



РИТМ
УГЛЕРОДА



ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ И МОНИТОРИНГ ПОТОКА И ПУЛОВ УГЛЕРОДА В РЕПРЕЗЕНТАТИВНЫХ МЕРЗЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЯКУТИИ. РАСШИРЕНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЙ SAKNAFLUXNET В КРИОЛИТОЗОНЕ



Максимов Т.Х., **Петров Р.Е.**, Шепелев А.Г., Григорьев А.В.
Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск

ИКИ РАН, Москва, 14.02.2024

Цель

– исследование бюджета углерода арктических и бореальных экосистем криолитозоны Северо-востока России.

Задачи

01

Исследовать потоки углерода в репрезентативных мерзлотных экосистемах Якутии и их связь с наземными процессами;

02

Оценить углеродные пулы репрезентативных мерзлотных экосистем Якутии:
растение - почвы - мерзлота;

03

Выявить региональные особенности бюджета углерода репрезентативных экосистем криолитозоны Якутии.

Отчет состоит из:
49 стр., 17 рис., 6 табл., 17
источников, 2 прил.

Ключевые слова:

*МНОГОЛЕТНЯЯ МЕРЗЛОТА,
ЛЕС, ТУНДРА,
ПОТОКИ УГЛЕРОДА,
ПУЛЫ УГЛЕРОДА,
МОНИТОРИНГ*

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мерзлотные лиственничные
леса разной продуктивности и
типичная субарктическая
тундра Северо-востока России.

ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Реализация важнейшего
инновационного проекта
государственного значения,
направленного на создание единой
национальной системы
мониторинга климатически
активных веществ.

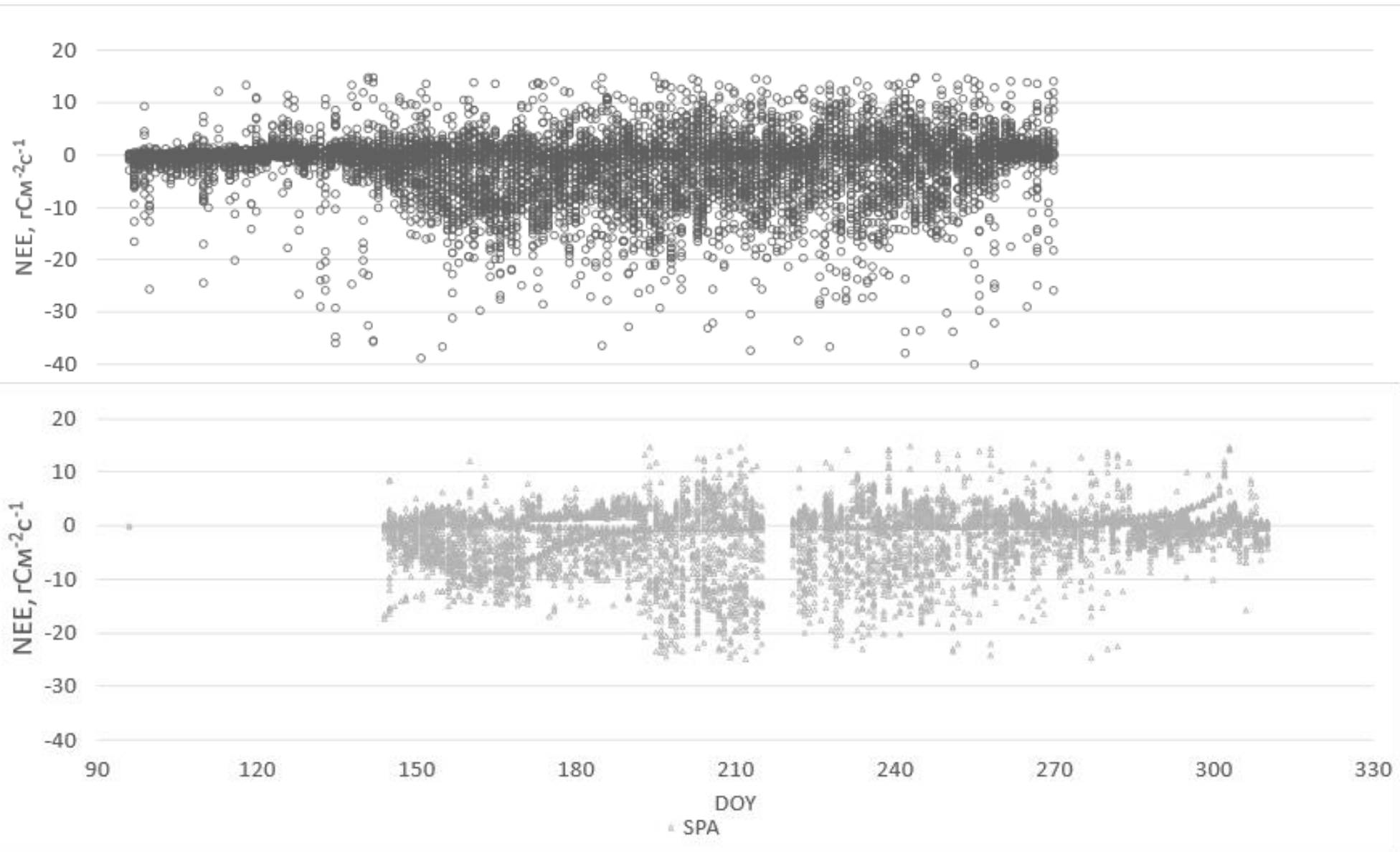
В РЕЗУЛЬТАТЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

- ❖ Проведены рекогносцировочные исследования по мониторингу бюджета углерода в тестовых полигонах лесных экосистем;
- ❖ Организованы работы по модернизации и контролю качества исследований;
- ❖ Использован гибридный интеллект в качестве методического подхода к оценке секвестрации углерода в экосистемах Якутии в изменяющемся климате.

