

Оценки региональных потоков углерода в Центральной Сибири с 2009 по 2021 год по данным наземных и спутниковых измерений

Рублев А. Н.

ИФА им. А. М. Обухова РАН

Голомолзин В. В.

Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета»

Горбаренко А. В.

Сколковский институт науки и технологий

Ю.В. Киселева

ИФА им. А. М. Обухова РАН

Москва

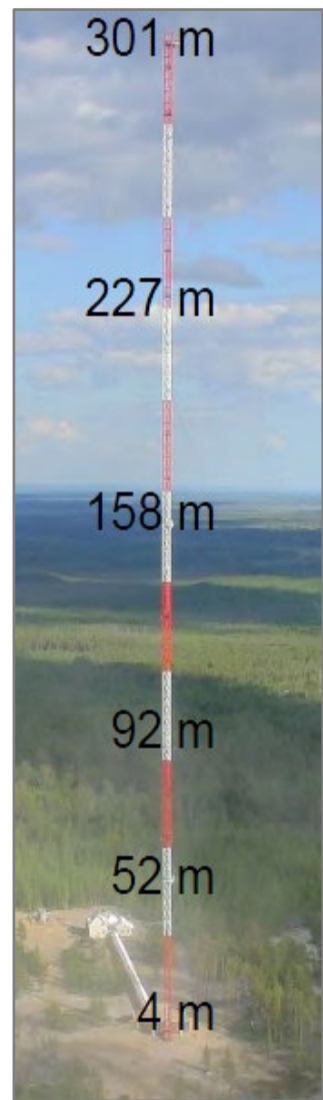
8 апреля 2026

Содержание

1. **Обсерватория высотной мачты ZOTTO**
(экспериментальная площадка Института леса им В.Н. Сукачева СО РАН)
2. **Методика определения потоков углерода по измерениям концентрации CO₂ на высотной мачте ZOTTO и их валидация**
3. **Оценки потоков по спутниковым данным и метеорологическим наблюдениям**
4. **Заключение**



Измерения концентраций парниковых газов на высотной мачте международной обсерватории ZOTTO



Основные достоинства:

- Лазерные измерения CO_2 и CH_4 газоанализатором EnviroSense 3000i (Cavity Ring Down Spectroscopy). Ошибка измерения объемной концентрации CO_2 не более 0.05 млн^{-1} .
- Автоматическая калибровка измерительной системы по эталонным калибровочным газовым смесям через каждые 100 часов работы
- Практически одновременное измерение за счет специальных воздушных буферов концентраций газов на всех уровнях с периодом ~ 18 минут
- Коррекция присутствия водяного пара по измерениям в его линиях поглощения.
- Данные многолетних измерений находятся в открытом доступе:

Tran et al. (2024) Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) hourly CO_2 measurement dataset. <https://doi.org/10.17617/3.YBPFG2>

Данные реанализа и метеонаблюдений доступны с сайтов:

Hersbach et al. (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS),

DOI: [10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47)

Расписание Погоды, 2025, <https://rp5.ru/>



Футпринт мачты обсерватории «ZOTTO»

