхности воды Визуальные определения облачности и текущей погоды		
Пульсационные измерения потоков парниковых газов	1-3 раза в сутки временными сериями не менее 20 минут	Ко-спектры и интегральные оценки Турбулентные потоки CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O (при наличии газоанализирующей аппаратуры) Турбулентные потоки импульса, испарения (скрытого тепла), явного тепла	ASCII, CVS для интегральных оценок (передаются), netCDF для спектров (не передаются)	
Камерные наблюдения за потоками парниковых газов	1-6 раз в сутки стационарно (при использовании стационарных камер) или на маршрутных сериях (при использовании переносных камер) с осреднением 30 минут	Суммарные потоки CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O (при наличии газоанализирующей аппаратуры)	ASCII, CVS для осредненных оценок (передаются), ASCII для исходных рядов (не передаются)	
Наблюдения за свойствами и подстилающей поверхностью с помощью БПЛА	1-2 раза в месяц при площади облета < 20 га	Ортофотоплан RGB Ортофотоплан CIR/NDVI Цифровая Модель Местности Цифровая Модель рельефа Биомасса, углерод, энергетический потенциал блоков (см. Табл. 1)	RGB (для векторной графики), netCDF для количественных характеристик	
Свойства растительности и почвы, химического анализа образцов растительности, почвы и	2 раза в сезон с отбором проб в 5-50 точках	валовое содержание углерода и азота стабильные изотопы лёгких элементов (углерод, водород, кислород, сера, азот и т.д.) стабильные изотопы водорода и кислорода в водных	ASCII, CVS Данные по маршрутам отбора проб передаются ежегодно.	

ВОДЫ		образцах запас элементов в компонентах экосистем (растительности и почве) фракции фитомассы и удельной плотности почвы на горизонтах		
Результаты анализа образцов атмосферного и почвенного воздуха	2 раза в сезон с отбором проб в 5-50 точках	Характеристики газового состава проб	ASCII, CVS Данные по маршрутам отбора проб передаются ежегодно	

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подготовленный документ объединяет основные рекомендации по проведению измерительных работ на карбоновых полигонах пилотного проекта. При этом надо понимать, что данный документ не может заменить технические руководства пользователя, которые являются составными частями поставки комплектов оборудования. Более того, данные руководства точно адаптированы к конкретным моделям оборудования (что особенно принципиально для пульсационных и камерных наблюдений) и именно они должны использоваться для проведения наблюдений и инсталляции приборов в каждом конкретном случае. Это в частности касается использования для проведения пульсационных измерений акустических анемометров МЕТЕК вместо GILL, а также анализаторов Picarro вместо LI-COR. Аналогична ситуация и с проведением метеорологических наблюдений, для которых вариабельность аппаратуры значительно больше, чем для газоанализаторов или пульсационных измерителей. В этом смысле данный документ задает рамочные требования к проведению измерений. Его назначение - дать представление о составе наблюдений и об основных принципах их организации. При этом для ключевых типов наблюдений (пульсационные измерения потоков парниковых газов и наблюдения с помощью автоматических камер) мы приводим технические документы (ПРИЛОЖЕНИЯ 1 и 2), близкие по смыслу к руководствам пользователя, но не заменяющие их.

Мы уверены, что данный документ будет полезен участниками пилотного проекта, реализуемого Министерством науки и высшего образования России. В дальнейшем документ будет ежегодно обновляться, в том числе и учетом рекомендаций операторов полигонов и будет доступен на сайте пилотного проекта.

## ЛИТЕРАТУРА

- Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Мамкин В.В. Метод турбулентных пульсаций Краткое практическое руководство //LI-COR Biosciences - ИПЭЭ РАН: Москва, 2016. 223 с.
- Aubinet, M., Vesala T. and Papale D. (Eds.). Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. Springer, Dordrecht, London, New York, 2012. 442 pp.
- Blomquist, B.W., B. J. Huebert, C.W. Fairall, L, Bariteau, J. B. Edson, J. E. Hare, W. R. McGillis, 2014: Advances in Air–Sea CO<sub>2</sub> Flux Measurement by Eddy Correlation. *Boundary-Layer Meteorol* (2014) 152:245–276, DOI 10.1007/s10546-014-9926-2
- Bradley, F., and C. Fairall, 2006: A guide to making climate quality meteorological and flux measurements at sea. NOAA Technical Memorandum OAR PSD-311, NOAA ESRL, Boulder, Colorado, 209 pp.
- DOE Handbook of Methods for the Analysis of the Various Parameters of the Carbon Dioxide System in Sea Water, version 2.0; Dickson, A. G., Goyet, C., Eds.; Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Department of Energy: Oak Ridge, TN, 2005 (<http://cdiae.ornl.gov/oceans/pubs>).
- Leuning, R., and M. J. Judd (1996), The relative merits of open-and closedpath analysers for measurement of eddy fluxes, *Global Change Biol.*, 2(3), 241–253, doi:10.1111/j.1365-2486.1996.tb00076.x
- Millero F.J. The marine inorganic carbon cycle // *Chemical Rev.*– 2007.– v.107, No 2.– P.308-341
- McGillis, W. R., Edson, J. B., Ware, J. D., Dacey, J. W. H., Hare, J. E., Fairall, C. W., and Wanninkhof, R.: Carbon dioxide flux techniques performed during GasEx-98, *Mar. Chem.*, 75, 267–280, [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(01\)00042-1](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(01)00042-1), 2001.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Инструкция по измерению потоков энергии и климатически активных газов методом вихревой ковариации с использованием пульсационной аппаратуры и газоанализаторов

(Адаптированный перевод документа ICOS Ecosystem Instructions «TURBULENT FLUX MEASUREMENTS OF CO<sub>2</sub>, ENERGY AND MOMENTUM» в редакции от 23.08.2022, ICOS ETC, 2022)

#### 1. Введение

Метод вихревой ковариации (ВК) позволяет рассчитывать турбулентные потоки импульса, энергии и массы, включая потоки климатически активных газов. Основными измеряемыми переменными являются горизонтальная и вертикальная скорость ветра, направление ветра, плотность и другие переменные, используемые для расчета потоков, но не связанные напрямую с этапом измерения (например, температура и давление воздуха). Переменными, измеренными в вертикальных профилях и используемыми для расчета изменений в аккумулярующих потоках, являются концентрации CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O. Настоящий документ описывает конкретные технические шаги, необходимые для проведения измерений от установки датчиков до сбора данных, включая техническое обслуживание, калибровку и представление данных. Основные блоки инструкции включают:

Настройка системы: описание датчиков и пошаговые инструкции для их установки, проведения измерений и сбора данных.

Техническое обслуживание и калибровка: рекомендации по техническому обслуживанию и калибровке, включая сроки и способы ремонта отдельных блоков.

Подготовка данных: краткое изложение рабочего процесса сбора и консолидации данных, включая метаданные и вспомогательные параметры.

#### 2 Датчики и необходимые материалы

Основными блоками аппаратуры для проведения измерений (рис. 1) являются следующие:

Акустический анемометр: горизонтально-симметричный исследовательский ультразвуковой анемометр, модель Gill HS-100 или HS-50 (Gill Instruments Ltd, Лимингтон, Великобритания). Это неортогональный 3-осевой анемометр с горизонтальной головкой из нержавеющей стали. Головка анемометра содержит встроенный инклинометр (номинальная точность  $\pm 0,3^\circ$  от  $-10^\circ$  до  $+10^\circ$  наклона).