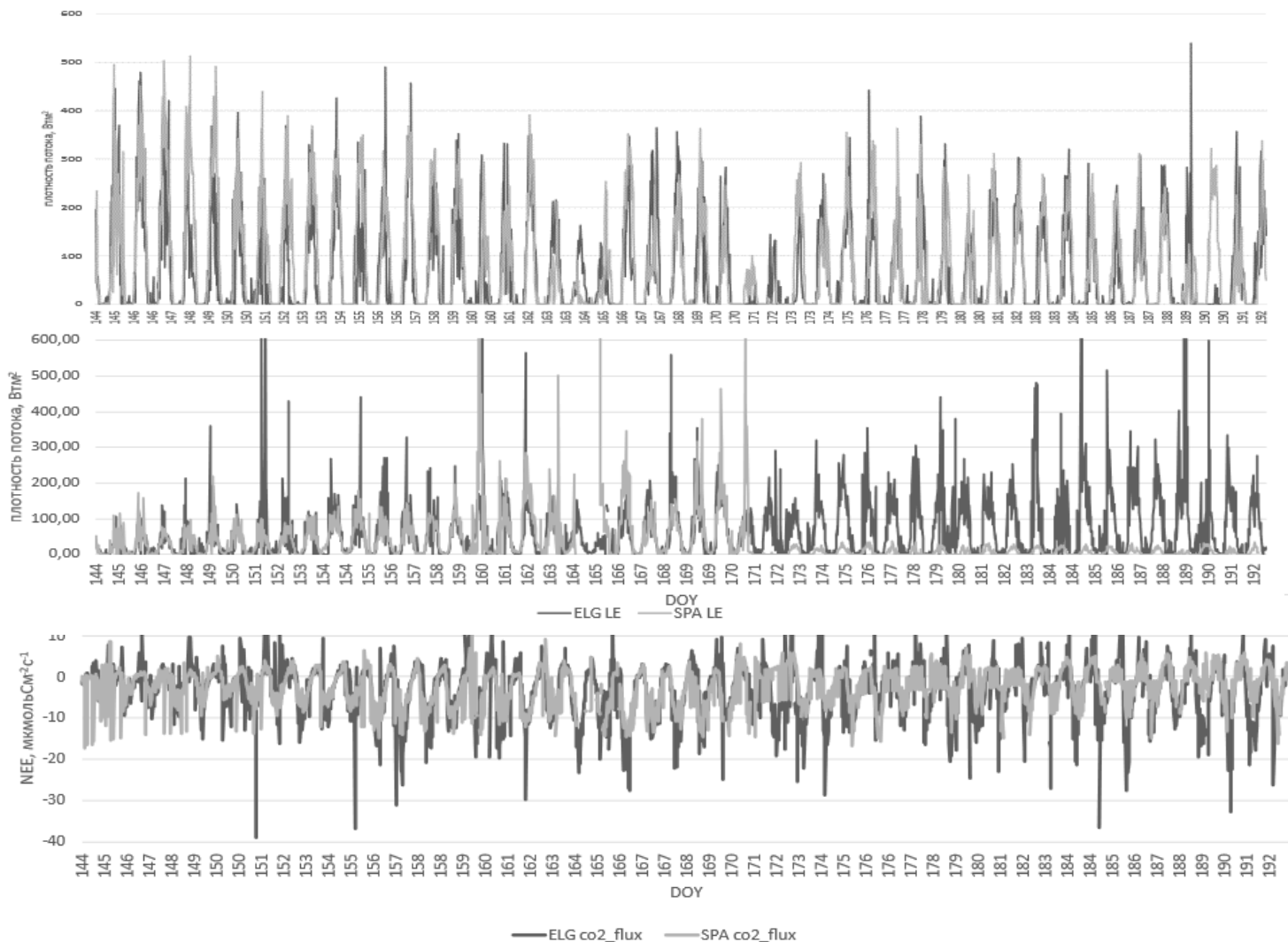
Экосистемные потоки энергии, влаги и углерода



Сезонные потоки углерода лиственных лесов Якутии разных биоклиматических зон



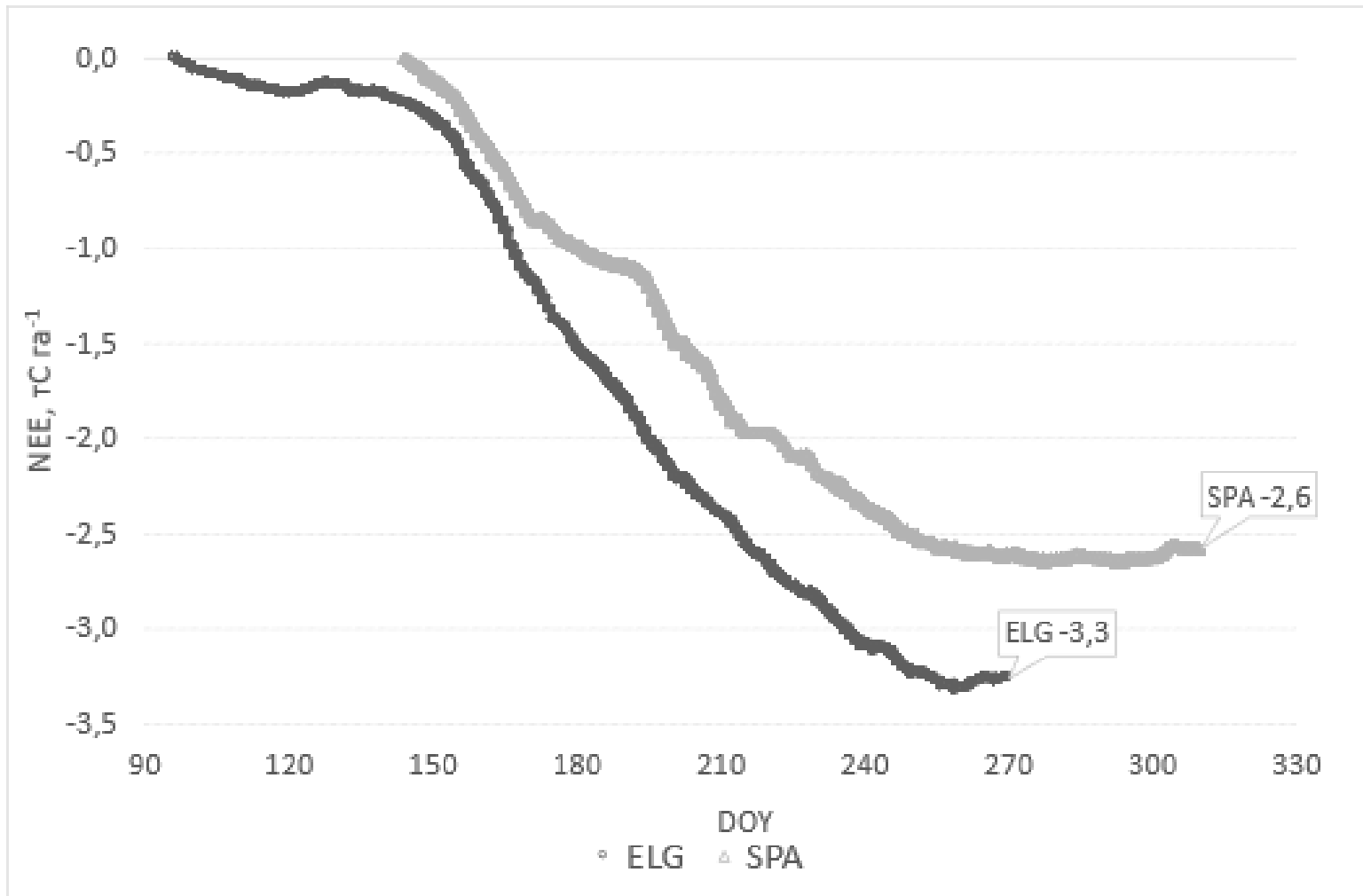
Потоки тепла, влаги и углекислого газа в среднепродуктивном лиственничном лесу Якутии Научная станция «Спасская падь». 2023 г.



