

Оценка пулов и потоков углерода мерзлотных экосистем на основе многолетних (с 1998 – 2022 гг.) данных Разработка методического подхода к оценке секвестрации углерода в экосистемах Якутии в изменяющемся климате



РИТМ
углерода



**Максимов
Трофим Христофорович**

доктор биологических наук

- * Заместитель генерального директора ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»;
- * Заведующий отделом экспериментальной биологии растений, главный научный сотрудник ИБПК СО РАН

Площадь Северного полушария составляет 22,35 млн. км², в том числе 7,64 млн. км² в зоне сплошной вечной мерзлоты и 14,71 млн. км² – в зоне неравномерной вечной мерзлоты.

Арктическая зона России (14 млн. км²), как значительная часть планетарного Севера, играет важную роль в формировании и динамике климата планеты, является свободным резервуаром биосферы и, таким образом, выполняет экологические функции глобального масштаба.

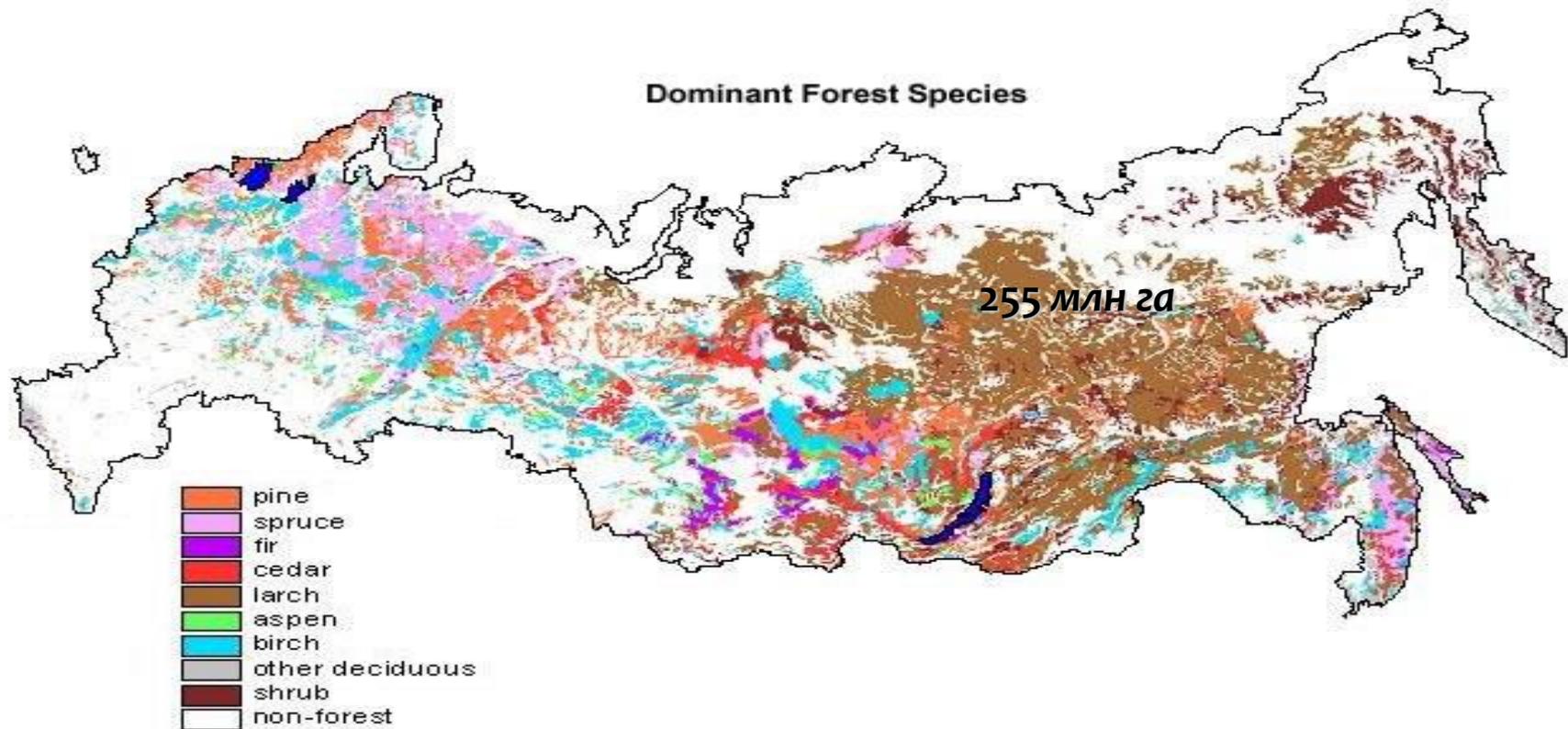


Permafrost Extent



(IIASA 2002)

Репрезентативные лесные экосистемы России



Тема: «Валидация и верификация регионального потока и пула углерода в репрезентативных экосистемах криолитозоны в изменяющемся климате»