Газоанализатор: недисперсионный инфракрасный (NDIR) абсорбционный анализатор, также известный как инфракрасный газоанализатор – IRGA, модель LI-7200 (LICOR Biosciences, Линкольн, США). Это высокопроизводительный недисперсионный инфракрасный анализатор CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O с замкнутым трактом, разработанный для использования в системах измерения потока ЕС. Он использует замкнутую ячейку выборки пути. В отличие от других инструментов с закрытым трактом, LI-7200 предназначен для использования с короткой воздухозаборной трубкой (рис. 2).

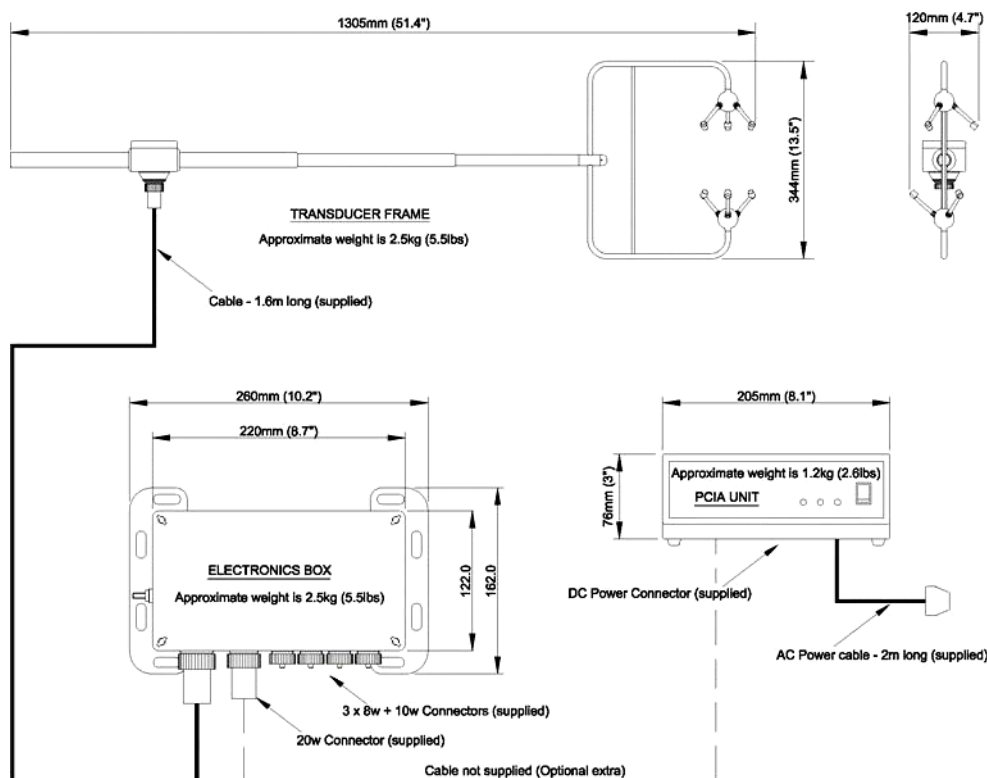


Рисунок 1. Инструкция по установке акустического анемометра типа Gill HS-100

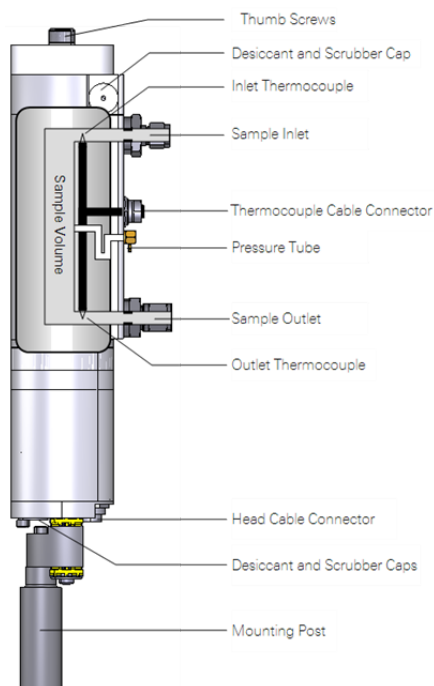


Рис. 2. Схема устройства газоанализатора LI-7200.

Дополнительные элементы для акустического анемометра включают электронный блок, который поставляется производителем вместе с прибором (рис. 1), т. е. рекомендуемым, но не обязательным, является также использование блока питания и интерфейса связи. Кроме того, в очень холодном климате можно использовать дополнительную нагревательную ленту, чтобы избежать/уменьшить обледенение. Электронный блок содержит электронику



прибора для сбора данных, встроенной обработки и передачи. Он должен быть установлен на расстоянии кабеля от звуковой головки. Интерфейс питания и связи (PCI) необходим для питания прибора и преобразования сигнала из формата RS-422, отправляемого электронным блоком, в формат RS-232. Это внутреннее устройство, поэтому для его размещения должен быть обеспечен надлежащий корпус. Возможны альтернативные подходы к питанию датчика и сбору данных, например, прямое использование выхода датчика RS-422 или преобразователя в RS-232, при условии, что они обеспечивают однородность и целостность сбора данных. В случае, если регистратор SmartFlux2 от LICOR используется для сбора данных со звукового и IRGA, использование Gill PCI не требуется и не рекомендуется, так как и мощность датчика, и передача сигнала обрабатываются регистратором напрямую.

Нагревательная лента используется при очень низких температурах, чтобы избежать образования снега, льда или инея. Необходимо следить за тем, чтобы (i) нагревательная лента не влияла на обтекание конструкции датчика и (ii) чтобы головки датчиков не нагревались выше пределов диапазона рабочих температур, указанного производителем. Нагревательная лента должна быть подключена к контроллеру для регулирования мощности и обеспечения возможности включения тепла в случае необходимости и выключения в нерабочее время, а также регистрации периодов нагрева.

Платиновый термометр сопротивления (PRT) представляет дополнительный датчик, устанавливаемый рядом со звуковой головкой для измерения абсолютной температуры. Датчик должен иметь разрешение  $0,01^{\circ}\text{C}$  и точность  $<\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  (диапазон: от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ );  $<\pm 0,15^{\circ}\text{C}$  (диапазон от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ ). Чистый экран датчика обязателен для PRT, чтобы защитить его от излучения. Белый экран (двойной цилиндр) с принудительной вентиляцией ( $5 - 7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) необходим для обеспечения надлежащей циркуляции воздуха. Объем экрана должен быть достаточно большим, чтобы гарантировать циркуляцию воздуха, но достаточно маленьким, чтобы уменьшить риск искажения потока в звуковом анемометре. Для корпуса должны использоваться материалы, не адсорбирующие или не десорбирующие жидкую воду и водяной пар (например, пластиковые материалы).

Помимо самого IRGA, система отбора проб газа (GSS) состоит из линии отбора проб, доставляющей пробу воздуха из точки отбора в ячейку анализатора. GSS состоит из впускного дождевика, фильтра, пробоотборной трубки, IRGA, буфера, регулятора расхода и насоса, выход которого возвращается на открытый воздух. Трубка для отбора проб поставляется компанией LICOR вместе с LI-7200 и важным является использование именно этой штатной трубки. Должна использоваться только последняя версия трубки с подогревом, которая входит в комплект LICOR 7200-040 и 7200-050 (внутренний диаметр = 5,33 мм; общая длина 71,1 см. См. рис. 3). Крышка от дождя включает в себя экран, защищающий от насекомых и поставляемый LICOR с LI-7200. Она должна быть установлена на входе в трубку. Компания LICOR поставляет с LI-7200 фильтр из нержавеющей стали Swagelok® FW с диаметром пор 2 мкм, размещенный в трубке, чтобы предотвратить попадание аэрозолей в анализатор, сводя к минимуму возмущения воздушного потока и измерения концентрации.

