



Оценка динамики баланса углерода для болот южно-таежной подзоны Западной Сибири (Томская область) на основе результатов многолетнего мониторинга запасов углерода и потоков парниковых газов

Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Веретенникова Е.Э., Дюкарев А.Г. Копысов С.Г., Прейс Ю.И., Гордов Е.П.

Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН

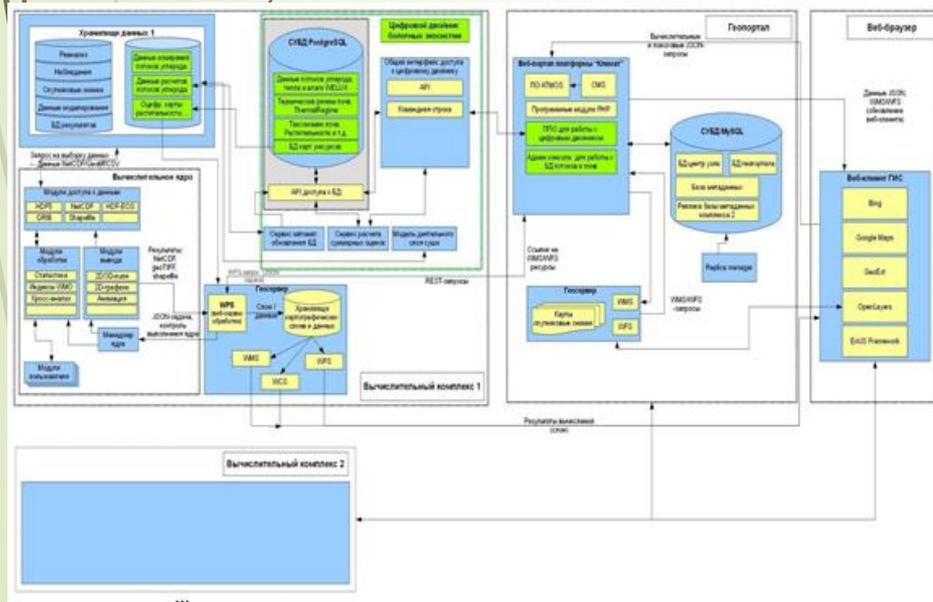
РИТМ
углерода

Проект нацелен на **создание сети мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов** в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири на основе **стандартизированной инфраструктуры мирового уровня** и создание основы для **разработки прототипа распределенной информационно-аналитической системы** сбора, хранения, обработки и анализа данных мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири опирающейся на **цифровой двойник болотных экосистем** и цифровую платформу его сопровождения.

Цель проекта - комплексная оценка динамики запасов и потоков углерода **лесных и болотных экосистем** южной тайги Западной Сибири и разработка прототипа информационно-аналитической системы мониторинга и комплексного анализа потоков парниковых газов **болотных экосистем**.



Блок 1. Создание сети мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири на основе стандартизированной инфраструктуры мирового уровня



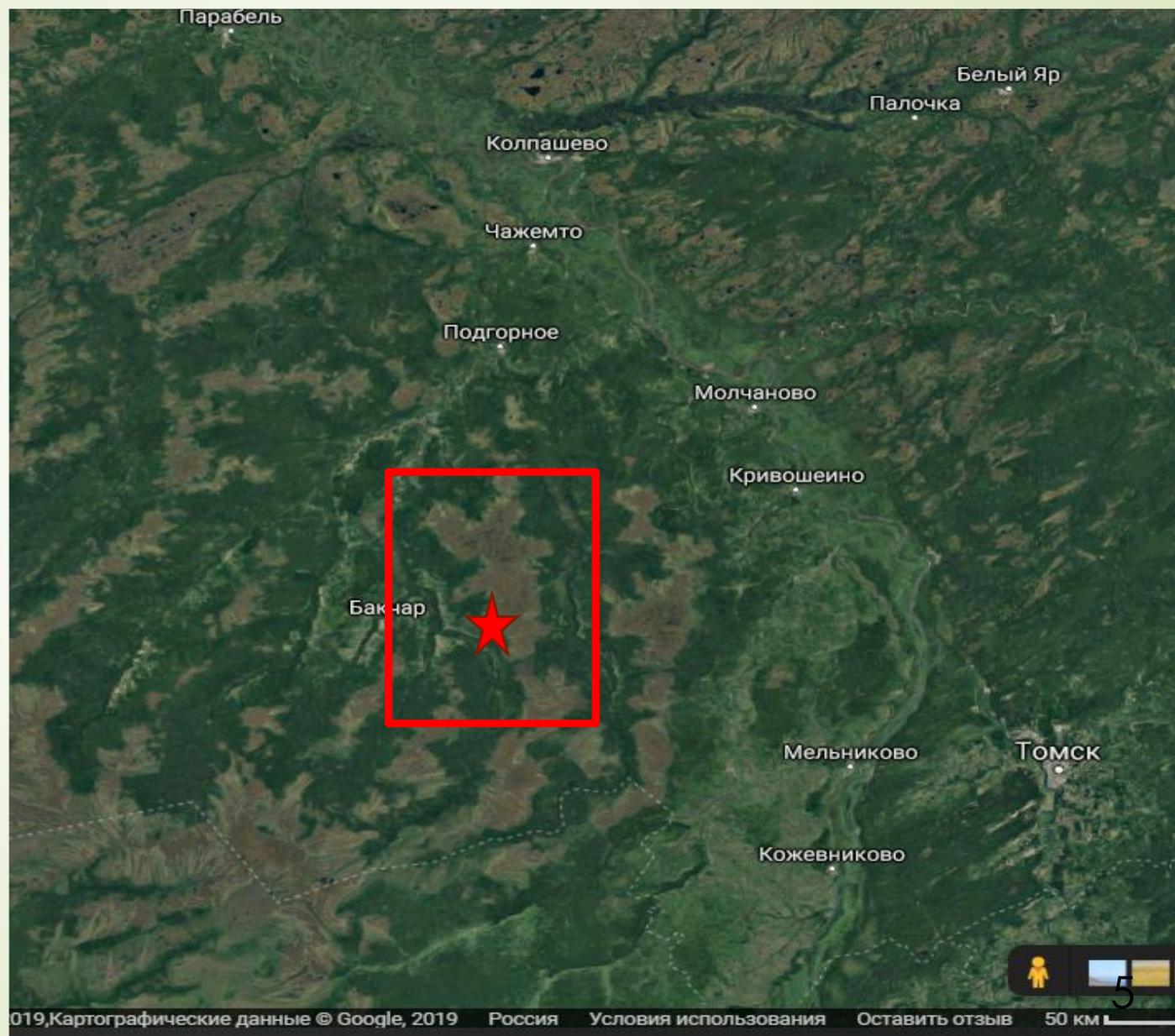
Блок 2. Создание концептуальной и программной основы для разработки распределенной информационно-аналитической системы сбора, хранения, обработки и анализа данных мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири