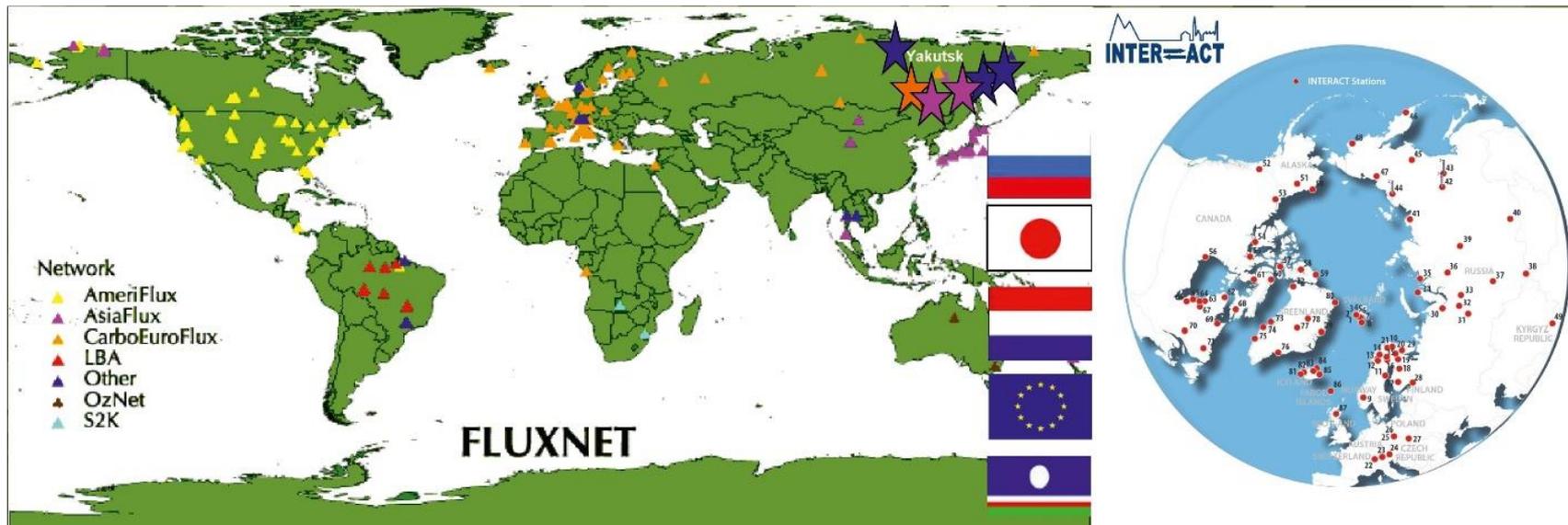
Состав исполнителей – 8 чел (1 - доктор наук, 3 - канд. наук)

- Цель первого этапа – оценка пулов и потоков углерода мерзлотных экосистем на основе многолетних (с 1998 – 2022 гг.) данных, разработать методический подход к оценке секвестрации углерода в экосистемах Якутии в изменяющемся климате.**
- Объект исследования – мерзлотные лиственничные леса разной продуктивности, лесотундра и типичная субарктическая тундра Северо-востока России.**
- Методы проведения работы – общепринятые в мировой практике методы по микрометеорологии с использованием современных систем едди-ковариации (метод турбулентных пульсаций) по изучению потоков энергии, влаги, углекислого газа и метана, автоматических систем почвенного дыхания и элементного анализатора углерода и азота.**

- В результате исследований сделана оценка общего бюджета углерода мерзлотных экосистем и составлен методический подход к оценке секвестрации углерода в экосистемах Якутии в изменяющемся климате - прототип базовой научной лесной станции «Спасская падь ИБПК СО РАН сети наблюдений SakhaFluxNet на Северо-востоке России.
- Рекомендации по внедрению результатов НИР – используя имеющийся многолетний научно-образовательный задел международных станций сети наблюдений SakhaFluxNet предлагается создать национальную сеть мониторинга парниковых газов и климата с достаточным количеством научных станций в репрезентативных природных экосистемах, мега-трансекты SakhaFluxNet использующего междисциплинарную 4М – методологию (мониторинг, манипуляции, моделирование и менеджмент) для валидации и верификации бюджета России в изменяющемся климате. Средне-продуктивная лесная станция «Спасская падь» и тундровая станция «Чокурдах» ИБПК СО РАН предлагаются как тестовые полигоны для изучения динамики мерзлотных экосистем.
- Область применения ПНИЭР – изменение климата, многолетняя мерзлота, бореальные и арктические экосистемы, устойчивое развитие криолитозоны

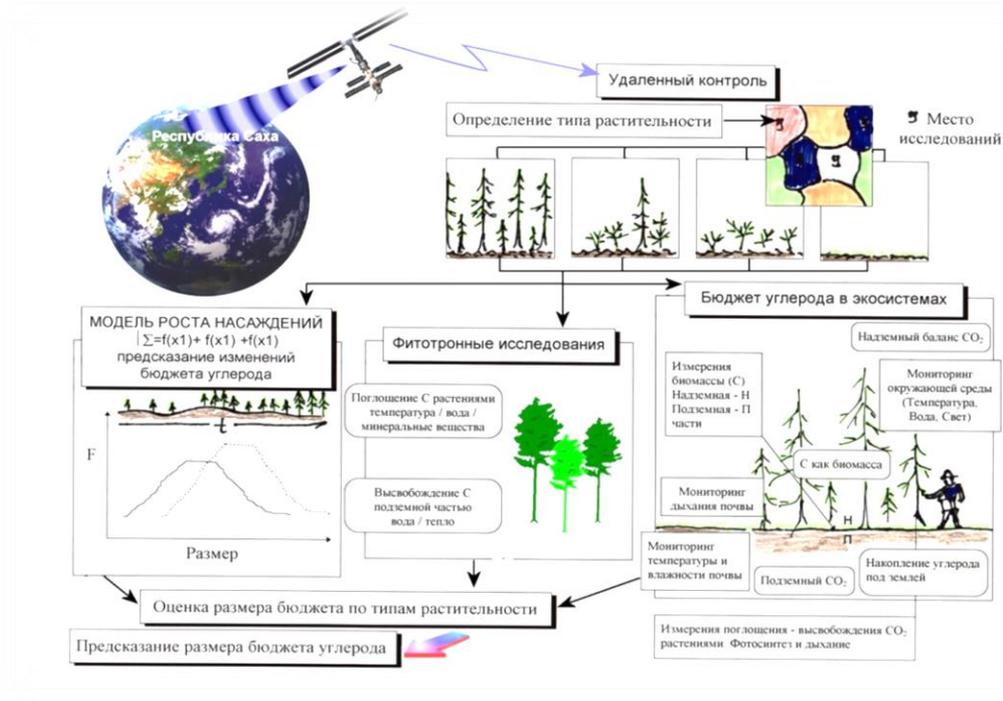


Глобальная и панарктическая сети научных станций по изучению изменения климата на Северо-востоке России



Научные станции SakhaFluxNet ИБПК СО РАН – это компактные научные институты, работающие на мировом уровне в репрезентативных бореальных и арктических зонах России (проекты GlobalCarbon, CarboEurope, AsiaFlux, DIWPA, ScanNet, TCOS-Siberia, PAGE-21, INTERACT и т.д.).