Объем буфера и его использование определяются следующим образом. В случае использования одного из двух встроенных модулей, подходящих для LI-7200 (LI 7200-101 или 102), буфер не требуется. В качестве альтернативы должен присутствовать буфер объемом около 5 литров, расположенный между регулятором расхода и насосом, необходимый для ослабления колебаний давления, вызванных насосом. Рекомендуются сферические буферы, также допускаются расширенные буферы вдоль направления потока отбора проб.

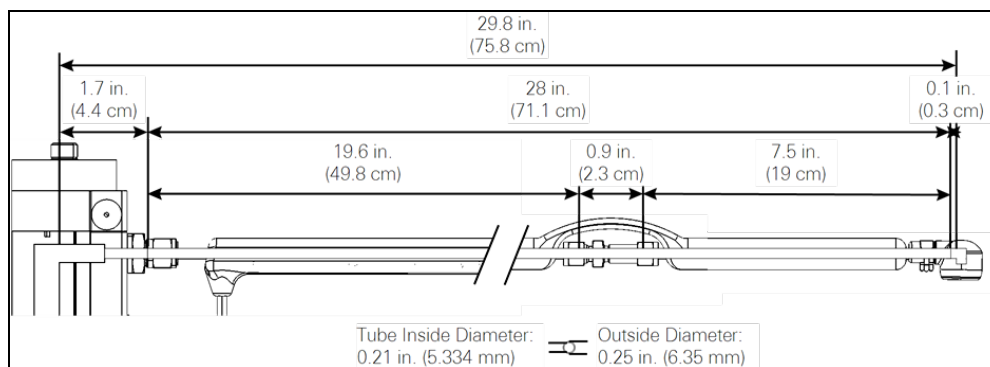


Рисунок 3. Схема последней версии обогреваемой трубки 7200. Источник: (<https://www.licor.com/documents/tgzng1d9wj50qxpm26a25gn5jbp8z6h>)

В случае использования LI 7200-101 или LI 7200-102 используется встроенный контроллер потока. Модуль потока обеспечивает постоянный расход от 10 до 18 литров в минуту при перепаде давления от 0,5 до 4,5 кПа соответствует скорости потока на уровне 12 литров/мин. Регулятор потока должен поддерживать скорость в диапазоне от 12 до 15 литров в минуту. Рекомендуется использовать термостат для предотвращения повреждений при отключении потока.

В случае использования LI 7200-101 или LI 7200-102 необходимо использовать насос с вентилятором, которые входят в комплект, поэтому нельзя использовать другие насосы или вентиляторы. Насос должен обеспечивать скорость потока более 9,6 л/мин, его производительность должна значительно превышать номинальную скорость потока, выбранную для системы. Бесщеточные насосы являются оптимальными. Насос должен вентилироваться во избежание перегрева. Водосборник (для него рекомендуется автоматическое опорожнение) должен быть размещен между головкой анализатора и насосом или регулятором расхода. Также в случае использования LI 7200-101 или LI 7200-102 можно использовать водосборник и разместить его непосредственно перед воздушным фильтром LI 7200-101/102.

Головка LI-7200 снабжена двумя тонкопроволочными термопарами, измеряющими температуру воздуха на входе и выходе из ячейки. Только датчики, поставляемые LICOR (номер по каталогу 9972-007), считаются соответствующими требованиям. Газоанализатор IRGA также оснащен двумя датчиками давления, один в LI-7550 и один в головке LI-7200. Это встроенные датчики, заменить которые невозможно. Два уплотнительных кольца используются в IRGA в месте вставки двух оптических окон. Они устанавливаются при покупке датчика и заменяются при каждой заводской калибровке по мере необходимости. В случае необходимости их также можно заказать отдельно (деталь 192-08408 Уплотнительное кольцо).

Блок интерфейса анализатора (AIU), также известный как LI-7550, содержит электронику прибора и питает LI-7200, отправляет информацию об измерениях, принимает и передает потоки данных. Блок интерфейса для соединения использует T-переход, который необходимо подключить к разъему в AIU, чтобы обеспечить передачу как сигнала нагрева трубки, так и сигнала модуля потока (если он используется). В случае использования AIU с серийным номером (SN) ниже AIU-1279, необходимы два разделенных кабеля для кабеля питания и кабеля связи.

### 3 Настройка прибора и сбор данных

Акустический анемометр и IRGA должны быть установлены желательно на мачте, при этом

два датчика должны быть установлены на поддерживающей стреле, прикрепленной к мачте, чтобы свести к минимуму помехи от мачты. Анемометр поставляется с держателем-стрелой. В случае объемных башен следует использовать удлинитель этой стрелы. Поддерживающая стрела для акустического анемометра и впускного отверстия газоанализатора должна быть направлена против преобладающего направления ветра. Ее ориентация должна быть указана в документации измерений.

Высота над пологом измерительной системы ( $h_m$ ) отождествляется с центром звукового анемометра, и ее значение зависит от высоты полога исследуемой экосистемы ( $h_c$ ). Для лугов, пахотных земель и кустарников с  $h_c$  не выше 1,75 м,  $h_m$  должно быть между [ $h_m = 1,67 \times h_c$ ] и [ $h_m = 6 \times h_c$ ]. Для лесных или более структурно сложных экосистем  $h_m$  должно быть между [ $h_m = 1,67 \times h_c$ ] и [ $h_m = 2 \times h_c$ ]. В любом случае,  $h_m$  не может быть ниже 2 м.

Для пахотных земель, лугов и плантаций с быстро и заметно меняющейся высотой полога или снежного покрова конструкция башни должна позволять изменять высоту системы вихревой ковариации. Высота измерения должна быть изменена в случае усиления роста растительности в течение сезона. Изменения высоты системы не должны происходить чаще, чем каждые 2 недели. Критерием того, как и когда изменить высоту системы вихревой ковариации, является поддержание значения [ $h_m - 0,67 \times h_c$ ] как можно более постоянным ( $\pm 10\%$ ) в течение периода измерения. Предполагая голую почву в начале вегетационного цикла и  $h_m = 2$  м, никаких изменений не требуется до тех пор, пока  $h_c$  не достигнет 1,2 м. В этот период также [ $h_m - 0,67 \times h_c$ ] не может быть постоянным. Тем не менее, рекомендуется начать увеличивать  $h_m$  до тех пор, пока растительность достигнет 1,2 м (например, около 0,5–0,8 м), а затем сохранить [ $h_m - 0,67 \times h_c$ ] эту величину постоянной.

Стрела акустического анемометра должна быть направлена в сторону от конструкции мачты. Минимальная длина стрелы зависит от максимального размера сечения башни. Для башен с максимальным сечением  $\leq 60$  см достаточно использовать акустическую штангу (которая должна не менее 85 см длиной). Для мачт с большими секциями стрела должна быть достаточно длинной, чтобы датчики были как минимум в 1,2 раза больше максимального размера секции. Например, для мачты  $2,5 \times 1,5$  м длина стрелы должна быть не менее 3 м. Никакие другие датчики или оборудование не должны устанавливаться на штанге, поддерживающей акустический анемометр и IRGA, и не должны находиться на расстоянии менее 1 м от центра акустического анемометра в любом направлении. При использовании удлинителей стрелы крепление должно быть достаточно жестким, чтобы исключить колебания измерительной системы даже при большой скорости ветра и загрязнении показаний анемометра.