Максимальные величины поглощения углерода NEE и испарения отмечены в конце июня. Темпы NEE и испарения в 2023 г. были устойчиво выше, чем в предыдущие годы. Это достоверный результат. Следует отметить, что система эдди-корреляции «видит» NEE и испарение как из почвы, так и с растительности.

Явный поток тепла (турбулентный) является преобладающим компонентом баланса энергии большую часть вегетационного периода в 2023 г. (

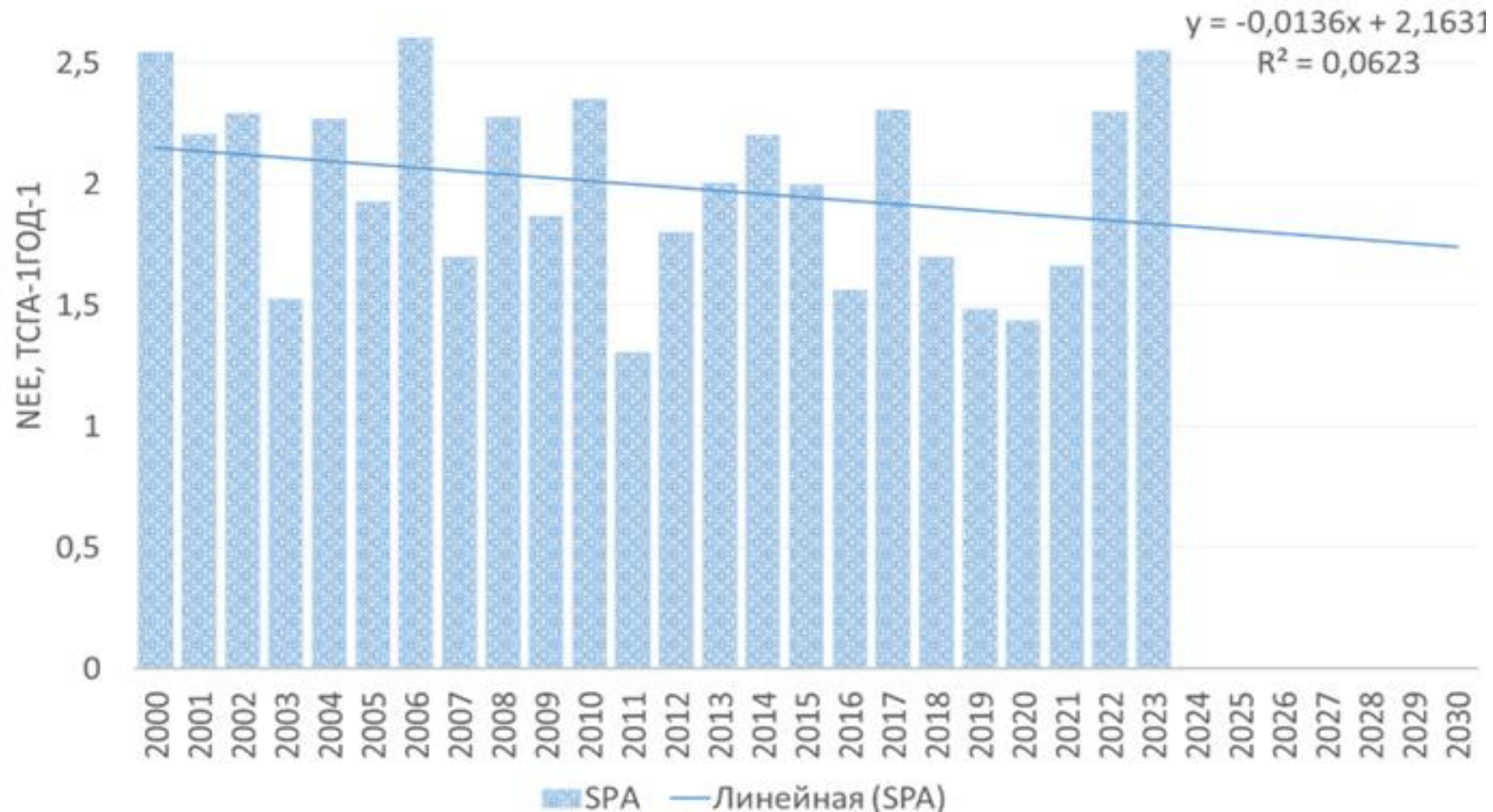
Годовые кумулятивные потоки NEE в лиственничных лесах разной продуктивности в 2023 г.



Годовой сток углерода в средне-продуктивном лиственничном лесу в зоне многолетней мерзлоты в 2023 году составил **2,6** т С/ га в год, тогда как в высокопродуктивном лиственничном лесу был равным **3,3** т С/ га в год, что на 1,3 раза больше.

Повышение температуры, приводящее к большому дефициту влаги, приводит к уменьшению количества поглощаемого CO₂ экосистемой.