Блок 1. Создание сети мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири на основе стандартизированной инфраструктуры мирового уровня

- 1 Многолетний (с 1999 по 2014 год) мониторинг запасов углерода и потоков парниковых газов, оценка пятнадцатилетней динамики баланса углерода для болот южно-таежной подзоны Западной Сибири (Томская область)
- 2 Выбор пробных площадей для проведения мониторинга запасов углерода в лесных и болотных экосистемах
- 3 Методика проведения наблюдений потоков парниковых газов на площадке интенсивного мониторинга, адаптированная для болотных экосистем. Методики исследования характеристик растительности, торфа и воды.
- 4 Действующий пункт мониторинга интенсивного уровня на территории стационара Васюганье. Сравнительная оценка баланса углерода для болот южно-таежной подзоны Западной Сибири в 2022 г.
- 5 Разработка моделей и архитектуры баз кадастровых данных геологической разведки торфяных месторождений и архивных данных по содержанию углерода в торфах
- 6 База данных по термическому режиму почв юга таёжной зоны Западной Сибири

Объекты исследования

КУ «Бакcharский»
Стационар
«Ваксюганье»,
Бакcharский район
Томской области



КУ «Бакcharский» олиготрофное болото «Бакcharское»



Высокий ряб – сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз - ВР



Низкий ряб – сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз - НР

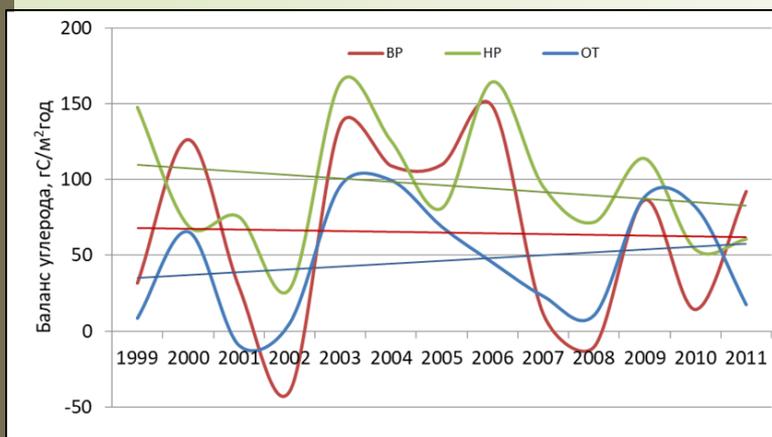


Грядово-мочажинный комплекс - ГМКГ; ГМКМ



Осоково-сфагновая топь - ОТ

Многолетний (с 1999 по 2014 год) мониторинг запасов углерода и потоков парниковых газов, оценка пятнадцатилетней динамики баланса углерода для болот южно-таежной подзоны Западной Сибири (Томская область)



Динамика баланса углерода (NEP) на примере олиготрофного Бакчарского болота, за период 1999–2011 гг., BP – высокий рям, HP – низкий рям, OT – открытая топь

Баланс углерода

Болотные экосистемы	Площадь	Эмиссия углерода	NPP	Скорость аккумуляции
	га	тС/год		
Олиготрофные	166 468	203	477	274
Эвтрофные	45 428	129	158	29
Итого	211 895	332	635	303

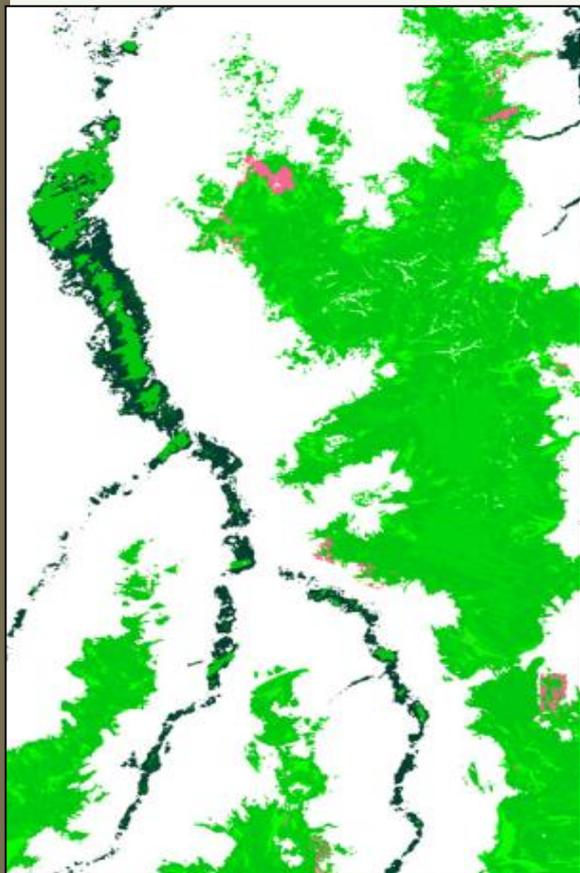
Многолетние наблюдения за потоками углерода болотных экосистем позволяют оценить динамику баланса углерода (NEP) в зависимости от погодных условий. В отдельные годы может наблюдаться отрицательный баланс углерода, что свидетельствует о том, исследуемые болотные фитоценозы при определенных условиях могут становиться источником CO₂. Высокая межгодовая изменчивость баланса углерода обусловлена межгодовой вариабельностью чистой первичной продукции.