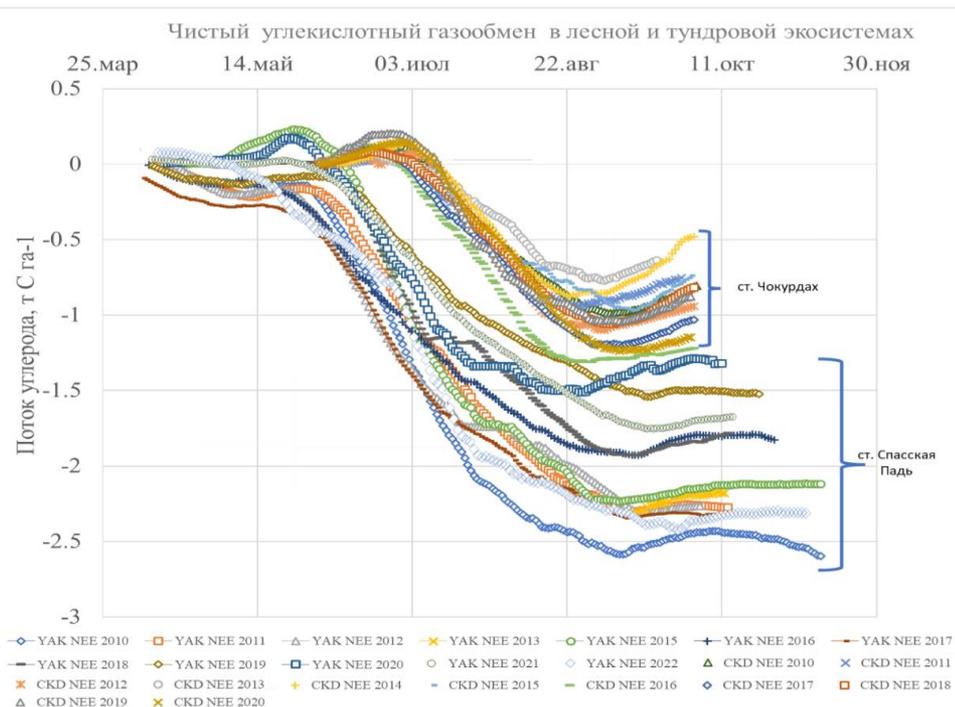
Цель НИР состоит в проведении междисциплинарных научных исследований по валидации и верификации регионального потока и пула углерода в репрезентативных экосистемах криолитозоны в изменяющемся климате»



Используется 4М – подход, учитывая 4 основные аспекты исследований (мониторинг, манипуляции, моделирование, менеджмент) на местном, региональном и глобальном уровнях

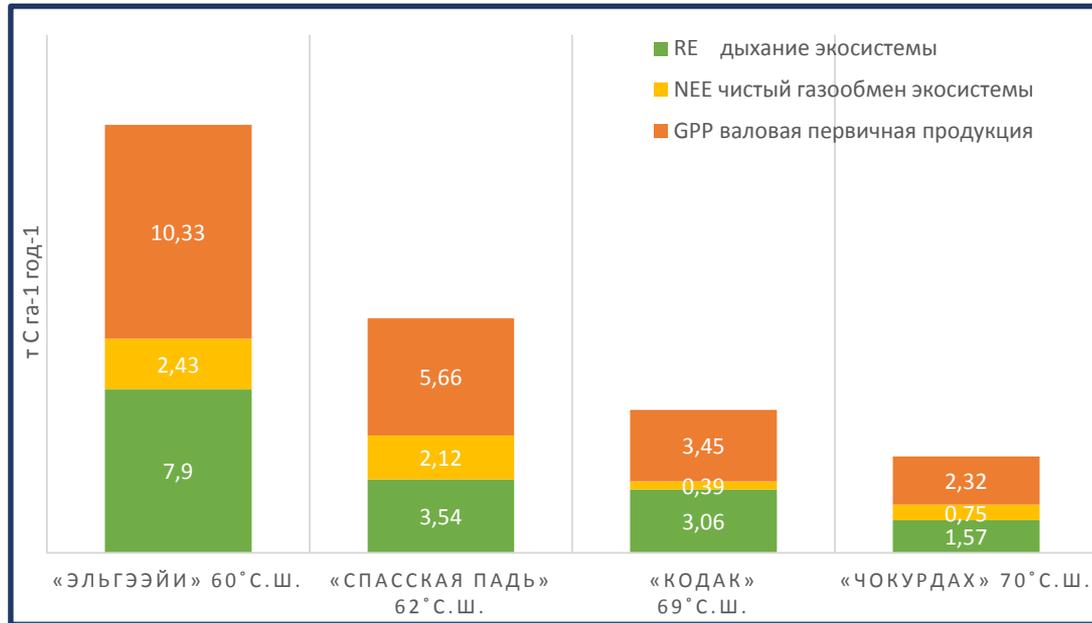
- ❖ 1М (мониторинг) - исследование по горизонтали и вертикали.
- ❖ 2М (манипуляции) - экспериментальные полевые и лабораторные исследования экосистем с моделированием существующих проекций и сценариев изменения климата;
- ❖ 3М (моделирование) - применение математических моделей при обработке эксклюзивного массива многолетних данных 1М и 2М для реконструкции и прогноза;
- ❖ 4М (менеджмент) - использование результатов трансдисциплинарных исследований для взаимодействия фундаментальной науки и общества, заинтересованных сторон и лиц, принимающих решение. Здесь очень важна роль научной дипломатии в научно-образовательном процессе.

Чистый газообмен мерзлотных лесных и тундровых экосистем Северо-востока России, 2010-2022 гг.