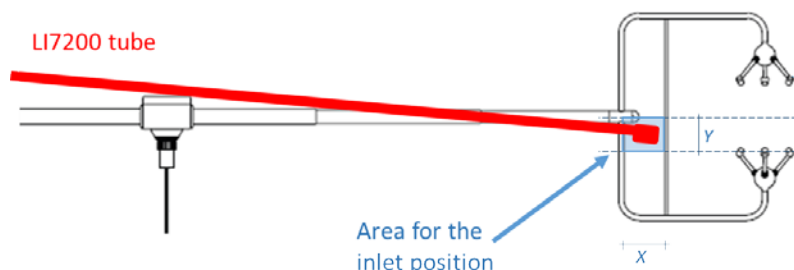


Рис. 4. Схема монтажа воздухозаборника LI7200. Дождевик должен быть помещен в светло-голубую область, указанную на схеме, между двумя вертикальными рычагами и между звуковой штангой и нижними датчиками

Положение входа относительно звукового анемометра должно контролироваться таким образом, чтобы центр (виртуальной) сферы, которая окружает IRGA, должен быть помещен в объем с размерами  $x=6,5 \times y=5 \times z=16$  см где  $X$  = расстояние между двумя вертикальными

звуковыми рукавами (см. рис. 4),  $Y$  = расстояние между горизонтальной стрелой и нижним уровнем датчиков (рис. 4),  $Z$  = диапазон допуска для оси горизонтальной стрелы (~8). Трубка должна быть закреплена на стреле, чтобы избежать колебаний и наклона в сторону впускного отверстия.

#### 4 Установка датчиков.

Для установки анемометра прикрепите головку к специальной штанге, закрепив ее на валу впереди и за распределительной коробкой. Убедитесь, что головка выровнена так, что верхняя сфера преобразователя находится непосредственно над нижней сферой преобразователя: используйте показания инклинометра, чтобы проверить это. Закрепите электронный блок в любом месте на расстоянии кабеля, убедившись, что разъемы находятся на нижней стороне. В случае развертывания модуля PCI используйте для его размещения водонепроницаемую коробку. Подключите звуковой анемометр к электронной коробке, затем подключите электронную коробку к PCI. Подключите PCI к системе регистрации через выход RS-232, а к источнику питания — с помощью кабеля, предоставленного производителем. Если блок PCI не используется, подключите выход RS-422 электронного блока напрямую к системе регистрации или используйте альтернативный преобразователь RS-232. Дополнительный датчик PRT внутри экрана, если он используется, должен быть размещен на задней части объема отбора проб во избежание помех. В этом нет необходимости, если датчик уже предусмотрен производителем внутри экрана. Экран можно использовать как опору для датчика: просто закрепите его на штанге с помощью подходящей опоры.

При монтаже IRGA установите дождевик с москитной сеткой на трубку, затем установите фильтр в трубку и установите трубку в головку. При установке фильтра обязательно соблюдайте направление, указанное стрелкой (воздух должен проходить в этом направлении). Установите головку IRGA на стрелу, мачту или другую опору, следя за тем, чтобы входное отверстие располагалось, как описано выше. Убедитесь, что трубка полностью вошла в фильтр. Установите дождевик с помощью прилагаемого зажима. Прикрепите всасывающую трубку к надежному креплению (например, к акустической штанге), чтобы анализатор не испытывал влияния своего веса. Наклоните головку IRGA в сторону входа (минимум на  $5^\circ$ ). AIU необходимо установить на расстоянии кабеля от головки IRGA, закрепив его на прочной конструкции мачты с помощью комплекта, предоставленного производителем. То же самое относится и к LI 7200-101 или LI 7200-102, если они используются. Если вместо этого используются другой насос и регулятор расхода, их необходимо разместить на расстоянии кабеля от головки и от AIU.

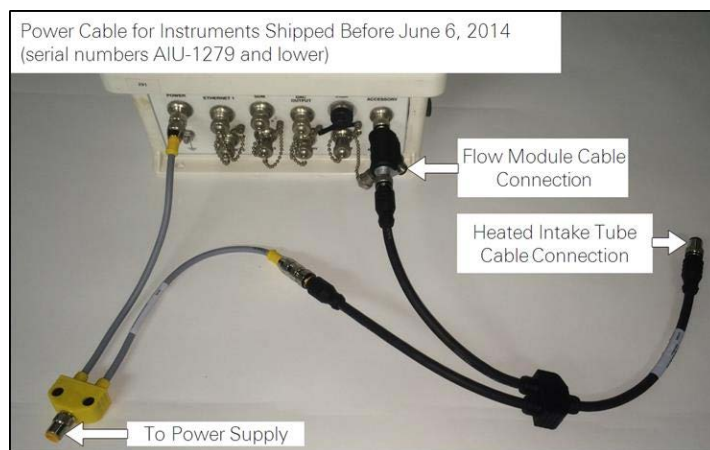


Рис. 5. Подключение кабеля к AIU с серийным номером ниже AIU-1279.

В корпусе должен быть установлен вентилятор, чтобы избежать перегрева насоса. Буферный объем должен быть размещен в безопасном месте между контроллером потока и насосом. Подсоедините головку датчика, напорную трубку и термопару к соответствующим штекерам LI-7550. Установите T-образное соединение в дополнительный порт и подключите модуль расхода LI 7200-101 или LI 7200-102 к IRGA через трубку к T-образному соединению. В качестве альтернативы можно подключить насос, буфер и регулятор расхода к системе, а также подключить соединитель впускной трубы с подогревом непосредственно к порту для принадлежностей, без переходника с T-образным соединением. Для старых блоков AIU используйте два кабеля-разветвителя, как показано на рис. 5, без переходника с T-образным соединением. Подсоедините силовые кабели к LI-7550 и к насосу - контроллеру потока или к модулю потока. При использовании AIU более ранней версии, чем SN AIU-1279, подключите разветвитель питания к кабелю питания, идущему к головке IRGA, затем один конец к разъему питания, а другой — к одному концу разъема последовательного кабеля. Затем подключите другой конец коммуникационного кабеля к порту для аксессуаров через T-образный переход, а сам кабель к головке IRGA (рис. 5). Установите мощность нагрева на 4 Вт. Подключите LI-7550 к каротажному оборудованию через порт Ethernet.

## **5 Сбор данных**

Необработанные данные необходимо собирать с частотой 10 Гц или 20 Гц, в зависимости от характеристик участка (например, высоты полога). В случае использования внешнего насоса можно собирать данные с более низкой частотой. Все данные должны быть собраны в цифровом виде, а потоки данных от двух датчиков должны быть максимально синхронизированы. По этим причинам рекомендуется собирать потоки данных от двух датчиков с помощью одного и того же регистратора или компьютерного устройства, используя проверенные системы, которые обеспечивают надлежащую синхронизацию и сбор всех запрошенных переменных.

Возможным решениям для достижения синхронизации являются захват акустического анемометра через порты RS-232 или RS-422 и IRGA через Ethernet на частоте, вдвое превышающей установленную частоту сбора данных, а затем их повторная дискретизация на желаемой частоте на основе часов регистратора. В качестве альтернативы можно использовать часы регистратора для опроса записей из буфера последовательного порта. Использование протокола SDM от Campbell Scientific в настоящее время не является оптимальным вариантом, поскольку он не является открытым исходным кодом и не все обязательные переменные передаются через это соединение. Аналоговые входы LI-7550 нельзя использовать для регистрации звуковых данных.

Данные должны храниться в 30-минутных ASCII-файлах (лучше, если они сжаты в формате .zip) или двоичных файлах (с соответствующим ASCII-заголовком, документирующим переменные и типы данных). В случае использования акустического анемометра его следует применять только в течение минимально возможного времени, необходимого для предотвращения или устранения образования льда. Информация о времени работы обогрева и его мощности должна быть задокументирована.