Общая площадь КУ Бакчарский составляет 586 тыс. га, из них 166 тыс. га (или 28% от общей площади) занято олиготрофными, 45 тыс. га (7%) – эвтрофными болотами. Олиготрофные болота ежегодно накапливают 477 тыс. тонн С в виде первичной продукции растений, при этом из них выделяется около 203 тыс. тонн. Эвтрофные болота накапливают 158 тыс. тонн С и выделяют 129 тыс. тонн. Углеродный баланс олиготрофных и эвтрофных болот положителен и составляет 274 и 29 тыс. тонн углерода в год, соответственно.

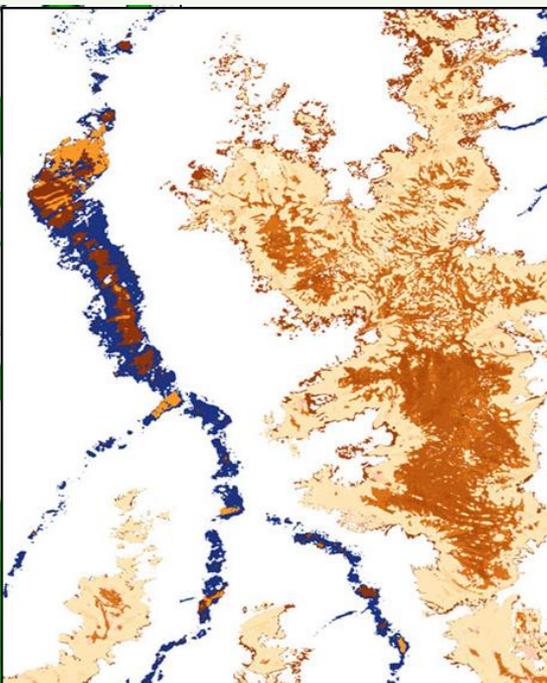
Таким образом, исследованные болотные экосистемы являются устойчивым стоком углерода из атмосферы.

Региональная оценка баланса углерода на примере КУ «Бакчарский»