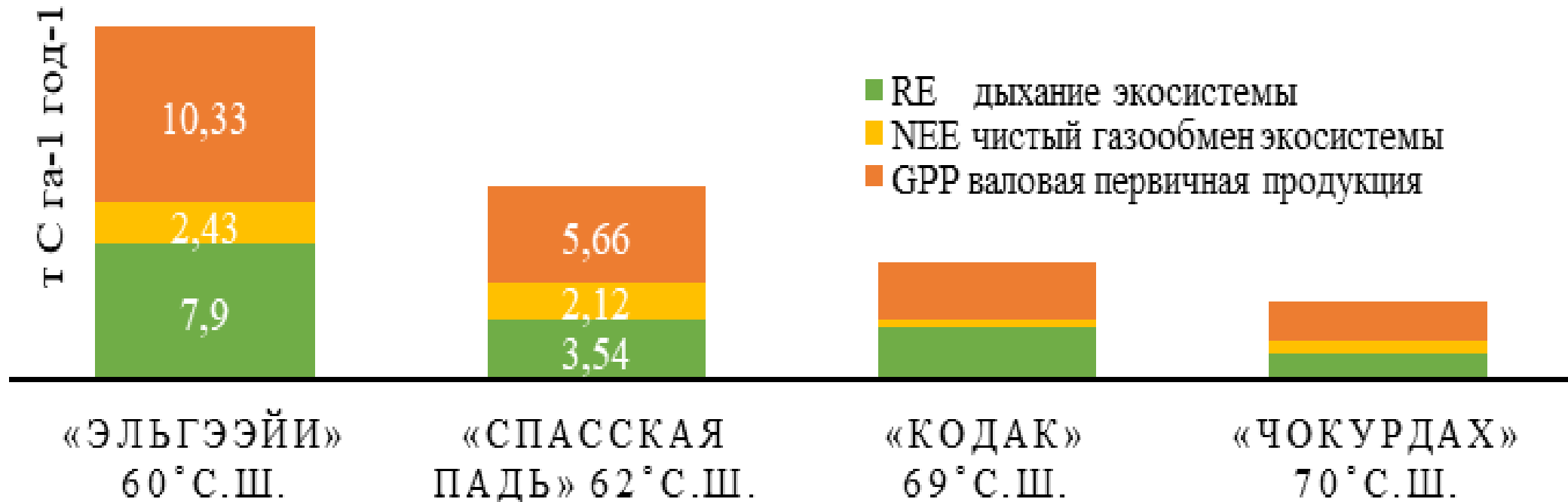
Межгодовые вариации NEE в средне-продуктивном лиственничном лесу (SPA) в 2000-2023 гг.



Отмечается положительный скачок поглощения CO₂ лесом в 2023 году, который на 1,5 и 1,1 раз превышал 2021 и 2022 гг., соответственно.

Максимальная ассимиляция углерода в южном лиственничном лесу (научная станция «Эльгэйи») на 20% была выше, чем таковые в Центральной Якутии (научная станция «Спасская падь»).

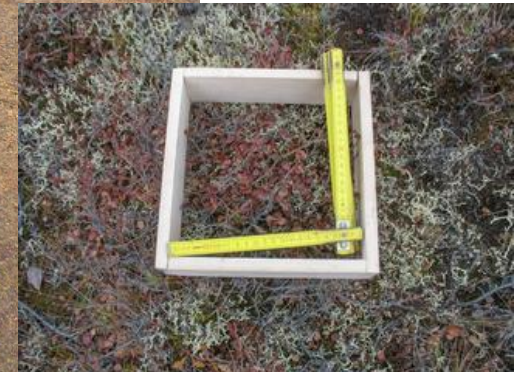
Составляющие углекислотного газообмена репрезентативных мерзлотных экосистем Северо-востока России, 2008-2022 гг.



По нашим данным, валовая первичная продукция (GPP) высокопродуктивного леса **выше**

- в 1,8 раза средне-продуктивного леса;
- в 2,9 раза лесотундры;
- в 4,5 раза тундры.