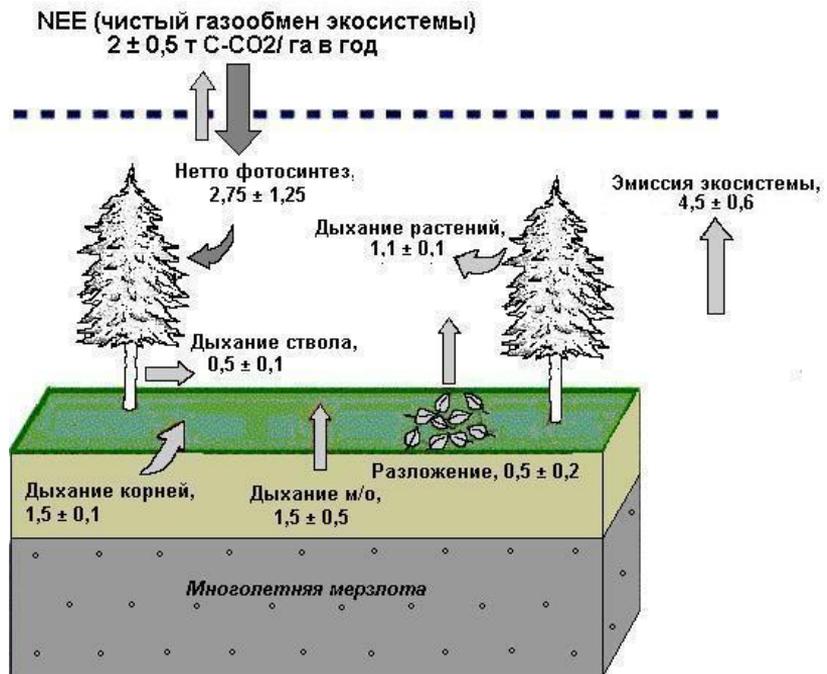
Примечание. YAK – средне-продуктивный лиственничный лес, научная станция «Спасская падь», 62° с.ш.; СКД – типичная тундра, научная станция «Чокурдах», 69° с.ш.

Составляющие углекислотного газообмена репрезентативных мерзлотных экосистем Северо-востока России, 2012-2020 гг.



Показано, что годовой сток углерода в лиственничных лесах южной и центральной Якутии составляют $2,4 \pm 0,3$ и $2,12 \pm 0,5$ т С га⁻¹ год⁻¹ соответственно, тогда как в тундре – $0,75 \pm 0,2$ и лесотундре – $0,39 \pm 0,3$ т С га⁻¹ год⁻¹ (Максимов, 2007; Maximov et al., 2019).

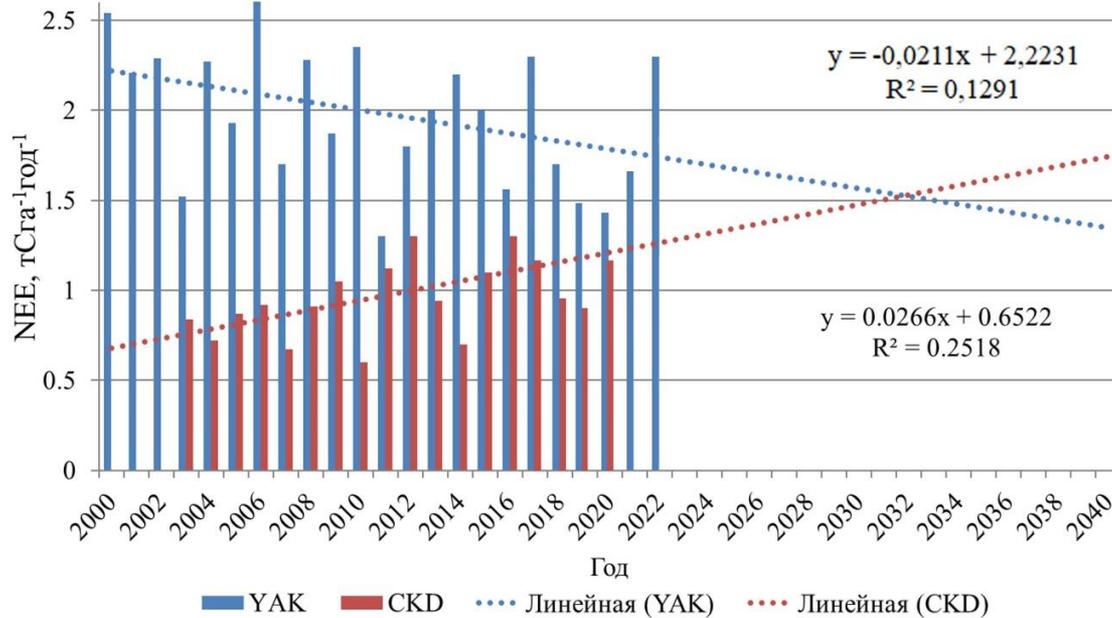
Компоненты углекислотного и водного обменов мерзлотной лесной экосистемы



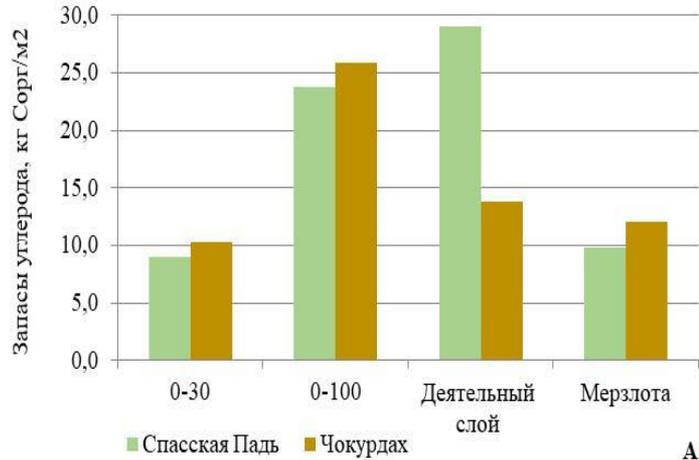
Годовой бюджет углерода лиственных лесов Сибири и Якутии

Территория	млрд т С год ⁻¹	Проценты, %
Ассимиляция		
Сибирь*	1,3	100%
Лиственница Сибири	0,4-1,0	54
Лиственница Якутии	0,2-0,4	23
Эмиссия		
Российские почвы**	2,6-3,0	100%
Лиственница Сибири	0,8-0,9	27
Лиственница Якутии	0,4	12
Чистый газообмен экосистемы, NEE		
Россия**	0,80	100%
Лиственница Сибири	0,45	55
Лиственница Якутии	0,18	22

Временная аппроксимация чистого газообмена экосистемы (NEE, тСга⁻¹год⁻¹) на станциях Чокурдах (СКД, тундра) и Спасская Падь (УАК, средне-продуктивный лиственничный лес), 2000-2022 гг..