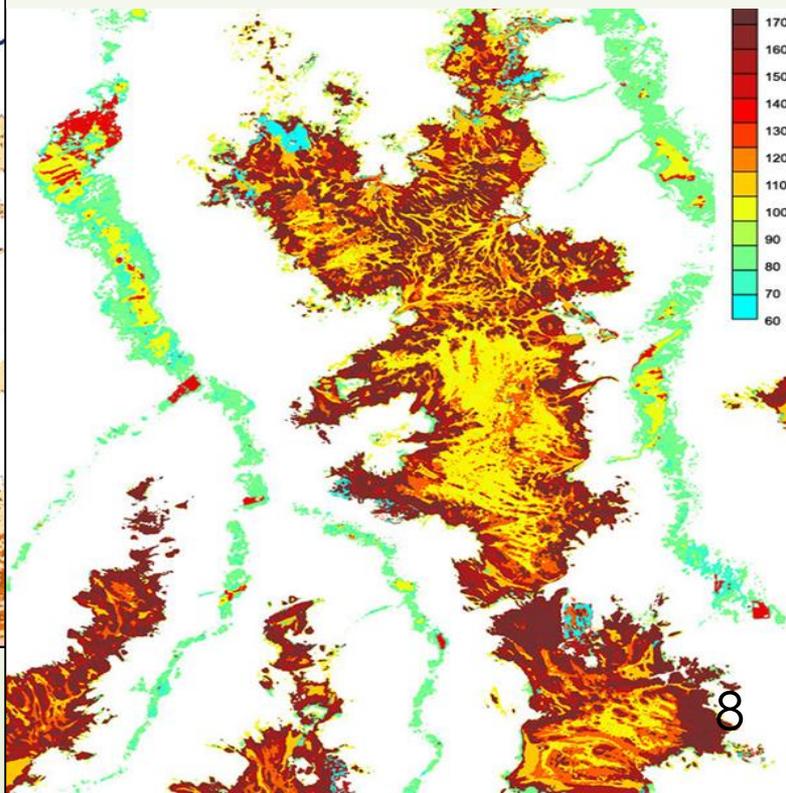
Карта чистой первичной продукции



Карта суммарного потока углерода с поверхности торфяной залежи



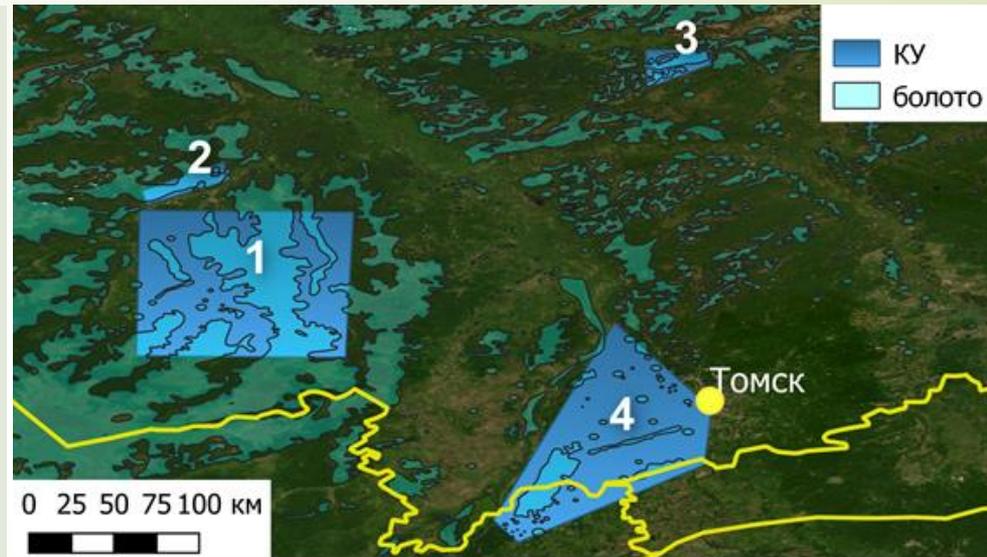
Карта баланса углерода



Ежегодное поглощение углерода болотными экосистемами ключевого участка «Бакчарский» площадью 212 тыс. га составляет около 300 тыс. тонн.

Выбор пробных площадей для проведения мониторинга запасов углерода в лесных и болотных экосистемах

- ▶ По итогам экспедиционных исследований, которые ведутся с 2005 по настоящее время, сотрудниками ИМКЭС СО РАН были выбраны пробные площади (ПП) болотных экосистем, расположенные на территории четырех районов Томской области:
 - ▶ Томский район (ПП Обь-Томский),
 - ▶ Бакчарский район (ПП Бакчарский),
 - ▶ Чаинский район (ПП Усть-Бакчарский)
 - ▶ Верхнекетский район (ПП Нибегинский).
- Кроме этого, исследования ведутся на минеральных почвах в юго-восточной части Томской области (ПП Томь-Яйское междуречье).



Расположение ключевых участков в Томской области. 1 – Бакчарский, 2 – Усть-Бакчарский, 3 – Нибегинский, 4 – Обь-Томский. Цветом показаны болотные массивы. Основа: Esri Imagery https://server.arcgisonline.com/arcgis/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/{z}/{y}/{x}

Лесной полигон, полигон «Аркашево»

Основные преимущества

- ядро полигона является памятником природы регионального значения «Аркашевский припоселковый кедровник»
- доступен (15 км от г. Томска)
- отличается высоким разнообразием породного состава древостоев (кедр сибирский, ель сибирская, пихта сибирская и береза повислая и осина)
- В структуре полигона присутствуют сырые пихтарники, характерные для западно-сибирских южно-таежных лесных экосистем
- древостои разновозрастные, что позволит выстраивать пространственно-временные ряды как основу дальнейшего моделирования и прогноза развития лесных экосистем
- близость к очагу инвазий энтомовредителей с возможностью сравнения продуктивности и пула углерода в естественных и пораженных вредителями лесных экосистемах.

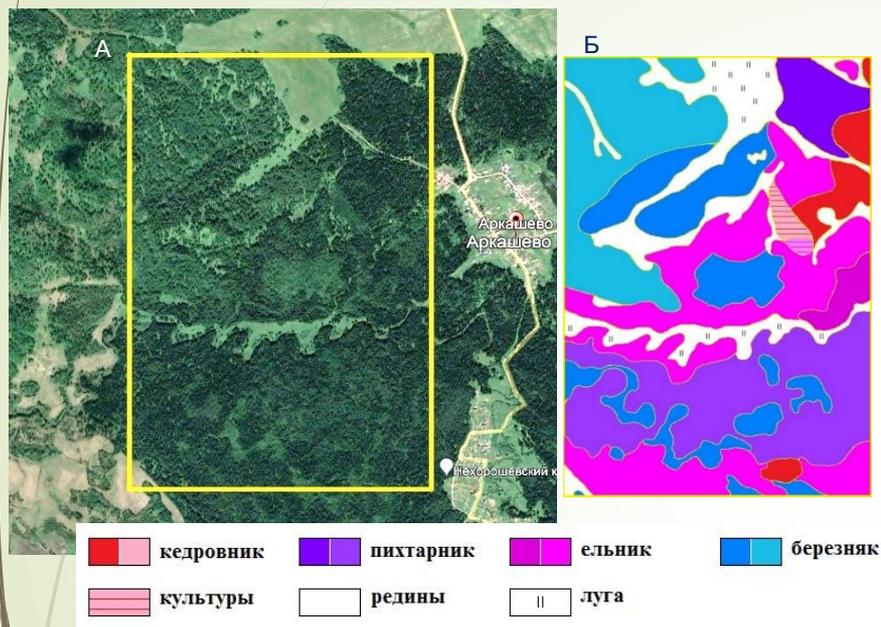


Рисунок – Полигон «Аркашево»:

А – космоснимок;

Б – схема насаждений на основе плана лесоустройства 2013 г и рекогносцировочного обследования