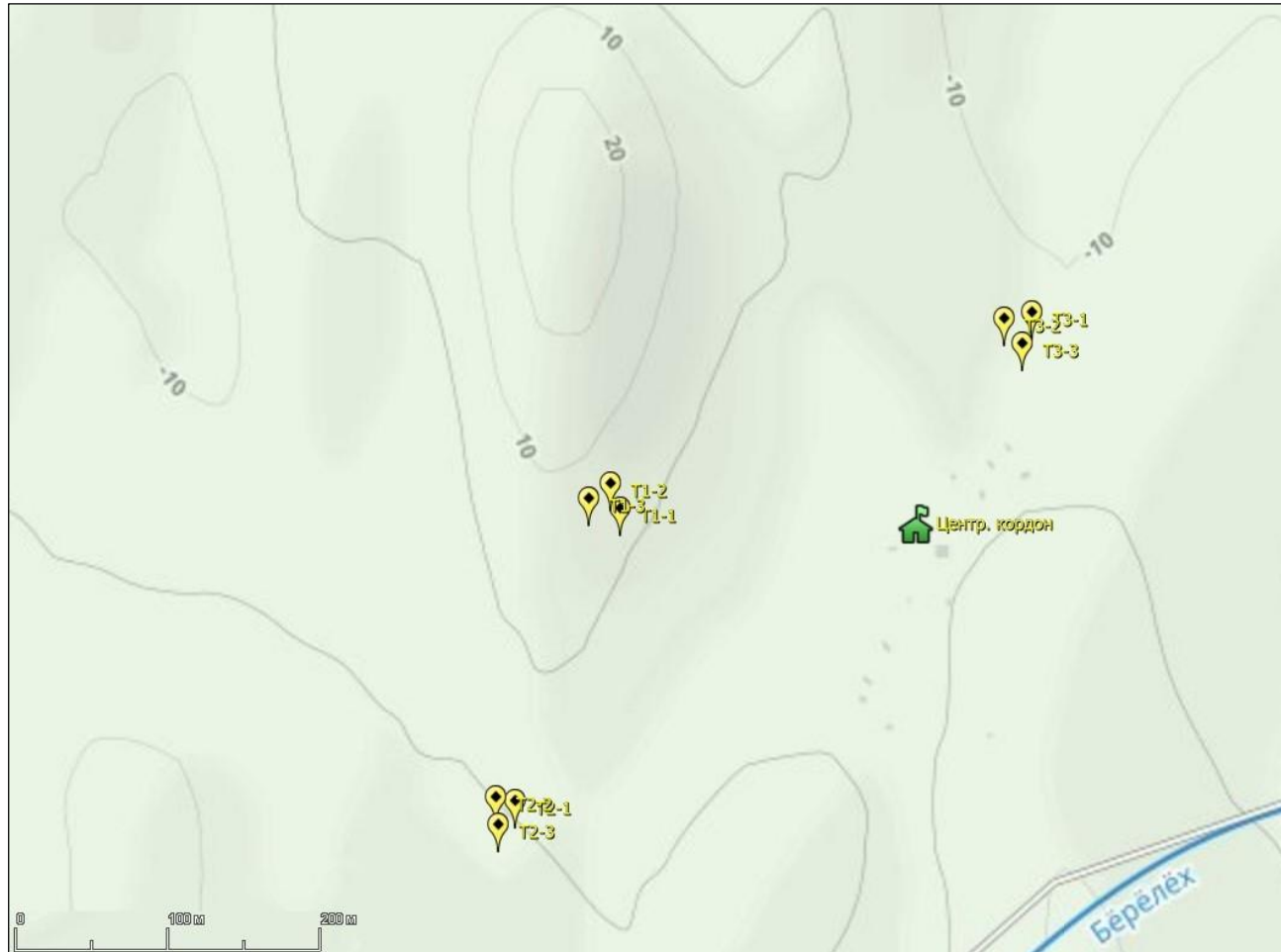
Биогеоценотические пробные площадки



Биогеоценотические пробные площадки

- Пробные площадки (далее – ПП) заложены в Центрально-якутской низменности Якутской равнинной провинции на денудационно-аккумулятивной равнине левобережья р. Лена (рисунок 11). Участки ПП выбраны с учетом структуры биогеоценоза, где преобладает лесообразующая порода – лиственница Каяндера (*Larix cajanderi*).
- Биогеоценоз состоит из лиственничного леса кустарничково (*Vaccinium vitis-idaea* L., *Ledum palustre* L., *Vaccinium uliginosum* L.) – зеленомошные (*Aulacomnium turgidum* (Wahlenb.) Schwägr., *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt., *Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.), местами с примесью сосны и часто с подлеском из *Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar и *Betula fruticosa* Pall., и лиственничные леса травяно (*Calamagrostis langsdorffii* (Link) Trin., *Poa pratensis* L., *Thalictrum minus* L.) – брусничные (*Vaccinium vitis-idaea* L.).
- Пробные площадки приурочены к Яно-Индибирской низменности. В географическом отношении участки относятся к Северо-Восточной Сибири группе тундровых провинций сплошного распространения многолетнемерзлых пород к Нижнеиндибирской озерно-термокарстовой провинции
- На межлассье тундры типичные кустарничково (*Vaccinium vitis-idaea*, *V. uliginosum*) – лишайниковые (*Cetraria cucullata*) и осоково-пушицевые кочкарные. Аласный тип местности – тундроболота полигонально-валиковые редкокустарничковые (*Betula exilis*, *Salix pulchra*) кустарничково (*Ledum palustre*, *Vaccinium uliginosum*) – зеленомошно (*Aulacomnium turgidum*) – лишайниковые (*Cetraria cucullata*) на валиках и травяные (*Carex stans*, *Eriophorum polystachion*) в мочажинах. Низкотеррасовый тип местности – тундроболота полигонально-валиковые пушицево-осоковые (*Carex stans*, *Eriophorum vaginatum*) на валиках и травяные (*Carex stans*) в мочажинах в сочетании с ивняками (*Salix pulchra*, *S. alaxensis*), травяными (*Eriophorum polystachion*, *Arctophila fulva*) болотами и пойменными хвощево-злаковыми (*Poa alpigena*) лугами

Схема расположения ПП и точек отбора образцов на тундровой станции «Чокурдах»



№ ПП	Название площадки	Координаты
1	T-1-1, № 3534081-01-2-1	N70.82763200° E147.48358300°
	T-1-2	N70.82777100° E147.48339800°
	T-1-3	N70.82768500° E147.48301400°
2	T-2-1, 3534081-01-2-2	N70.82768500° E147.48301400°
	T-2-2	N70.82600500° E147.48137300°
	T-2-3	N70.82584500° E147.48141000°
3	T-3-1, № 3534081-01-2-3	N70.82873700° E147.49090200°
	T-3-2	N70.82870100° E147.49040800°
	T-3-3	N70.82856000° E147.49071400°

Разрез и полуямы пробных площадок

T-1 тундровая луговина с аласным типом местности;

T-2 – возвышенность на межжаласье

T-3 – типичная кустарничковач тундре на низкой террасе малой р. Бёрёлёх.

Характеристика напочвенного покрова и морфологическое описание почвенного разреза Т1-1 на пробной площадке №1 в Чокурдах

Т-1-1 – Тундровая луговина
(N70.82763200° E147.48358300°)
№ 3534081-01-2-1

Карликовая березка – 60%,
лишайники – 30%,
мох – 5% и
осока – 5%.

О - 0-10 см – отмерший мох с
очесом, 10-20 см – торф;

Г - 20-27 – супесь пылеватая
темно-серого цвета,
тиксотропный, оглеенный
горизонт.

СГ – 27-30 см – супесь
однородная. СТС до 30 см,
льдистость – 100%, лед.

Тип почвы: Глееземы.