Запасы почвенного органического углерода и углерода биомассы в репрезентативных экосистемах Якутии



Примечание. Углерод фитомассы состоит из травяно-кустарничковых и мохово-лишайниковых ярусов. НДБ - надземная древесная биомасса, ПДБ - подземная древесная биомасса

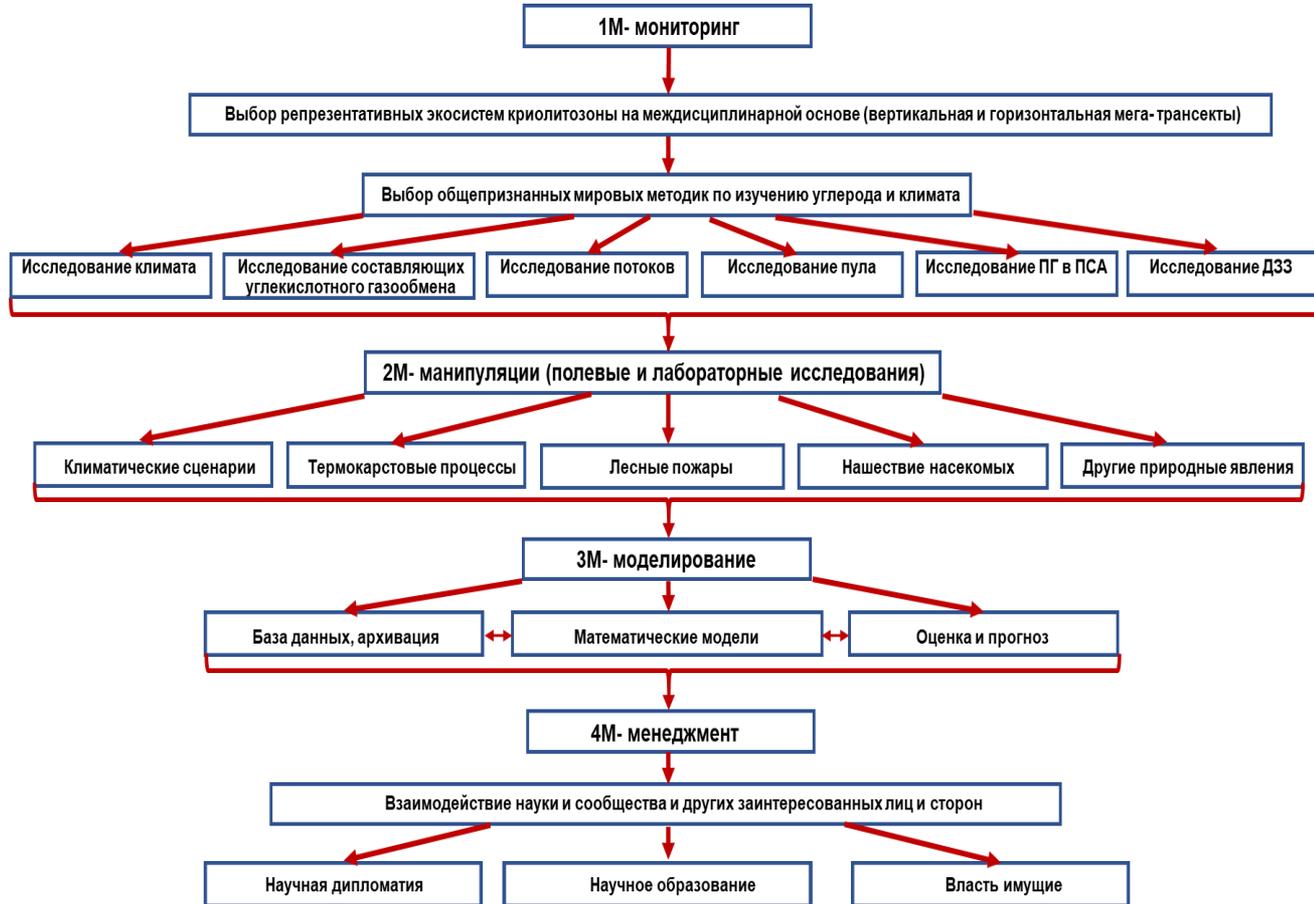
Сравнительная оценка пулов подземного органического углерода в природных зонах Якутии

Регион	Зона	Почвы	Слой почвы, см	Запасы $C_{орг}$, кг/м ²	Литературные источники
Арктический сектор Якутии	Арктическая тундра	-	0-100	9,2	О.В. Честных и др., 1999
	Типичная тундра	-		10,4	
		Глеевые	0-100	16,4	Desyatkin et al., 1994
		Арктотундровые	0-100	25,8	M.B. Siewert et al., 2015
		Палеокриопочвы	0-100	31	J. Strauss et al., 2012
	Горная лесотундра	Арктические пустынные	0-100	21,6	Y. Matsuura et al., 1997
Северная Якутия	Горная тундра	-	0-100	7,9	О.В. Честных и др., 1999
	Южная тундра	-		12,1	
	Лесотундра	-		14,5	
	Лесотундра	Криоземы	0-100	22	Д.Г. Щепашенко и др., 2013
	Северная тайга	Мерзлотные северотаежные типичные	0-100	16,5	Shepelev et al., 2020
	100-200		9,9		
Центральная Якутия	Средняя тайга	Оподзоленные	0-100	17,5	Matsuura et al., 1994
		Глеевые	0-100	15,2	Desyatkin et al., 1994
		Мерзлотно-таёжные	0-100	15,9	Д.Г. Щепашенко и др., 2013
		Мерзлотная палевая осолодевшая	0-100	23,8	Siewert et al., 2015
		Палевые	0-100	17,1	Шепелев и др., 2016
			100-200	15,3	
			200-250	6,3	
0-250	20,7				