## **6 Техническое обслуживание и калибровка**

Акустический анемометр и головки датчика должны содержаться в чистоте, без наслоений мусора, отложений насекомых или птичьего помета. Частота очистки в разных условиях различна: наличие грязи необходимо проверять один раз в месяц, а очистку производить только при необходимости на основании визуального осмотра. Используйте только чистую или дистиллированную воду и не применяйте растворители или механическую силу.

Случайное присутствие льда также может быть удалено с особой осторожностью. Все периоды обслуживания должны быть указаны в файле метаданных. Система отбора проб газа IRGA требует технического обслуживания всех ее компонентов.

Если используются диафрагменные насосы, диафрагму следует менять один раз в год. Критерием замены фильтра является перепад давления, который должен поддерживаться на уровне ниже 9 кПа. В случае использования проточного модуля LI 7200-101 или LI 7200-102 рекомендуемое пороговое значение составляет 2,5 кПа, чтобы уменьшить расход насоса и износ. Тем не менее, возможно увеличить его до 4 кПа, в частности, на станциях с частым загрязнением, но следует учитывать, что в этом случае насос будет работать на пределе своих возможностей. Фильтр Swagelok FW и его детали можно очищать и использовать повторно. Когда фильтру требуется более трех чисток в месяц, его необходимо заменить на новый.

Рекомендуемая процедура очистки следующая:

- 1) Используйте чистый отфильтрованный сжатый воздух (воздух нулевой чистоты или сверхчистый азот) для выдувания крупных твердых частиц под давлением около 300 кПа в обратном направлении потока.
- 2) Промойте фильтр дистиллированной водой сначала в обратном направлении, а затем в прямом.
- 3) Используйте чистый сжатый воздух, чтобы выдуть крупные твердые частицы, около 300 кПа, сначала в обратном направлении, а затем в прямом направлении.
- 4) Дайте фильтру высохнуть не менее 24 часов в чистом и сухом месте.

При появлении следов коррозии/ржавчины на сетках фиксатора замените фильтр новым. Если перепад давления после очистки все еще выше 9 кПа (4 кПа, если используется модуль потока LI 7200-101 или LI 7200-102), возможны 2 варианта: (i) заменить фильтр на новый и (ii) помещение фильтра в ванну, наполненную химическим чистящим средством для посуды. Во втором случае оставьте в ванне примерно на два часа. Затем повторите шаги 2 и 3, а затем снова промойте в ванне, наполненной чистой дистиллированной водой, в течение одного часа. Повторите шаги 3 и 4. Снова проверьте перепад давления: если проблема не устранена, замените фильтр новым. Фильтр с более крупной сеткой предпочтителен на станциях, где часто бывают дожди, туманы и изморозь. В таких условиях привод насоса часто будет дрейфовать к своему максимуму, в то время как анализатор будет с трудом поддерживать выбранную скорость потока. При этом можно обернуть каким-либо пластиковым материалом. Важно, что более грубая сетка фильтра требует более частой очистки ячейки.

Насадку от дождя, так и сетку от насекомых необходимо регулярно очищать, чтобы уменьшить взаимодействие с водяным паром и грязью. При очистке фильтра снимите дождевик с защитной сеткой и продуйте его сжатым воздухом или водой. При необходимости дождевик с москитной сеткой можно опустить на несколько минут в кипящую воду или погрузить в ультразвуковую водяную баню. Если всасывающая трубка неплотно закреплена на головке IRGA, вода может попасть в ячейку и всю систему, что приведет к неверным показаниям и повреждению насоса. Рекомендуется проверка болта трубки при нулевых показаниях не реже одного раза в два месяца. Болт трубки нужно затягивать аккуратно, без усилия, но крепко. Кроме того, рекомендуется регулярная чистка впускной трубы. Необходимая частота зависит от размера и типа частиц, присутствующих на станции; однако рекомендуется выполнять очистку трубки при каждой полевой калибровке. Обычно для этого достаточно проволочной щетки и растворителя.

Оптическая ячейка анализатора должна быть очищена при выполнении калибровки. Ослабьте две рифленые ручки в верхней части головки датчика, а затем вытащите верхнюю

часть головки датчика из оптической скамьи. Используйте чистящие тампоны, прилагаемые к прибору, или мягкую безворсовую ткань. Для очистки окон можно использовать мягкое моющее средство или стеклоочиститель. Можно использовать мягкое мыло и воду, изопропиловый спирт, уксус или воду. При этой процедуре затеняйте оптические окна от прямых солнечных лучей светонепроницаемой тканью или рукой. Воздействие прямых солнечных лучей приведет к искусственному снижению уровня сигнала. При резком снижении уровня сигнала может потребоваться дополнительная чистка оптики.

Уплотнительные кольца, герметизирующие камеру вокруг зеркал, проверяются и заменяются по требованию производителя при любой заводской калибровке, например, каждые 2 года. Ожидается, что в нормальных условиях они сохранят герметичность намного дольше, чем 2 года. Однако агрессивные чистящие средства и суровые атмосферные условия (например, высокая концентрация соли, пыль и т. д.) могут повлиять на срок службы уплотнительных колец, вызывая попадание воды в ячейку вплоть до насоса. Обычно это приводит к искажению данных, а также может привести к серьезному повреждению насосной системы. По этим причинам рекомендуется следующая схема технического обслуживания:

- 1) Регулярно снимайте ячейку и выполняйте визуальный осмотр уплотнительных колец. В случае явных повреждений (потертости, наличие трещин) необходима их замена. Рекомендуется совмещать эту проверку с событием считывания нулевого показания и в любом случае выполнять эту проверку не реже одного раза в два месяца.
- 2) Рекомендуется регулярное нанесение тонкого слоя силиконовой смазки на уплотнительные кольца с интервалом не менее 6 месяцев. При нанесении силиконовой смазки необходимо следить за тем, чтобы она не попала на линзы зеркала.

В головке IRGA есть три небольших пластиковых флакона, каждый из которых содержит аскарит II и перхлорат магния, в верхнем и нижнем корпусах анализатора. Химические вещества следует менять один раз в год. В очень влажной среде замену следует производить каждые шесть месяцев. Порядок замены флаконов следующий:

1. Удалите флаконы с химикатами из нижнего корпуса анализатора в головке датчика. Снимите монтажный кронштейн с анализатора. Затем снимите винт с накатанной головкой и вкрутите его в колпачок. Потяните прямо, чтобы удалить заглушку.
2. Заполните бутылки наполовину *аскаритом II*, а затем перхлоратом магния.
3. Поместите *тефлоновую* мембрану в крышку.
4. Сначала вставьте заряженные флаконы в крышку корпуса анализатора. Замените крышки бутылок.
5. С помощью стопорного винта снимите крышку флакона на верхнем корпусе головки датчика и вставьте новый заряженный флакон крышкой вперед.
6. Установите на место крепежный винт крышки и снова прикрепите монтажный кронштейн. Избегайте калибровки IRGA в течение 72 часов после замены химикатов.

Калибровка акустического анемометра в полевых условиях невозможна и, следовательно, не требуется. Полевая калибровка газоанализатора IRGA должна выполняться не менее 4 раз в год после первой установки LI-7200. По прошествии одного года необходимо обеспечить как минимум одну калибровку в год до начала вегетационного периода. Возможны более частые полевые калибровки, если наблюдаются значительные дрейфы нуля. Идентификация значительных дрейфов должна основываться на концентрации CO<sub>2</sub> поскольку она более стабильна (дрейфы >30 мкмоль моль<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> считаются значительными). Избегайте калибровки в дождливые и ветреные дни. Выполнение «полевой» калибровки в лаборатории

допустимо, если демонтаж, калибровка и повторная установка могут быть выполнены в течение одного дня или если доступен откалиброванный запасной датчик для заполнения пробела в данных.