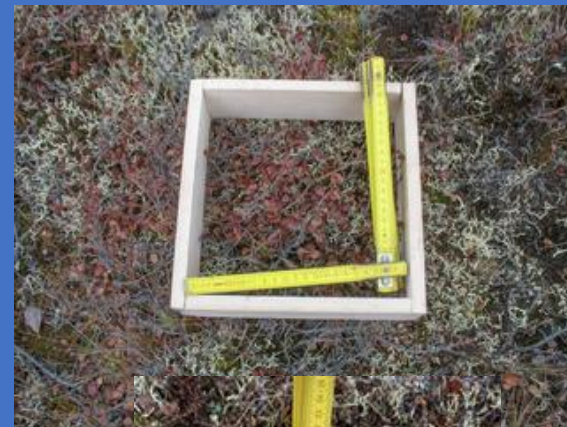
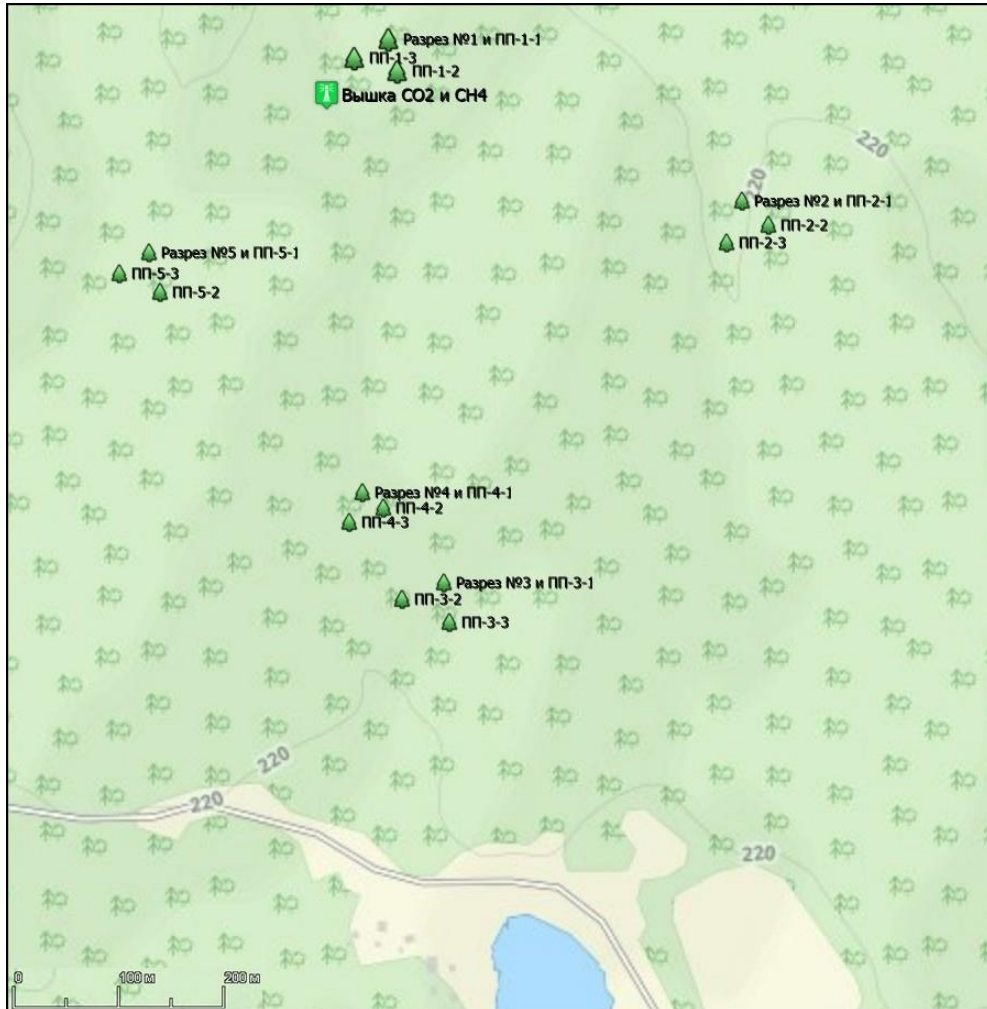


Схема расположения ПП и точки отбора образцов на лесной станции «Спасская падь»



№ ПП	Название площадки	Координаты
1	Почвенный разрез №1, 3534081-01-1-1	
	ПП-1-1 полуяма	N62.25531500° E129.61977400°
	ПП-1-2 полуяма	N62.25502816° E129.61994368°
	ПП-1-3 полуяма	N62.25514825° E129.61911618°
2	Почвенный разрез №2, 3534081-01-1-2	
	ПП-2-1 полуяма	N62.25387581° E129.62666660°
	ПП-2-2 полуяма	N62.25365104° E129.62719232°
	ПП-2-3 полуяма	N62.25349975° E129.62637025°
3	Почвенный разрез №3, 3534081-01-1-3	
	ПП-3-1 полуяма	N62.25041200° E129.62085900°
	ПП-3-2 полуяма	N62.25025934° E129.62004422°
	ПП-3-3 полуяма	N62.25005100° E129.62096000°
4	Почвенный разрез №4, 3534081-01-1-4	
	ПП-4-1 полуяма	N62.25122400° E129.61927600°
	ПП-4-2 полуяма	N62.25108711° E129.61968082°
	ПП-4-3 полуяма	N62.25095870° E129.61900084°
5	Почвенный разрез №5, 3534081-01-1-5	
	ПП-5-1 полуяма	N62.25341000° E129.61510200°
	ПП-5-2 полуяма	N62.25305021° E129.61531955°
	ПП-5-3 полуяма	N62.25321411° E129.61452703°

Описание лесного хвойного участка и морфологические особенности почвенного разреза ПП-1 на пробной площадке №1 в Спасской пади

ПП-1 – фаация ландшафта: лиственничник разнотравно-брусничный (состав: 10Л-10Л ед. Б).

- Сомкнутость крон – 0,4-0,5.
- Высота лиственницы от 9 до 11 м, диаметр от 10 до 41 см, возраст 55-167 лет
- Высота березы от 3 до 7 м, диаметр от 5 до 10 см.
- Подрост лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi*) групповой, высотой от 0,4 до 1,6 м, диаметр от 0,6 до 1,5 см.
- Подлесок состоит из ольховника (*Duschekia fruticosa*) высотой от 0,6 до 2,0 м, диаметр от 0,4 до 1,3 см.
- Проектное покрытие: брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea*) – 50%, арктоус красноплодный (*Arctous erythrocarpa*) – 35%, мышинный горошек (*Vicia sylvatica*) – 10%, лимнас Стеллера (*Limnas stelleri*) – 5%.
- СТС – 147 см.