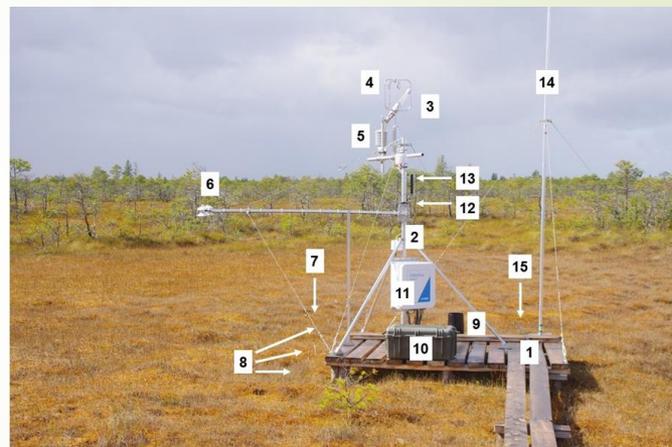
Действующий пункт мониторинга интенсивного уровня на территории стационара Васюганье. Сравнительная оценка баланса углерода для болот южнотаежной подзоны Западной Сибири в 2022 году

В качестве площадки для организации мониторинга потоков парниковых газов, тепла и влаги выбран грядово-озерковый комплекс Бакчарского болотного массива, где с мая по октябрь 2022 г. проводились измерения потоков методом турбулентных пульсаций.



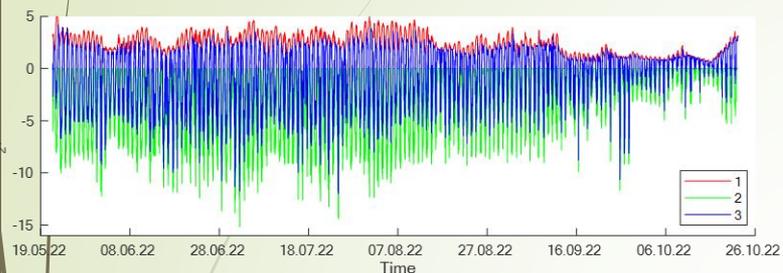
Разработана и создана автономная система электропитания (блок аккумуляторов, блок контроля заряда, солнечные панели, блок передачи информации) для обеспечения работоспособности системы мониторинга потоков CO_2 , тепла, влаги методом турбулентных пульсаций.

Внешний вид автономной системы мониторинга потоков углекислого газа, тепла, влаги методом турбулентных пульсаций с комплектом метеорологических датчиков



1 – помост, 2 – мачта, 3 – газоанализатор, 4 – акустический анемометр, 5 – 4x канальный радиометр, 6 – датчик температуры и влажности воздуха в радиационной защите, 7 – датчик температуры почвы, 8 – датчики теплового потока, 9 – осадкомер, 10 – модуль питания, 11 – всепогодное укрытие модуля сбора информации, 12 – GPS антенна, 13 – GSM антенна, 14 – молниеприемник, 15 – заземление

Потоки углекислого газа по данным пульсационных измерений и модели разделения потоков на грядово-озерковом комплексе Бакчарского болота в 2022 г.



Суммарные за месяц потоки углерода с мая по октябрь 2022 г.



- 1 – ER – экосистемное дыхание,
- 2 – GPP – валовая первичная продукция,
- 3 – NEE – суммарный экосистемный обмен

Получен непрерывный ряд данных по потокам CO₂ за период с 21 мая по 22 октября 2022 г.

В процессе фотосинтеза болотная растительность аккумулирует **468 гС/м²**, а обратно в атмосферу возвращается **400,6 гС/м²** в виде экосистемного дыхания.

Наибольший вклад в аккумуляцию углерода вносят июнь и июль. Осенью болото становится источником углекислого газа, при этом фотосинтетический сток CO₂ зарегистрирован и в осенние месяцы, однако выделение CO₂ экосистемой его превышает.