Заводские калибровки предполагают, что акустический анемометр необходимо отправлять на завод для калибровки каждые два года. В случае применения нагревательной ленты прибор необходимо повторно откалибровать на заводе с установленным нагревательным устройством. Газоанализатор IRGA необходимо отправлять на завод для калибровки также каждые два года. Заводская калибровка включает в себя, среди прочего: проверку дрейфа и стабильности; CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и калибровка давления (а затем новый набор полиномиальных коэффициентов); проверка датчиков температуры и модуля расхода (если используется); химическая замена; обновление программного обеспечения; различные виды технического обслуживания и ремонта по мере необходимости.

## **7 Ремонт и замена датчиков**

Некоторые мелкие повреждения могут быть легко устранены самостоятельно. К ним относятся следующие случаи:

1. Один из предохранителей в LI-7550 сгорает. Симптомы: аккумулятор или другой источник питания выходит из строя; нагретая впускная труба не включается или постоянно выдает ошибку. Проверьте предохранители и замените сгоревшие. Обязательно выберите правильную силу тока. Если проблема не устранена, проверьте кабель питания и подключение.
2. Обрыв одной из термопар температуры воздуха в головке LI-7200. Симптомы: сообщение об ошибке от LI-7200, неверное диагностическое значение, неправдоподобные значения средней температуры ячейки и одной из двух термопар (температурная ячейка внутри или снаружи). Замените сломанную термопару. Используйте одну из запасных термопар, предоставленных LICOR с IRGA.
3. Одно или оба уплотнительных кольца в ячейке израсходованы. Симптомы: неправдоподобные или ошибочные значения данных IRGA, в частности концентраций CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, характеристик воздушного потока, параметры насоса, силы сигнала; вода в трубке, ячейке, воздушном фильтре, насосе при визуальном осмотре, уплотнительные кольца представляют собой недостающие детали или выглядят изношенными при визуальном осмотре. В этом случае необходима замена обоих уплотнительных колец. Новые можно заказать в LICOR, купить на месте или даже сделать на станции. При этом необходимо уделить особое внимание тому факту, что размер должен быть точно таким же, как у оригинальных уплотнительных колец.

При проведении мелкого ремонта важно, что в случае операций, связанных с отсоединением электронных частей, таких как термопары, кабели и т. д., анализатор LI-7200 (коробка AIU LI-7550 и модуль расхода) должен быть выключен. Если система EC регистрирует данные в LICOR SmartFlux2, последний также должен быть отключен. Несоблюдение этой рекомендации приведет к неправильной отметке времени.



## НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОВЕДЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КАМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ.

Данный документ представляет собой адаптированный перевод рекомендаций Рабочей Группы по мониторингу экосистем ICOS в части стандартов автоматических камерных систем для измерений потоков климатически активных газов с поверхности почвы. Оригинал документа «*Standardisation of chamber technique for CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes measurements from terrestrial ecosystems*» (*Int. Agrophys.*, 2018, 32, 569-587, doi: 10.1515/intag-2017-0045).

### 1 Методы измерений и аппаратура

Существует несколько технических решений для проектирования автоматизированной камерной системы потоков CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O между почвой/экосистемой и атмосферой. Обычно они подразделяются на системы с открытой динамической камерой (стационарный проток) и закрытой динамической камерой (нестационарный проток). В открытых динамических камерах проба воздуха отводится из камеры в газоанализатор, а замещающий воздух с известной концентрацией газа направляется в камеру для поддержания равновесия давления. Во время закрытия камеры свободное пространство камеры достигает стационарной концентрации, по которой можно рассчитать поток. Закрытая динамическая камера работает в полностью закрытом режиме, в котором проба воздуха непрерывно всасывается из свободного пространства камеры в газоанализатор и возвращается обратно в камеру, а также измеряются непрерывные изменения концентрации ПГ в свободном пространстве камеры в течение короткого времени. Поток рассчитывается на основе этого изменения с использованием либо линейной, либо нелинейной модели подгонки.

Поскольку большинство камерных систем (как коммерческих, так и самодельных), используемых для измерения потоков ПГ, основаны на закрытом динамическом подходе, рекомендуемым стандартным методом является закрытая динамическая камерная система. Два различных способа организации отбора проб воздуха в закрытых системах: (1) система объединяет все необходимые газоанализаторы в полевых условиях, (2) автоматический сбор проб воздуха на месте, которые затем анализируются в лаборатории. Учитывая тот факт, что этот протокол направлен на предложение оптимальной инфраструктуры на период не менее 20 лет, мы рекомендуем автоматизированную камерную систему, включающую анализаторы ПГ, которую можно установить в полевых условиях, чтобы избежать трудоемких анализов в лаборатории и минимизировать эксплуатационные расходы. С другой стороны, ручные измерения по-прежнему рекомендуются для оценки пространственной неоднородности.

### 2 Конструкция камеры

Конструкция камеры и протокол измерений должны быть направлены на минимизацию недостатков камерных систем, *например*, изменений микроклимата внутри камеры, таких как радиация, осадки, температура, скорость ветра и попадание мусора. Особое внимание следует уделять равновесию давлений между верхним пространством камеры и окружающим воздухом, в частности, во время закрытия камеры, а также в течение всего периода измерения, когда пробы воздуха отбираются из верхнего пространства камеры, чтобы избежать смещения на камере.

Конструкция должна отвечать следующим требованиям и рекомендациям:

1) Цвет. Преимущество непрозрачных камер состоит в том, что в течение короткого периода закрытия <5 мин температура воздуха над головой не повышается так сильно, как в прозрачной камере, и, таким образом, сводится к минимуму непреднамеренное нагревание. Воздействия на компоненты почвы/растения. Если используются прозрачные камеры, вся камера (стенка и крышка) должна быть окрашена или покрыта оловянной фольгой для защиты от солнечного света. Рекомендуется покрасить его в белый матовый цвет, чтобы избежать возможного прямого отражения солнца на близлежащих датчиках излучения. Помимо непрозрачных камер, измерения в прозрачных камерах рекомендуются (но не являются обязательными) для облегчения количественной оценки вклада наземной растительности в чистый экосистемный обмен (NEE) на участках, где вклад наземной растительности имеет значение (вклад наземной растительности до NEE >10%).

2) Форма камеры обычно цилиндрическая или прямоугольная в поперечном сечении, хотя приемлема любая форма камеры. Цилиндрическая форма позволяет лучше смешивать замкнутый воздух, в то время как прямоугольная форма создает мертвое пространство в верхних углах камеры, где замкнутый воздух не может смешиваться должным образом.

3) Камеры должны быть изготовлены из непроницаемых и инертных материалов, *т.е.* поливинилхлорида (ПВХ), полипропилена (ПП), полиэтилена (ПЭ), акрилонитрила-бутадиен-стирола (АБС), политетрафторэтилена (ПТФЭ-тефлона), полиметилметакрилата (ПММА), нержавеющая сталь или алюминий. Внешний цвет камер должен быть белым.

4) Камеры должны быть оборудованы вентиляционным отверстием, чтобы избежать изменений давления при закрытии и открытии камер, а также во время периода измерений. Внутренний диаметр жерла зависит от объема камеры. Другим возможным решением является вентиляционная трубка для достижения равновесия давления в камере, в основном в ветреных местах.