Генетический горизонт	Глубина, см	Морфологические признаки.
O	0,0-4,5	Лесная подстилка
AO	4,5-16,0 (верх. гран. - 4,5 и нижн. гран. - 16)	Грубогумусовый горизонт темно-коричневого цвета, средней плотности, свежий, сухой, граница относительно ровная, заметная
EL	16,0-48,0 (60,0) (верх. гран. - 16 и нижн. гран. – 48(60))	Супесь темно-серого цвета, порошистая, неоднородная – оранжевые пятна, верхняя и нижняя граница волнистая, заметная в нижней части, переход постепенный. Влажный, средней плотности. Единичные крупные корни. На глубине 48-60 см заплывы растворенного древесного угля
CRM	48,0 (60,0)-120,0 (верх. гран. - 48(60) и нижн. гран. - 120)	Супесь темно-серого цвета с оранжевыми затеками, порошистая. Криотурбированный. В горизонте редкие и тонкие корневые волоски. Влажный, средней плотности. Сезонноталый слой до 120 см. Залегает на среднелдыстой мерзлоте. Криотекстура массивная



**Запасы углерода в различных типах биогеоценозах
высокопродуктивной лесной научной станции «Эльгэйи», кг/м²**

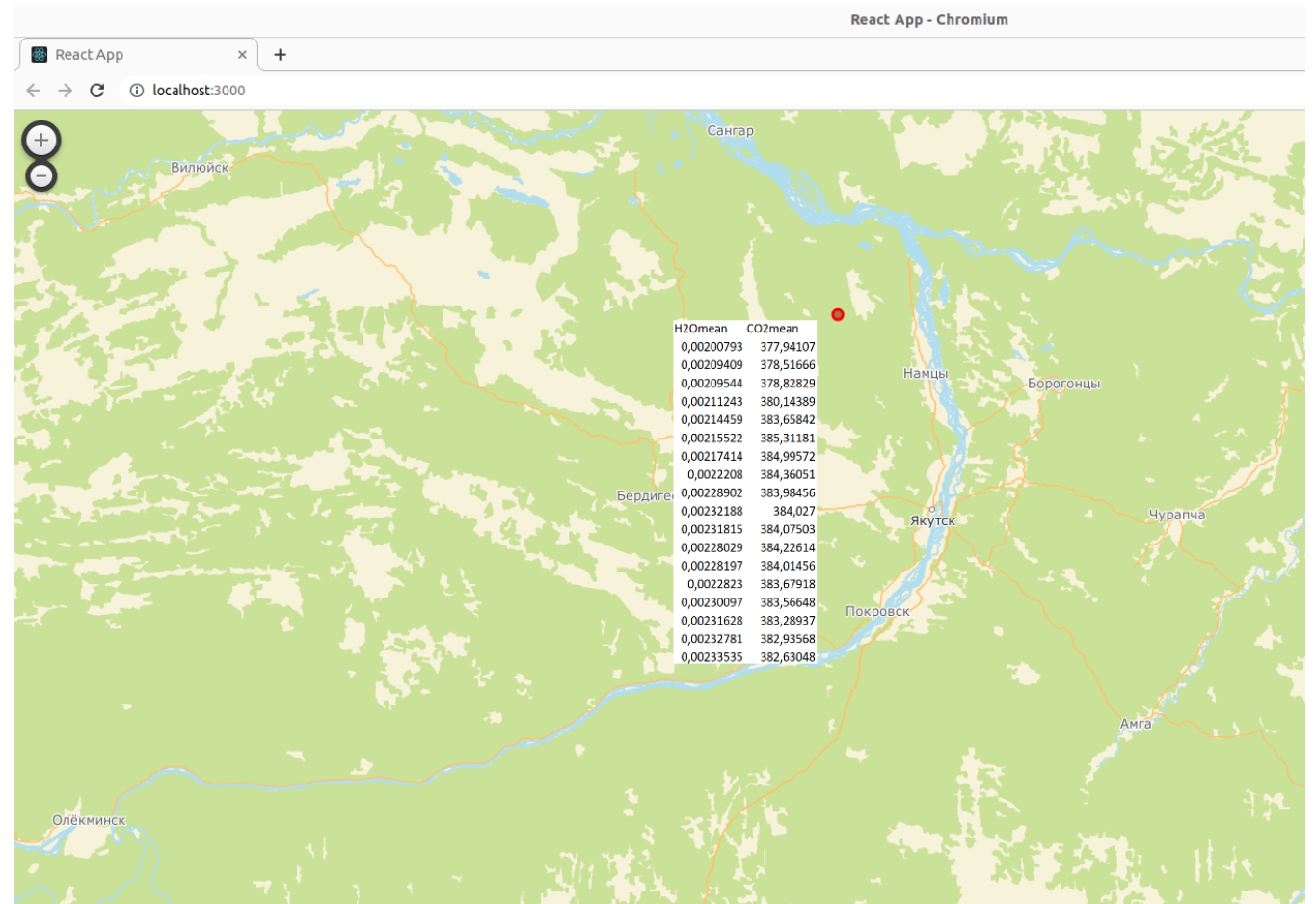
Глубина, см	ТОС	ТИС	ТС
Листо­вен­ни­чный-березовый-разнотравно-бруснич­ный лес			
0-30	19,57	0,25	19,82
0-100	26,79	1,99	28,78
0-200	34,98	8,15	43,13
SD	1,69	0,05	1,33
Сосново-ли­сто­вен­ни­чный-бруснич­ный лес			
0-30	9,28	0,31	9,59
0-100	15,41	6,67	22,09
0-200	18,91	10,46	29,37
SD	0,74	0,10	0,36
Долголет­няя залежь			
0-30	3,37	0,00	3,37
0-100	6,35	3,82	10,17
0-200	8,91	4,88	13,79
SD	0,08	0,08	0,12

Техника восстановления пропущенных данных на основе архитектуры LSTM

- Архитектура LSTM (Long Short-Term Memory) известна своей способностью учесть долгосрочные зависимости в последовательных данных, является ключевым компонентом нашего подхода.
- Двухнаправленная рекуррентная нейронная сеть (на основе LSTM) имеет два слоя: прямой и обратный.
 - Прямой слой обрабатывает последовательность данных в прямом порядке,
 - Обратный – в обратном порядке.
- В результате это позволяет нейронной сети использовать не только предыдущие элементы последовательности, но и существующие после пропущенных значений, и при заполнении пропущенных данных это приводит к значительному повышению точности прогноза.