Классы земной поверхности в
75% - футпринте мачты
ZOTTO

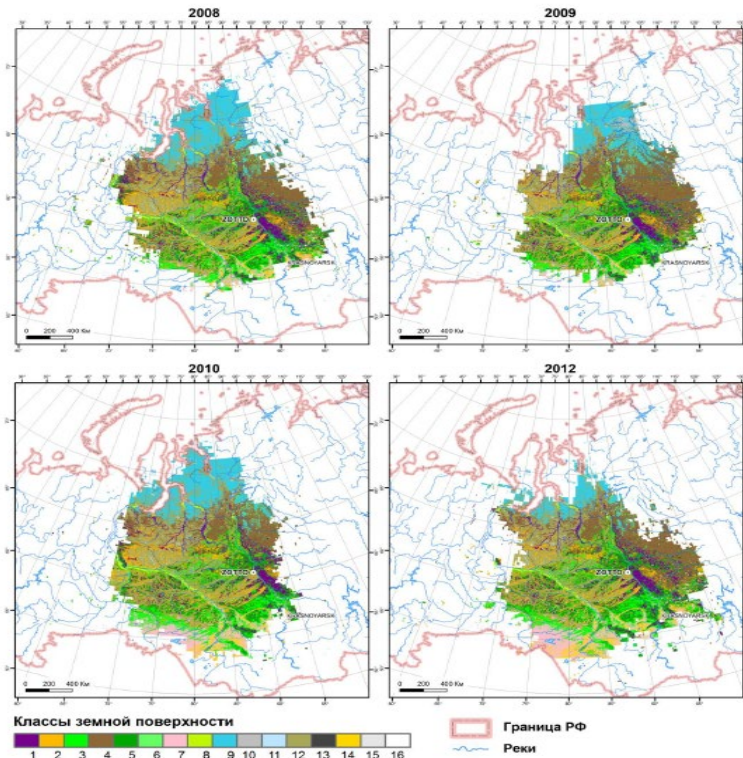


Рисунок подготовлен М.А. Корецом

По различным литературным источникам площадь футпринта, на границах которого вклад территории составляет 75% от максимальной изменчивости концентрации по отношению к свободной атмосфере, оценивается от 10^4 до 10^6 кв. км в зависимости от времени и высоты измерений, направления и скорости ветра



Тимохина, А. В. Динамика концентрации атмосферного диоксида углерода над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири (по данным измерений на обсерватории "ZOTTO"), кандидатская диссертация, Красноярск : СФУ, 2017

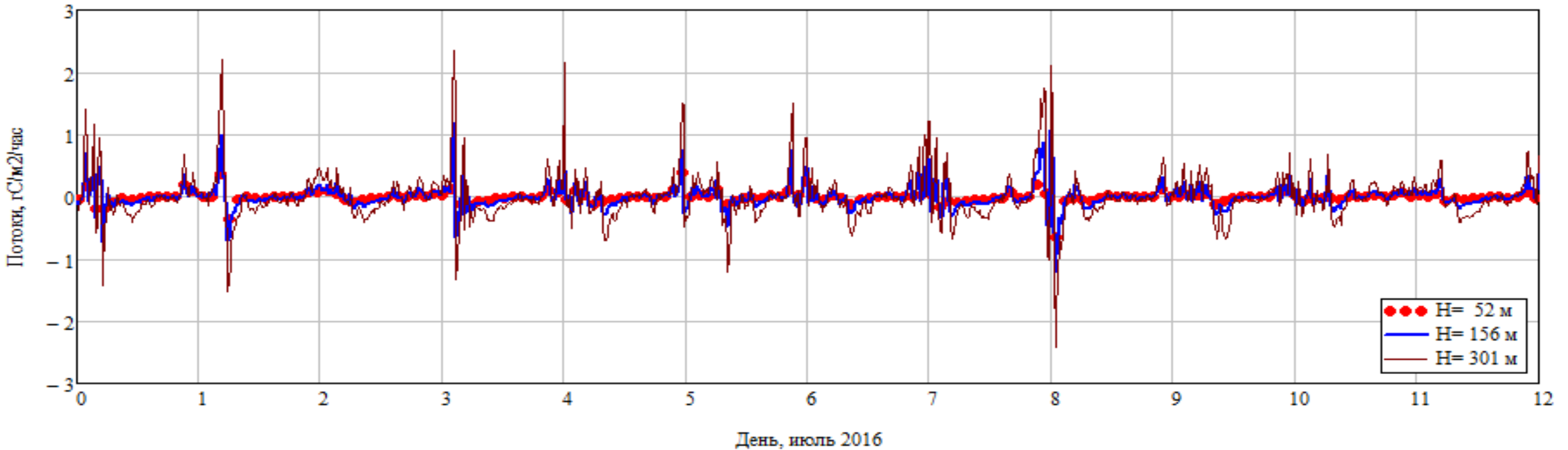
Переход от объемных концентраций углерода к его потокам

Изменение массовой концентрации углерода, г/м³:

Поток углерода за i-й час, г/м²/час

$$\Delta C(z) = \Delta X_{CO_2}(z - h) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{P(z)}{P_0} \cdot \left(1 - \frac{H_2O(z - h)}{P(z)}\right) \cdot \frac{T_0}{T_0 + tC(P(z))} \cdot \frac{MC}{22.4 \cdot 10^{-3}}$$