Углеродный пул Якутии, млрд. тонн углерода

Площадь Якутии, млн. га	3,10
в.т.ч. леса	126
Тундры	37
Запасы углерода, млрд. т С	
- лесной экосистемы	13,3-15,7
в.т.ч. в растениях	2,2 -4,5
в почве	11,2
- тундровой экосистемы	5,9
в.т.ч. в растениях	0,053
в почве	5,9
Итого	19,2-21,6

Схема разработки региональной системы мониторинга климата и парниковых газов SakhaFluxNet на Северо-востоке России



Горизонтальная трансекта: репрезентативные мерзлотные экосистемы (лес - лесотундра - тундра, протяженность 1100 км)

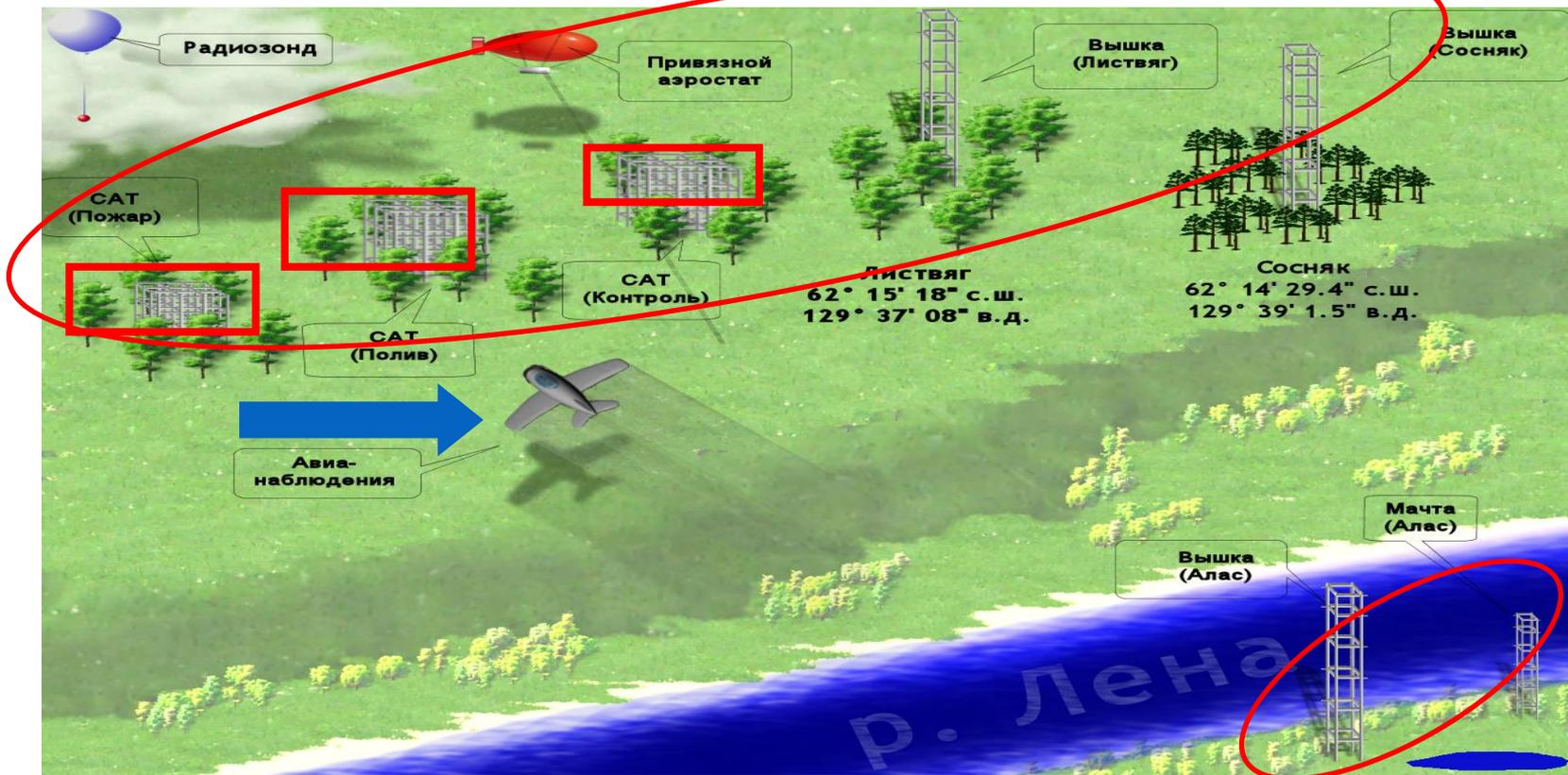


Вертикальная трансекта: атмосфера-биосфера-гидросфера-криолитосфера (до 3000м)