5) Надлежащее смешивание воздуха должно быть обеспечено в свободном пространстве камеры. Это может быть достигнуто за счет воздушного потока между камерой и анализатором ПГ (большинство коммерческих систем) или путем установки вентилятора/вентиляторов внутри камеры для достижения движения воздуха, аналогичного внешней средней скорости ветра вблизи поверхности земли. Оптимальной представляется система, в которой вентиляция камеры следует за средней скоростью ветра за несколько минут до начала измерений. При постоянной скорости вентилятора вентиляция должна быть мягкой и не слишком сильной, считается, что избыточное движение воздуха внутри камеры разрушает высокий ламинарный пограничный слой над почвой. Средняя скорость движения воздуха внутри камеры должна быть менее  $\text{мс}^{-1}$ ; измеряется в четырех точках поперек камеры и на половине высоты камеры. Основной поток воздуха не должен быть направлен в сторону почвы, чтобы предотвратить нежелательное подавление диффузии газа из почвы в атмосферу камеры или во избежание вымывания почвенного воздуха в надпочвенное пространство. Визуализировать движение воздуха внутри камеры можно с помощью небольшого источника дыма (например, сигареты).

Другая возможность заключается в контроле скорости вентилятора в зависимости от внешних ветровых условий с помощью чувствительного ультразвукового анемометра, установленного близко к земле, чтобы иметь одинаковые условия внутри и снаружи камеры. В этом случае скорость вентилятора не должна изменяться при одном измерении одной камеры – рекомендуется средняя скорость, рассчитанная по предыдущей примерно 2-минутной скорости ветра. Эффект Вентури — это снижение давления жидкости,

возникающее при протекании жидкости через суженный участок трубы. Его следует исследовать для каждой конструкции камеры, при включенной вентиляции камеры. Взаимодействия между эффектами Вентури и внутренней вентиляцией сложны и до конца не выяснены. Поскольку турбулентность может вызвать колебания давления над голой почвой (без развернутой камеры), что может увеличить перенос газа, конструкция камеры может модифицировать эти колебания в обоих направлениях. Оптимальной представляется система, в которой вентиляция камеры следует за средней скоростью ветра за несколько минут до начала измерений.

Система вентиляции должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) Введение манжеты должно обеспечивать хорошее уплотнение камеры с почвой, однако в то же время необходимо свести к минимуму срез поверхностной корневой зоны, чтобы избежать эффекта траншеи.
- 2) Влияние конструкции камеры на дождь и добавление/распределение удобрений внутри измеряемой площади должно быть сведено к минимуму, насколько это возможно, с помощью надлежащей конструкции и графика измерений.
- 3) Во избежание повреждения или срезания растительности внутри воротника при закрытии камеры (например, пастбищ и пахотных земель) рекомендуется использовать тонкую металлическую сетку, расположенную по внутренней окружности воротника.
- 4) Если планируется закрыть камеры на длительное время ( $> 30$  мин) из-за измерения  $N_2O/CH_4$ , рекомендуется принять во внимание, что глубина вводного кольца обычно является функцией времени закрытия. Поэтому необходимо увеличить глубину захода манжеты при ее установке.
- 5) Впускные патрубки (трубы) должны располагаться не менее чем на  $\frac{1}{2}$  высоты камеры и должны быть снабжены сеткой или фильтром для предотвращения попадания насекомых в измерительную систему. Если трубка длиннее прилбл. 10 м необходимо повторно проверить его проницаемость для измеряемых газов. Во избежание повреждений камерная система должна находиться на огороженной территории в местах, часто посещаемых крупными животными (крупный рогатый скот, овцы, кабаны, олени, медведи и т.д.).

### 3. Вспомогательные измерения

Каждая камера должна быть оснащена датчиками для измерения следующих переменных, интервал регистрации которых должен быть скоординирован с выборкой анализаторов в диапазоне от 0,1 до 1 Гц. Положение датчика температуры воздуха не должно быть слишком близко к стенку или крышку для предотвращения смещения значений из-за поверхностного нагрева материала камеры. Его основная цель – измерение колебаний температуры во время закрытия. Датчик должен быть защищен от прямого солнечного света. Эти данные необходимы в процессе расчета потоков. Температура почвы должна измеряться внутри каждого воротника; глубина этих измерений зависит от типа экосистемы и почвы. Для  $CO_2$  мы рекомендуем оценивать надлежащую глубину для синхронизации суточных изменений температуры почвы и выделения  $CO_2$ . Однако, после обязательного измерения температуры почвы в верхнем слое почвы, одно измерение на глубине 5 см является обязательным, а одно измерение как можно ближе к поверхности почвы не является обязательным. Датчик содержания влаги в почве должен быть установлен рядом с каждым воротником, когда используется небольшая камера или внутри больших камер. Глубина измерения должна быть близкой к поверхности почвы (5 см) для  $CO_2$  и соответствовать рекомендациям производителя датчика.

### 4. Почвенные манжеты

Манжеты требуются для обеспечения воздухонепроницаемого уплотнения между камерой и поверхностью почвы, а также для обеспечения достаточной устойчивости камеры. Почвенные воротники или рамы для автоматических камерных измерений должны состоять из инертных, непроницаемых и нереакционноспособных материалов т.е. из ПВХ, полипропилена, полиэтилена, АБС, ПТФЭ-тефлона, ПММА или нержавеющей стали. Конструкция и размер воротников должны сводить к минимуму нарушения корневой системы и укрытия от дождя, опада или внесения удобрений. Поскольку оптимальная конструкция воротника зависит от типа экосистемы, в соответствующих разделах (Спецификации для типов экосистем) приведены дополнительные характеристики. Чтобы свести к минимуму нарушение почвы и корней, крайне важно вводить кольца как можно глубже в почву. Глубина заделки должна учитывать пористость верхнего слоя почвы, так как более высокая пористость требует более глубокой заделки. В экосистемах без постоянного укоренения растений (например, на пастбищах) минимальная глубина заделки должна составлять 0,03 м, а максимальная — 0,15 м в зависимости от типа экосистемы и глубины укоренения, чтобы свести к минимуму повреждение корней или подрезку. В экосистемах с постоянным укоренением растений (например, в лесных экосистемах) кольца следует размещать поверх слоя гумуса и только плотно, но аккуратно вдавливать в гумус, чтобы не перерезать корни. Затем кольца должны быть надежно закреплены в минеральной почве с помощью специальных анкерных винтов, которые можно регулировать в зависимости от развития корневой системы. После установки почвенных воротников можно начинать измерения ПГ. Полученные данные должны быть проанализированы на предмет влияния введения ошейника (нарушения) в измеренных потоках на основе опыта главного исследователя (PI).

## **5. Требования к анализаторам ПГ**

Для обеспечения стандарта качества камерных измерений будет определена определенная шкала диапазона, точности и точности прибора. Одним из наиболее важных параметров анализатора является кратковременная стабильность, которая представляет собой дрейф базовых концентраций в течение нескольких минут. Диапазон измерения должен охватывать все концентрации контролируемых ПГ, которые могут появиться в течение времени измерения. Большинство инфракрасных газоанализаторов измеряют также содержание водяного пара. Другими словами, вместо сухого воздуха регистрируются концентрации ПГ во влажном воздухе из-за отсутствия автоматического применения поправки на разбавление водяного пара. Автоматические измерения с помощью высокоточного квантово-каскадного абсорбционного лазерного спектрометра (QCLAS) для  $N_2O$  в полевых условиях требуют закрытия камеры всего на несколько минут, даже когда потоки ниже. Очень малые потоки  $CH_4$ , варьирующиеся от поглощения до выбросов, могут быть обнаружены высокоточными анализаторами за короткое время закрытия. Поэтому рекомендуется минимальное время закрытия 5 минут, чтобы обеспечить точное измерение даже очень низких потоков. Использование системы, способной измерять соотношение компонентов смеси  $N_2O$ ,  $CH_4$  и  $CO_2$  в полевых условиях, должно обеспечивать непрерывные измерения для каждой камеры по крайней мере каждые два часа.