$$QC_i := \int_h^{H_{mix}} \Delta C_i(z) dz$$



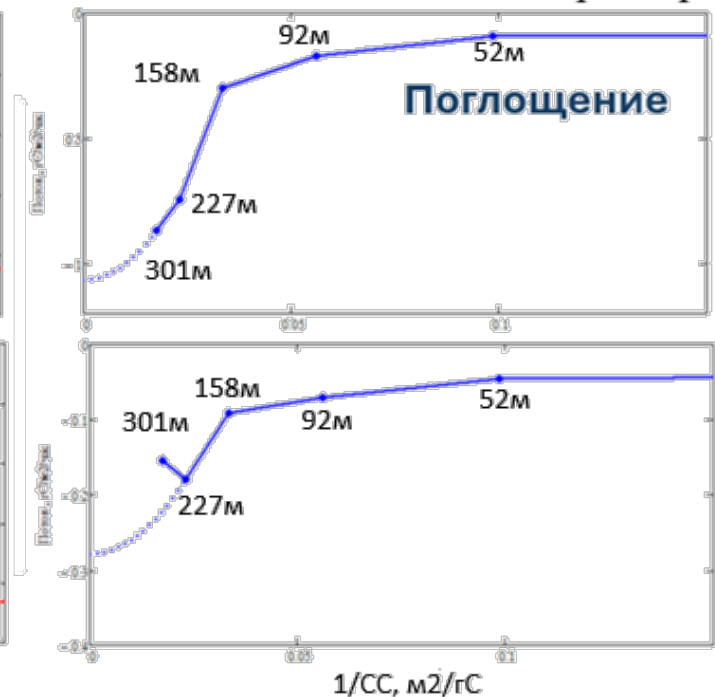
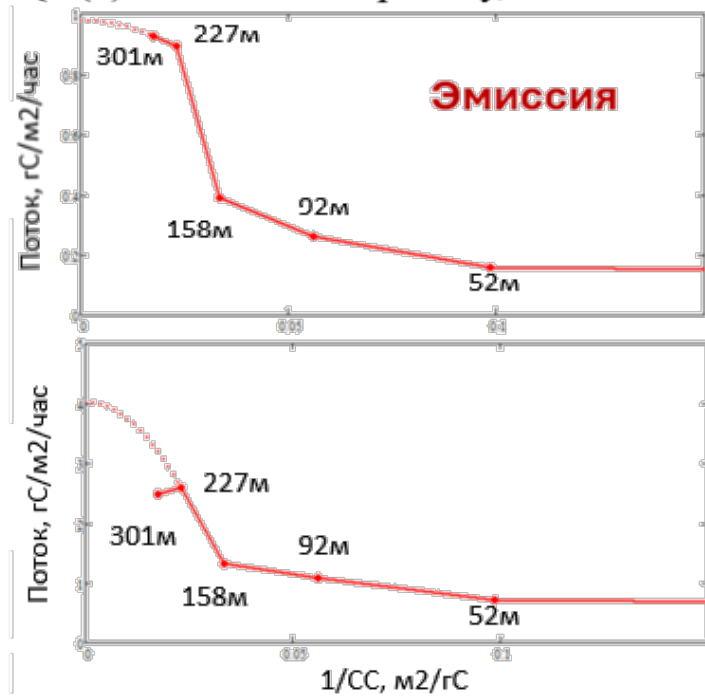
Коэффициенты корреляции вычисленных потоков с температурой и давлением не превышают единиц процентов