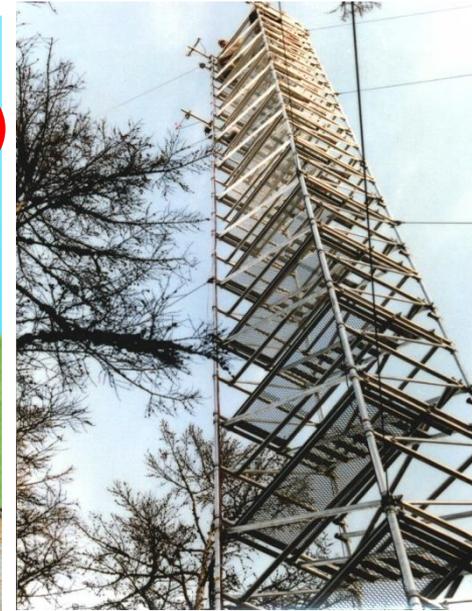
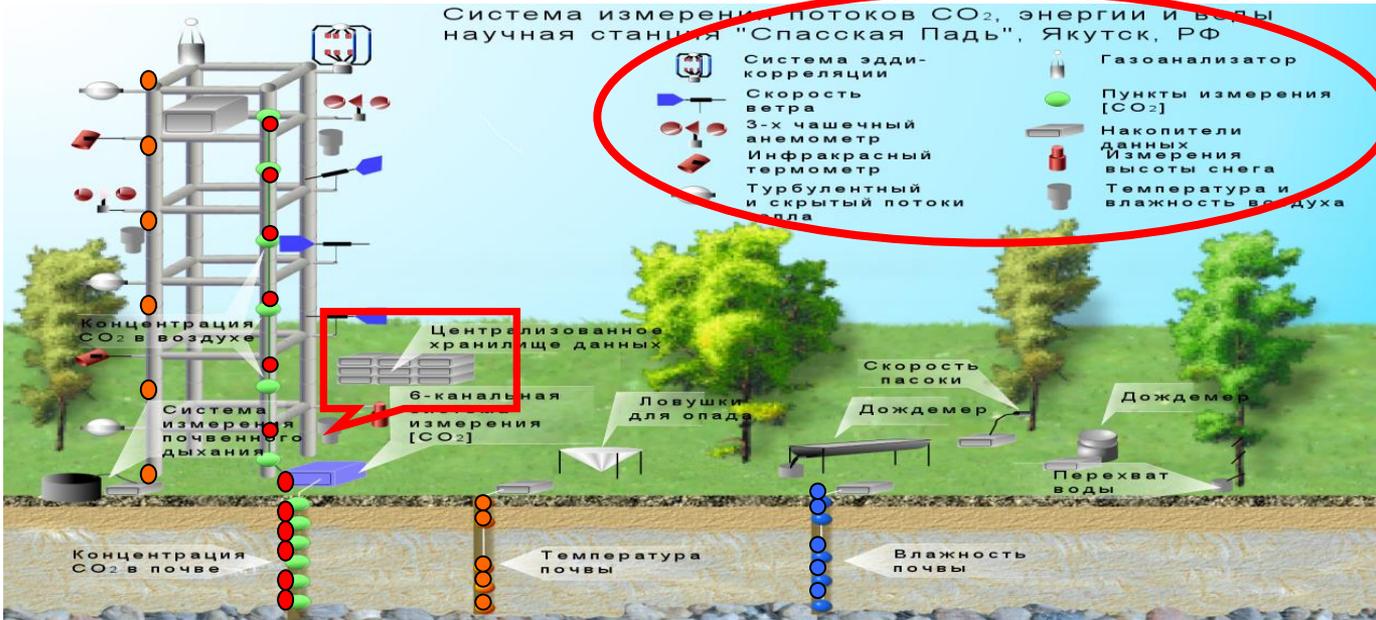


Спутники – NASA Aqua, JAXA; воздушные суда и дроны – Ил-18, Ан-2, eBee;
высотные вышки - 34 и 24 м и мачты; водные суда – лодки, катера, теплоходы

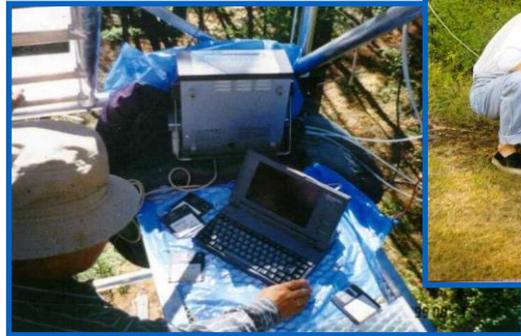
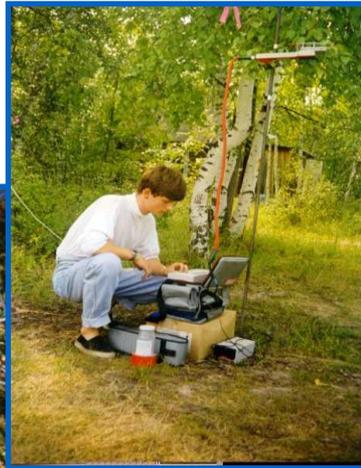
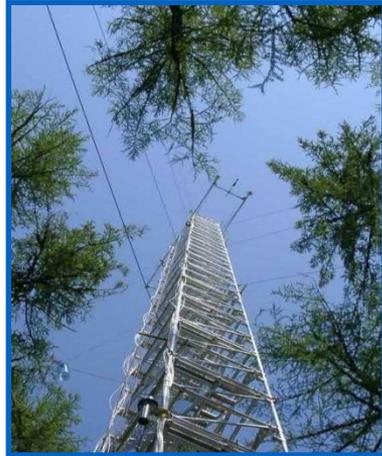
Региональный уровень исследований потоков тепла, влаги и парниковых газов в лесных экосистемах, ст. Спасская падь ИБПК СО РАН, Центральная Якутия



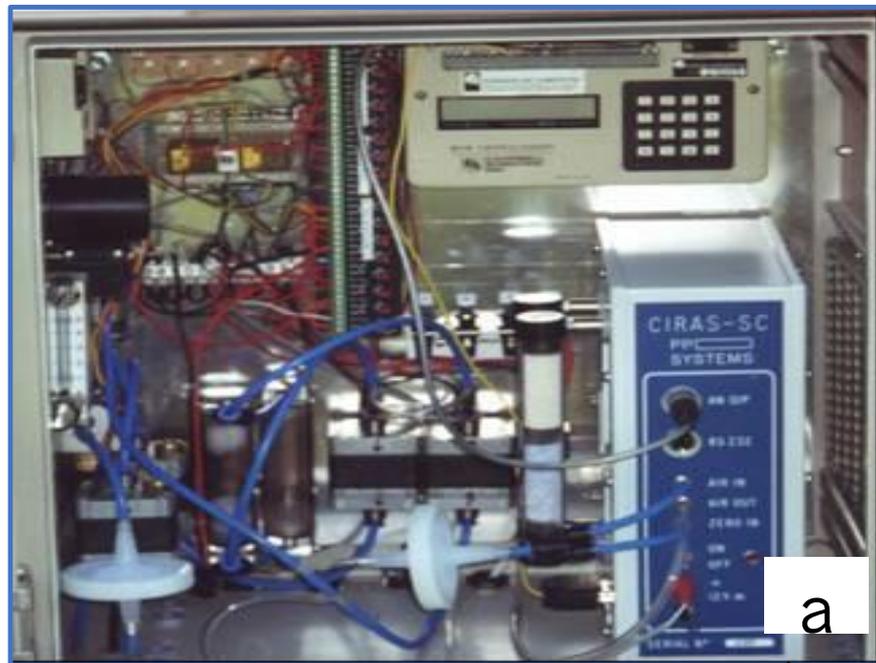
Система измерений потоков CO_2 , энергии и воды
научная станция "Спасская Падь", Якутск, РФ