## **6. Тесты системы**

Следующие тесты должны быть выполнены для самодельных автоматизированных систем камеры.

1) Проверка герметичности. Каждая камера и измерительная система должны быть проверены на герметичность. Контрольное измерение может быть выполнено в полевых или

лабораторных условиях при условии, что концентрация газа, используемого для проверки утечек, близка к условиям окружающей среды (около 400 частей на миллион для CO<sub>2</sub>). Для испытания камеры на герметичность должна быть изготовлена специальная рама, герметичная на дне камеры (например, установленная на металлическом или пластиковом листе, из которого была изготовлена камера). Затем камера устанавливается на раму так же, как и при полевых работах. CO<sub>2</sub> концентрацией впрыскивается в камеру для достижения концентрации, аналогичной той, что была в конце полевых измерений (или выше) (обычно целевой концентрацией может быть концентрация в окружающей среде плюс приблизительно 400 частей на миллион, в зависимости от типа экосистемы). Затем концентрация CO<sub>2</sub> внутри камеры контролируется с интервалом в 10 с в течение 5 мин, что является стандартным временем измерения (обычно от 2 до 5 мин в случае камерных систем измерения CO<sub>2</sub>, может быть больше для CH<sub>4</sub> и системы измерения N<sub>2</sub>O). Изменение, вызванное возможной утечкой, должно быть ≤ 3% от измеренного потока. Это испытание следует проводить отдельно для всех измеряемых газов: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O.

2) Влияние изменений давления при закрытии камеры. Даже небольшая разница давлений между верхним пространством камеры и атмосферой, всего 1 Па, было показано, что они вызывают значительные ошибки в измерении выброса CO<sub>2</sub>. Это испытание может быть реализовано во время описанного выше испытания на герметичность с использованием уплотненной нижней рамы. Разность давлений между верхним пространством камеры и атмосферой следует постоянно контролировать в течение всей работы камеры, включая ее закрытие. Избыточное давление при закрытии камеры должно быть менее 10 Па и менее 0,1 Па во время измерения. В случае избыточного давления во время закрытия камеры рекомендуется дополнительный активный клапан уравнивания давления, чтобы предотвратить изменение давления во время закрытия камеры. Поэтому в верхней части камеры следует сделать отверстие диаметром около 5 см. Отверстие должно автоматически закрываться крышкой через несколько секунд после закрытия камеры. Эффекты давления, вызванные закрытием камеры, должны отслеживаться с помощью датчика перепада давления на этапе тестирования системы, документироваться и проверяться, чтобы облегчить надежные измерения камеры.

3) Тестирование влияния интенсивности дождя. Влияние конструкции камеры на дождь внутри измеряемой площади должно быть проверено и задокументировано в полевых условиях на открытой местности, а не под пологом леса, перед установкой системы. Ряд явлений дождя следует изучать с помощью по крайней мере двух простых ручных пробоотборников дождя, один из которых будет помещен внутри камеры, а другой достаточно далеко от системы камер, чтобы их можно было рассматривать как независимые и не подверженные влиянию камеры. Все пробоотборники будут регулярно считываться и опорожняться. Испытание должно проводиться с минимум 2 камерами, 3 событиями дождя и сбором не менее 20 мм совокупного количества осадков. Должны быть проведены следующие измерения:

- камеры постоянно открыты (влияние стеллажа и поднятой камеры);
- камеры будут закрываться на 3-10 минут каждый час (в соответствии с обычным графиком измерений в полевых условиях).

Если произойдет отклонение от невозмущенного количества осадков более чем на 20%, конструкция камеры не будет принята для длительных измерений в рамках ICOS.

4) Проверка затенения от солнечного излучения. Эффект затенения открытой камеры от солнечного излучения должен быть проверен в полевых условиях на открытой площадке (без навеса). Датчик ФАР следует размещать в средней части воротника, а второй датчик ФАР

следует размещать снаружи воротника, достаточно далеко от системы камер, чтобы их можно было рассматривать как независимые и не подверженные влиянию камеры. Измерение следует проводить как минимум в течение двух полных дней, включая пасмурный и солнечный день. Если разница в дневных суммах ФАР между двумя датчиками составляет более 20%, конструкция камеры не будет принята для долгосрочных измерений в рамках ICOS. Тем не менее, камера должна быть ориентирована так, чтобы свести к минимуму возможное затенение конструкции камеры и ее компонентов в зоне измерения, когда камера открыта. Проверка влияния вентиляции на перемешивание воздуха

## **7. Пространственно-временные характеристики серий измерений.**

Автоматизированная система камер позволяет изучать динамику обмена ПГ с высоким временным разрешением в течение длительных периодов времени, но из-за ограниченного количества автоматических камер невозможно полностью изучить пространственную изменчивость в полном объеме. В качестве требуемого минимального количества для автоматических камерных систем было выбрано пять точек/камер для отбора проб, в зависимости от типа и распространенности растительности. Кроме того, камеры должны охватывать основные репрезентативные части поверхности почвы в соответствии с изучаемой экосистемой. В случае отсутствия преобладающего направления ветра можно установить камеры в четырех разных квадрантах вокруг башни.

Для количественной оценки пространственной неоднородности потоков ПГ рекомендуется съемка с ручной камеры. Чтобы свести к минимуму воздействие камеры на почву и лучше покрыть пространственную изменчивость, автоматизированная система камер должна состоять из вдвое большего количества муфт, чем камер, чтобы каждая камера вручную перемещалась между минимум двумя муфтами не реже одного раза в год. Однако не все муфты следует перемещать одновременно, как показано в следующем примере, где пять камер перемещаются между десятью муфтами за четыре этапа. Перемещение только двух или трех камер за один шаг гарантирует непрерывные данные для других камер и возможность соотносить потоки от разных муфт друг с другом. Для «расслабленных положений» следует изготовить комплект специальных коротких воротников, чтобы свести к минимуму влияние физических свойств, таких как попадание солнечной радиации, осадков и подстилки. Роль «расслабляющих муфт» заключается в том, чтобы сохранить исходное положение измерения и свести к минимуму нарушение почвы (срезание корней) после переустановки измерительной муфты в исходное положение. Высота релаксирующего воротника должна быть равна месту введения мерного воротника. Это означает, что верхний край релаксирующей манжеты должен находиться на одном уровне с поверхностью почвы. Для облегчения видимости положения расслабления рекомендуется отмечать каждое положение небольшим флажком с направлением на север примерно в 20 см от воротника.

## **8. Временная стратегия отбора проб**

Автоматизированные камерные системы позволяют изучать динамику потоков ПГ с высоким разрешением в течение продолжительных периодов времени. Поэтому предполагается, что мониторинг будет осуществляться в течение всего вегетационного периода. Минимальное временное разрешение для отдельных измерений потоков ПГ должно составлять одно измерение в час/на газ в каждой камере. Использование системы, способной измерять соотношение компонентов смеси  $N_2O$ ,  $CH_4$  и  $CO_2$  в полевых условиях, должно обеспечивать ежечасные измерения в каждой камере в день. При большем количестве камер (более пяти) минимальное временное разрешение для всех измеряемых ПГ может быть увеличено до 2 ч на каждую камеру. В регионах, где зимний период характеризуется экстремальными

условиями окружающей среды (низкие температуры, высокий снежный покров и т. д.), автоматические измерения потоков ПГ в зимние месяцы не ожидаются.