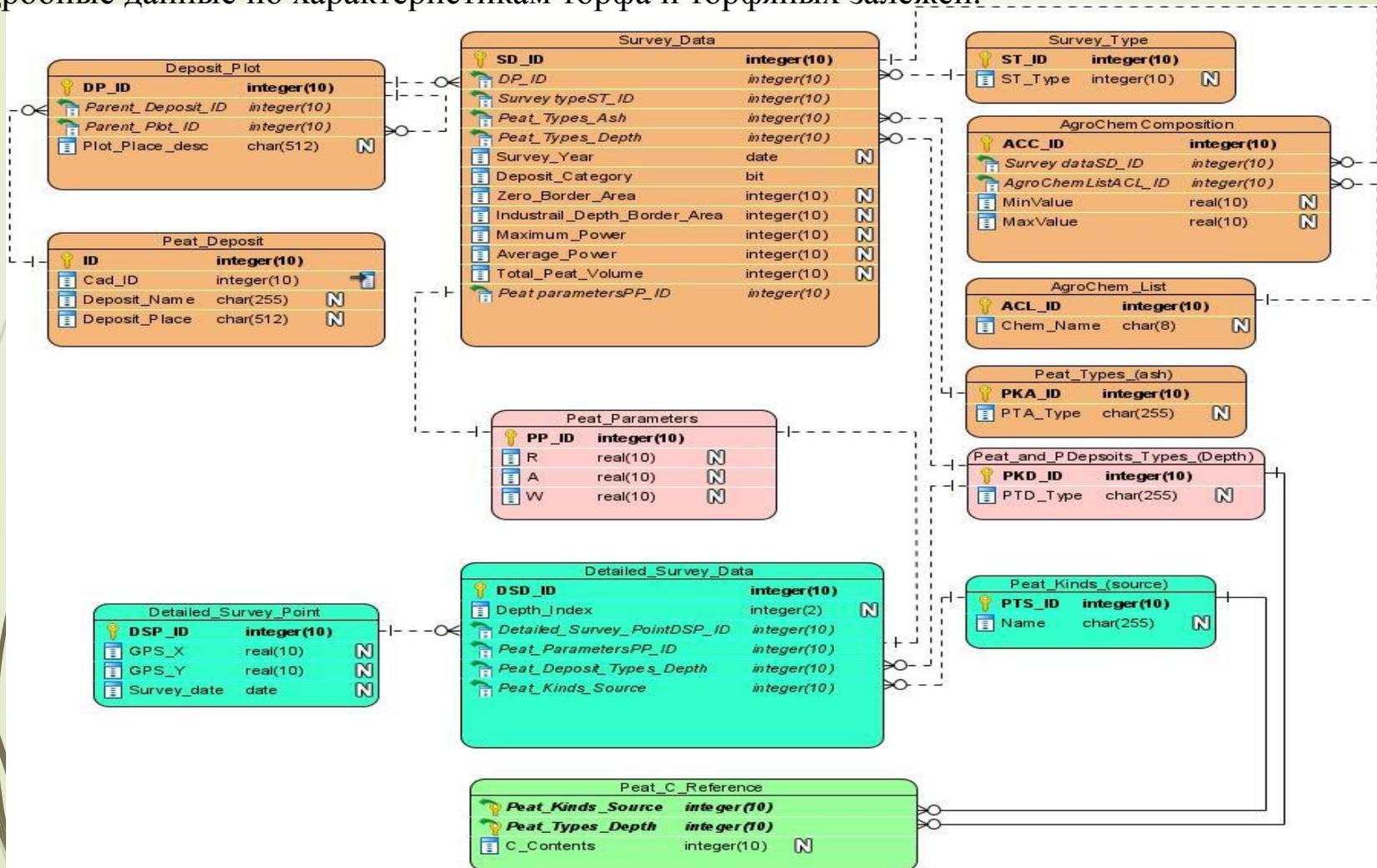
Оценка потоков углерода для периода с мая по октябрь 2022 г. показала, что суммарно грядово-озерковый комплекс поглощает из атмосферы **67,3 гС/м²**.

Разработка моделей и архитектуры баз кадастровых данных геологической разведки торфяных месторождений и архивных данных по содержанию углерода в торфах

- Проведен анализ исходных документов и предметной области.
- Разработан план работ по созданию и наполнению базы данных.
- Начаты работы по переводу данных в электронный вид.
- Разработан методический подход к оценке запасов углерода по данным кадастровых справочников по торфяным месторождениям.
- Выбраны из литературных источников наиболее репрезентативные данные по содержанию $C_{\text{орг}}$ в разных видах торфа.
- Выбраны 10 типичных детально разведанных месторождений. Ведомости лабораторных анализов 15251 образца торфа 1385 пунктов отбора из их архивных материалов переведены в электронный вид. Выполнены расчеты процентного содержания слоев торфа разного типа для торфяных залежей разного типа и среднего содержания $C_{\text{орг}}$ для этих залежей.

Модель базы данных по материалам разведки торфяных месторождений и архивам детальной геологической разведки

Разработана схема базы данных, объединяющая информацию по справочнику кадастровых данных по торфяным месторождениям юго-востока Западной Сибири и архивным данным детальной геологической разведки по ряду торфяных месторождений, содержащих подробные данные по характеристикам торфа и торфяных залежей.



База данных «Термический режим почв юга таёжной зоны Западной Сибири»

Авторы: Копысов С.Г., Дюкарев А.Г., Никифоров А.Н.



Рисунок А - Структурная схема базы данных

- Отражает современный (с 2011 года) термический режим 16 естественных лесных биоценозов
- Температура почвы основной предиктор для описания интенсивности выделения CO₂ из почвы
- Рост температуры деятельного слоя почвы ускоряет процессы разложения органических остатков
- Чем почва более влажная, тем больше энергии тратится на испарение, а не нагрев почвы

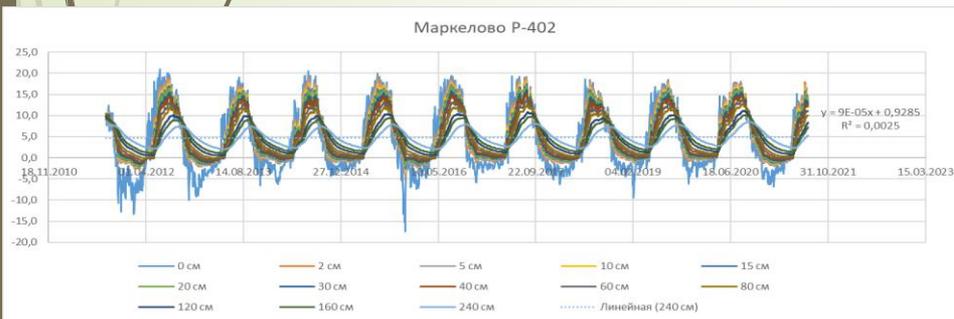


Рисунок Б – Пример графического отражения в БД

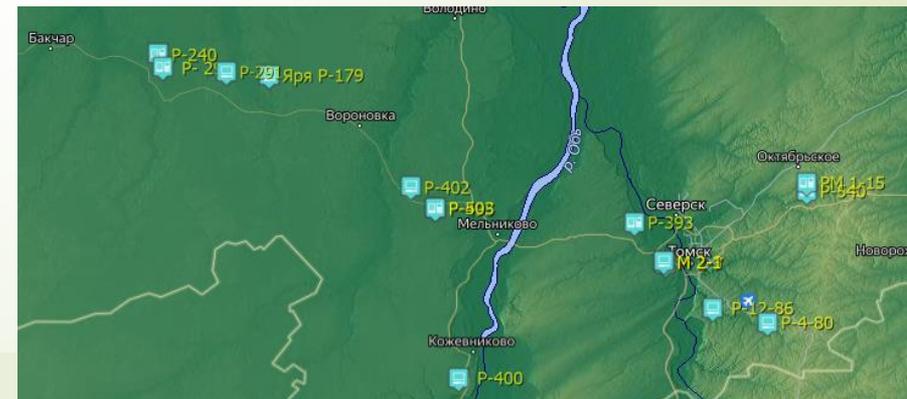


Рисунок В – Расположение пунктов наблюдения

Блок 2. Создание концептуальной и программной основы для разработки прототипа распределенной информационно-аналитической системы сбора, хранения, обработки и анализа данных мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири

Три кита распределенной информационно-аналитической системы (РИАС):

- Данные наблюдений и измерений
- Модели
- Сервисы

Результат: количественная оценка потоков парниковых газов и пулов углерода в наземных экосистемах территории и их динамики

- **Концепция прототипа РИАС** - цифровая платформа, интегрирующая оцифрованные данные, модели основных процессов формирования потоков парниковых газов и сервисы, необходимые для ее эффективной работы и использования (пополнения баз данных, запуска моделей, архивации и анализа результатов вычислений, визуализации полученных результатов на выбранной картографической основе и доступа к ним.
- **Трансформация наборов данных в базы данных** - разработаны схемы баз данных: потоков углерода, тепла и влаги для болот выбранной территории и "Термический режим почв юга таёжной зоны Западной Сибири" (ThermalRegime) и программный интерфейс для доступа к ним.

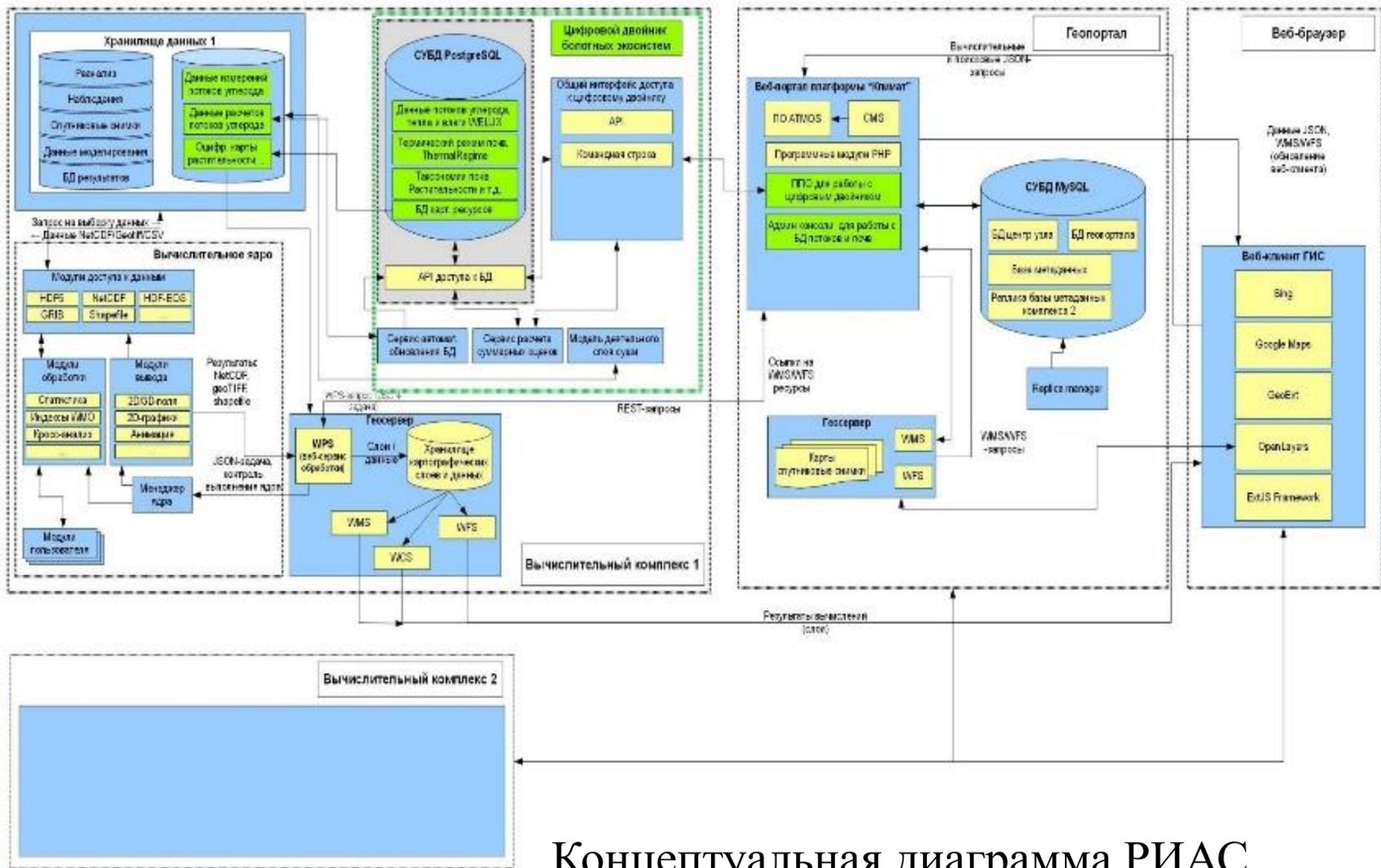
- **Выбраны и подготовлены модели**, обеспечивающие количественную оценку потоков парниковых газов и пулов углерода в наземных экосистемах территории:

модификация (Богомолов В.Ю.) модели поверхности суши ИВМ РАН – МГУ, позволяющая, по заданному атмосферному форсингу, вычислять локальные и площадные гидротермические характеристики почвы и

эмпирическая модель (Дюкарев Е.А.), позволяющая определять потоки парниковых газов по микрометеохарактеристикам

- **Разработаны блок-схемы и UML диаграммы** алгоритмов обработки потоковых данных измерений типовой станции микрометеорологического мониторинга

Разработана архитектура прототипа РИАС и его блоков



Концептуальная диаграмма РИАС

Планы 2023-2024

- Заложены и обследованы экспериментальные пробные площади в разных типах лесных экосистем.
- Сводные данные общетехнических свойств торфа олиготрофных, мезотрофных и эвтрофных болотных экосистем.
- Протестированная версия модели деятельного слоя суши, включающая болотные экосистемы.
- Оценка углеродного баланса болотных экосистем. Уточненные коэффициенты выбросов и поглощения CO₂ в болотных экосистемах южно-таежной зоны Западной Сибири.
- Анализ пространственно-временной изменчивости запасов углерода и потоков парниковых газов.
- Оценка запасов углерода по потенциальной биопродуктивности с учётом гидротермического режима и верификации по данным полевых измерений.
- Результаты опытной эксплуатации прототипа РИАС мониторинга и комплексного анализа потоков парниковых газов болотных экосистем на основе цифрового двойника болотных экосистем.

Измеритель метеорологических величин ультразвуковой АМК-04

Измеряемая величина	Диапазон измерения	Погрешность
Температура воздуха (T), град С	- 50...+ 55	$\pm 0,3$ °С, при $T \leq +30$ °С $\pm 0,5$ °С, при $T > +30$ °С
Скорость горизонтального ветра (V), м/с	0,1...40	$\pm (0,2 + 0,05 V)$
Направление горизонтального ветра, град	0...360	± 2 °
Скорость <u>вертикального</u> ветра (W), м/с	-15...+15	$\pm (0,1 + 0,02 W)$
Относительная влажность воздуха, %	10...100	± 5 % при $T \leq 0$ °С
Атмосферное давление, гПа	693...1067	$\pm 1,0$
Частота измерения, Гц	до 80	

Опционно: Стандартные параметры турбулентных флуктуаций температуры и ветра (их энергетические характеристики, потоки тепла и импульса, характерные масштабы атмосферной турбулентности, структурные постоянные C_T^2 , C_V^2 и C_n^2).



**Свидетельство об
утверждении типа
средств измерений**

Атмосферно-почвенный измерительный комплекс «АПИК»



- средние значения скорости и направления ветра;
- профили температур воздуха, снега, грунта, воды;
- влажность воздуха и грунта;
- количество жидких и твёрдых осадков;
- высота снежного покрова;
- суммарная приходящая и отражённая солнечная радиация;
- уровень, проводимость и рН воды.

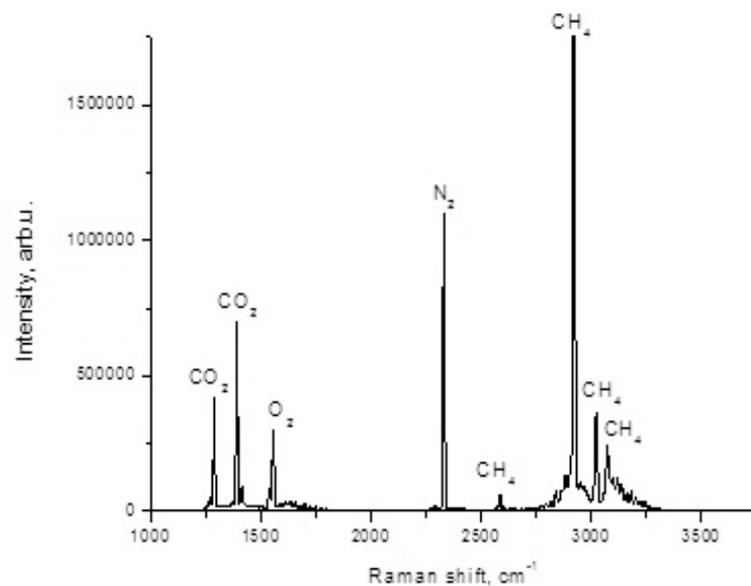
СКР-газоанализатор



Экспериментальный образец высокочувствительного мобильного прибора для регистрации спектров комбинационного рассеяния (КР) газовых сред. Данный КР-спектрометр позволяет в оперативном режиме одновременно контролировать в атмосферном воздухе содержание всех молекулярных компонентов (включая их изотопические модификации) с пороговой чувствительностью от 50 ppb

Сферы применения:

экологический мониторинг, исследование процессов фотосинтеза, прочие газоаналитические задачи, где требуется одновременный контроль большого количества компонентов газовой среды.



УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Приглашаем вас принять участие в работе российской конференции с международным участием **“XV Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу”**, которая будет проходить в г. Томске в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

с 17 по 20 октября 2023 г.

Работа конференции будет проходить по следующим направлениям:

1. Современное состояние и тенденции изменения климата Северной Евразии, динамика атмосферных процессов
2. Экстремальные климатические и природные явления
3. Экосистемы различных природных зон
4. Перенос загрязнений в атмосфере
5. Вычислительные и информационные технологии в науках об окружающей среде
6. Методы и средства мониторинга состояния окружающей среды

Круглый стол Углерод в наземных экосистемах (РИТМ углерода)

Благодарю за внимание!