Разработка веб-приложения (библ. React)

- Загрузка данных:
- Выбор моделей RNN (рекуррентные нейронные сети - класс нейронных сетей, спроектированный для обработки последовательных данных и учёта зависимостей во времени);
- Визуализация результатов;
- Экспорт отчетов.



Изучение почвенных потоков



Автоматические ИКГА: Li-820 (Li-COR, США) с темновыми и прозрачными камерами;
ACE (ADC, Великобритания)

Портативные ИКГА: EGM-4 (PP System, Великобритания)

РИД



Автор: Григорьев А.В.



Автор: Шепелёв А.Г., Максимов Т.Х.

1) ПО для регрессионного анализа коррелирующих последовательностей

- программа вычисляет коэффициенты корреляции последовательностей;
- программа позволяет построить линейную регрессию;
- программа может делать временные сдвиги последовательностей при наличии эффекта задержки.

2) БД содержание углерода в почвах Центральной и Юго-Восточной Якутии

- Оценка органического, неорганического и общего углерода в почвах бореальных ландшафтов на глубинах до 220 см в различные периоды 2022-2023 гг. (в напочвенном покрове в виде подгоризонтов подстилки: опад текущих и прошлых лет (L), ферментативный (F) и гумифицированный (H) слои подстилки) .



Методические рекомендации

1) *Исследования в бореальных и тундровых экосистемах: особенности отбора образцов почвы (краткая инструкция)*

- Специфика отбора почвенного материала в мерзлотных средах
- Инвентарь для исследований

2) *Разработка методического подхода к оценке секвестрации углерода в экосистемах Якутии в изменяющемся климате.*



Разработка методического подхода к оценке секвестрации углерода в экосистемах Якутии в изменяющемся климате

Руководство составлено д.б.н. Т.Х. Максимовым,
Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Якутск, 2023

Автор: Максимов Т.Х.

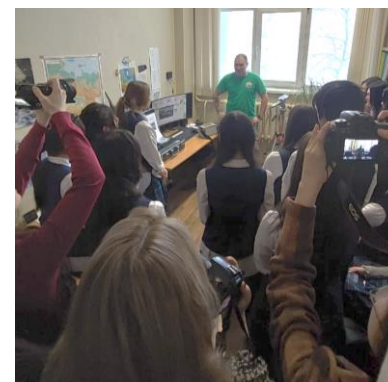
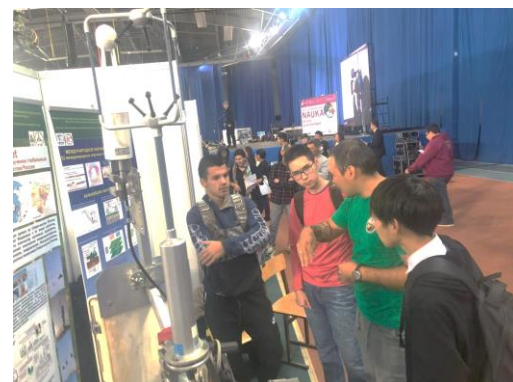
РИТМ
углерода



Автор: Шепелёв А.Г.



Медиакоммуникации и образование



- ✓ Свыше 20 статей и интервью в республиканский и федеральных СМИ
- ✓ Встреча Главы Республики Саха (Якутия) с научным сообществом
- ✓ Стенд на фестивале «Наука O+»
- ✓ День открытых дверей 08.02
- ✓ Лекции в школах и студентам
- ✓ Научную школу для молодых ученых «Численное моделирование многомасштабных, мультифизических проблем освоения криолитозоны» 17-21 июля 2023 г., Якутск.
- ✓ Международная летняя школа «Парниковые газы и климат: мониторинг, манипуляции, моделирование и менеджмент». 7-13 августа, 2023 г. Якутск.

❖ Средне-продуктивная лесная станция «Спасская падь», 62°с.ш.

РИТМ
УГЛЕРОДА



Приглашаем принять участие в XII международной летней полевой школе «Парниковые газы и климат: Мониторинг, манипулирование, моделирование и управление», 16 – 26 июля 2024 г.

Выводы за 2023 г.

- ❖ Годовой сток углерода в 2023 году в репрезентативном мерзлотном лиственничном лесу Центральной Якутии составил $2,6 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ и в мерзлотных лиственничных лесах Юго-Восточной Якутии – $3,2 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$.
- ❖ Максимальные величины поглощения углерода NEE и испарения отмечены в конце июня. Темпы NEE и испарения в 2023 г. были устойчиво выше, чем в предыдущие годы.
- ❖ В условиях Якутии наблюдается значительная консервация в почве углеродсодержащих соединений вне зависимости от биома.
- ❖ В лесном биогеоценозе порядка 73% углерода депонируется в сезонноталом слое и многолетнемерзлых породах, тогда как в растениях всего лишь 27% от общего поступления из экосистемы.
- ❖ В тундровых экосистемах этот показатель составляет 98%. На запас растений приходится – 1,7%.
- ❖ Запасы органического углерода для биома северной тайги распределяются от большего к меньшему в пределах 60% для толщи мощностью 0-100 см и 36% для 100-200 см. В биогеоценозе средней тайги показатели распределения углерода составляют для тех же величин толщ, что и северной тайги, около 53% и 47% соответственно.
- ❖ Разработана техника восстановления пропущенных данных на основе архитектуры LSTM. Архитектура LSTM доказала свою эффективность в улавливании временных зависимостей и точной компенсации отсутствующих значений.
- ❖ Подготовлено веб-приложение для анализа сенсорных данных с помощью искусственного интеллекта.

Благодарю за внимание!

Приглашаем посетить

«Спасская падь!»

Трофим Христофорович Максимов

Эл. почта:

tcmax@mail.ru

Роман Петров (ЕС, SS-12)

Эл. почта:

Gcoe_russia@mail.ru

Андрей Шепелев (ММП, ТОС, ТИС,

Эл. почта:

Carbon-shag@yandex.ru

Александр Григорьев (Моделиров , ИИ)

Эл. почта:

re5itsme@gmail.com

Сергей Карсанаев (ЕС, УП, Медиа и образование)

Эл. почта:

biokars@mail.ru