Исследования углерода на уровне растения



Исследования углерода в почве



а) Система контроля Ciras-SC IRGA; б) Почвенные камеры
Измеряемые параметра – потоки CO_2 и метана, $T_{\text{почвы}}$, Влажность, $[\text{CO}_2]$
и $[\text{H}_2\text{O}]$. Интервал– 1 час (уср данные 4 камер)

Исследования углерода на уровне экосистемы с использованием метода вихревой пульсации (едди-ковариации)



Измерение потоков энергии, влаги и углерода

Перспективы расширения и развития сети научных станций



★ ArcticBorealFlux;

★ НОЦ МУ «Север»

Выводы

- Установлено, что годовой сток углерода в репрезентативном мерзлотном лиственничном лесу Центральной Якутии составляет $2,12 \pm 0,34$ т С га⁻¹ год⁻¹, в мерзлотных лиственничных лесах Юго-Восточной Якутии – $2,43 \pm 0,23$ т С га⁻¹ год⁻¹, а в тундровой зоне – $0,75 \pm 0,14$ т С га⁻¹ год⁻¹.
- Вся территория Якутии является значительным стоком углерода, в среднем этот показатель для лесных экосистем составляет 14,5 млрд. т С, тундровых экосистемах – 5,9 млрд. т С.
- Показано, что в первой декаде 21 века вся территория Российской Федерации была значительным стоком углерода, оцениваемым в 0,7 млрд. т С год⁻¹ из них 90-95% приходится на лесные экосистемы. В мерзлотных лесах криолитозоны заметно преобладает сток углерода, по сравнению с пятью исследованными биомами России. Здесь он больше, чем в лугах и тундрах России в среднем в 1,5 и 4,5 раза, соответственно.
- Многолетний анализ NEE показывает тенденцию повышения годового стока углерода в тундровой зоне, и наоборот, снижение в мерзлотных лесных экосистемах Якутии в связи с экспансией видов в тундре, возрастными изменениями и отпадом древесных растений, деградацией многолетней мерзлоты в условиях потепления климата.

- 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%. В лесном растительном пуле создаются условия большей аккумуляции чистой первичной продукции, чем в тундровых сообществах. При этом основной пул углерода фиксируется в толще почвы, который при прочих равных условиях климатической среды будет минерализоваться до планетарных газов и оставаться в резервуарах экосистемы.
- 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 биоме средней тайги показатели распределения углерода составляют для тех же величин толщ, что и северной тайги, около 53% и 47% соответственно. Приведенная оценка указывает на то, что запасы органического углерода в первом верхнем метре почвы ненамного превышает значения нижнего второго метра или могут быть приближенными и сопоставимыми между собой.

- **Используя имеющийся многолетний научно-образовательный задел международных станций сети наблюдений SakhaFluxNet нами предлагается создать региональную сеть мониторинга парниковых газов и климата с достаточным количеством научных станций в репрезентативных природных экосистемах Якутии - прототип мега-трансекты SakhaFluxNet использующих междисциплинарную 4М – методологию (мониторинг, манипуляции, моделирование и менеджмент) для валидации и верификации бюджета России в изменяющемся климате. Мониторинг должен включать все части природной среды - атмосферу, биосферу, гидросферу и криолитосферу.**
- **При правильном землепользовании и разработке новых сельскохозяйственных, лесотехнических и лесовосстановительных технологий применимые для зоны многолетней мерзлоты с использованием современных достижений в области селекции и физиологии растений данный регион может стать национальным донором углеродных единиц России.**

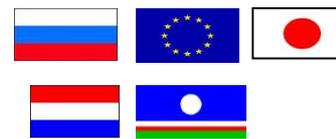
Спасибо за внимание!



Глобальный углеродный пул растений и почв

Экосистема	Площадь, млн км ²	Глобальный запас углерода, млрд т С			NPP, т С га ⁻¹ год ⁻¹
		Растения	Почвы	Общий	
Умеренные леса	10,4	59	100	159	6,3 (2,0-12,5)
Бореальные леса	13,7	88	471	559	4,0 (1,0-7,5)
Тундры	9,5	6	121	127	0,1 (0,0-0,4)
Болота	3,5	15	225	240	0,9 (0,1-3,9)
Пашни	16,0	3	128	131	1,6 (0,2-3,9)
Российские леса	8,8	33	130	163	3,1 (2,6-3,7)
Якутские леса	1,1	3	11	14	3,1±0,3
Якутские тундры	0,4	0,1	6	6	0,6

Средне-продуктивная лесная станция «Спасская падь», 62°с.ш.. Создана 1952 г.



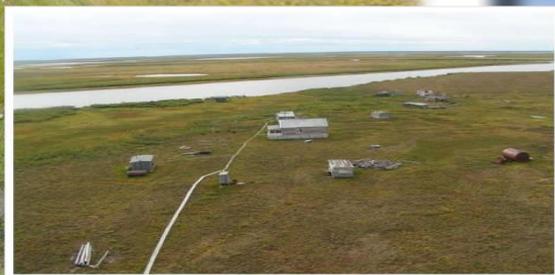
Запасы углерода в почве и древесине лиственничных лесов России

Регион	Почва		Древесина	
	кг/ м ²	%	кг / м ³	,%
По России, 29 регионов усредненная	3.71	100	0.52	100
Центральная Якутия Научная станция Спасская падь	3.82	3	0.49	6
Юго-восточная Якутия Научная станция Эльгээйи	4.67	26	0.43	17

Тундровая научная станция «Чокурдах», 70°с.ш..



Создана 2003 г.



Высокопродуктивная лесная станция «Эльгэйи», 60°с.ш.. Создана 2012 г.



Лесотундровая станция «Кодак», 69°с.ш. Создана в 2018 г.