Двухшаговая оценка углеродных потоков

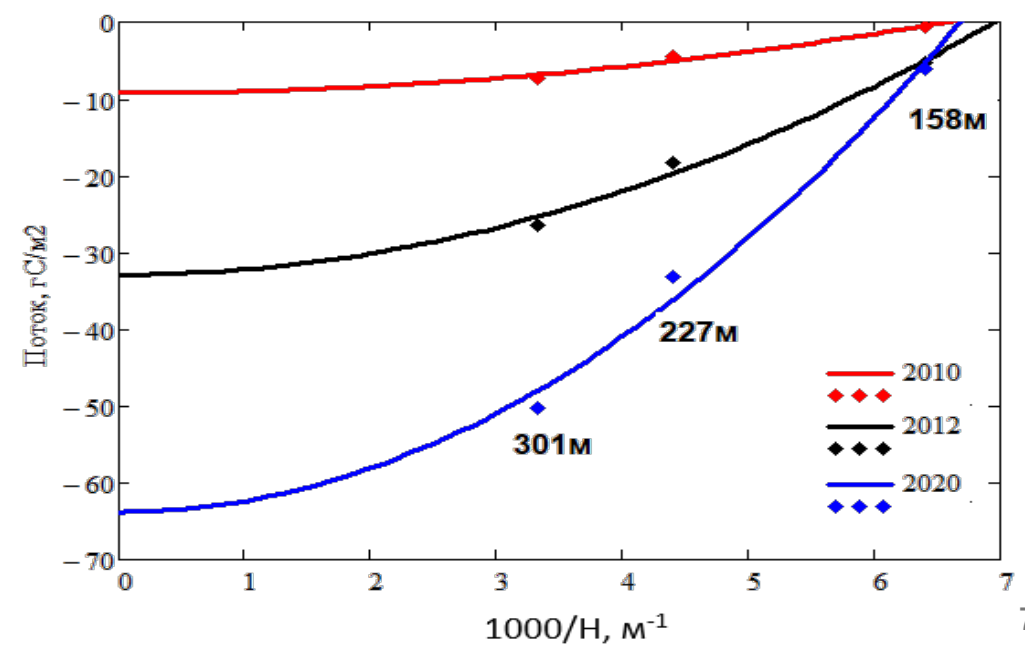
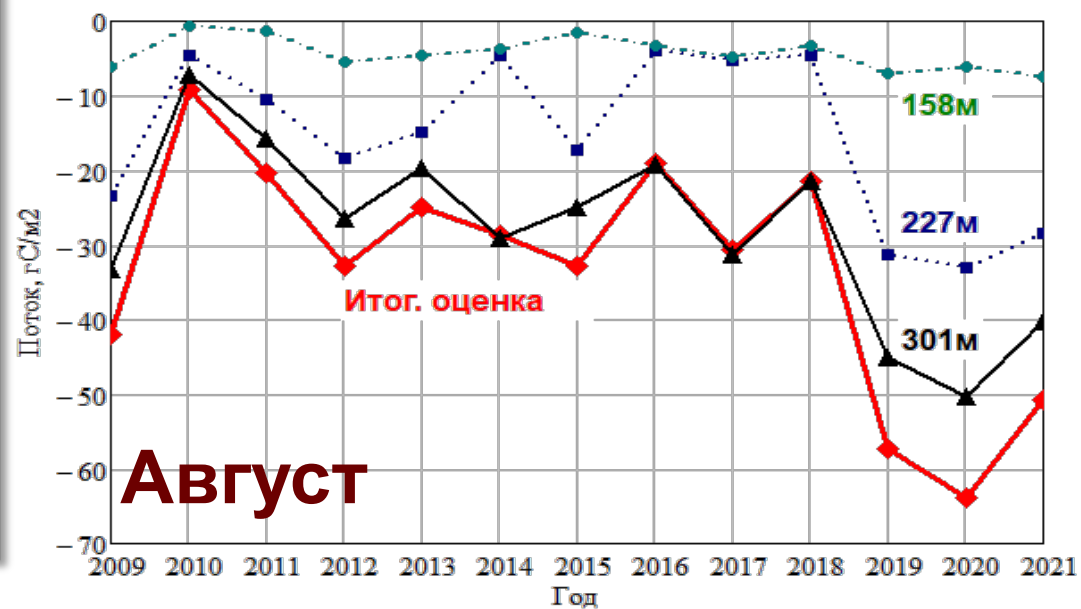
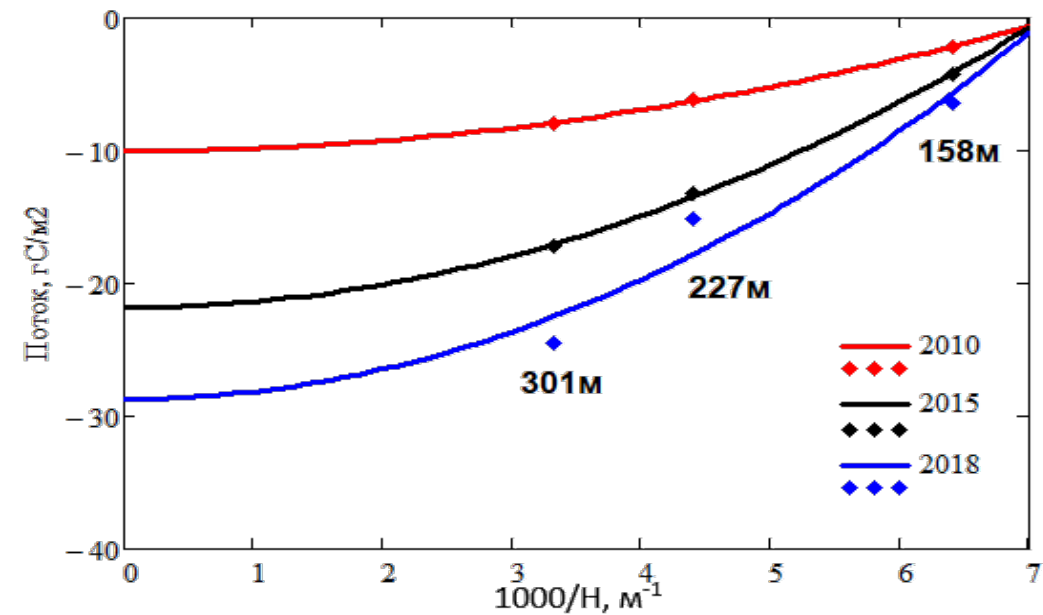
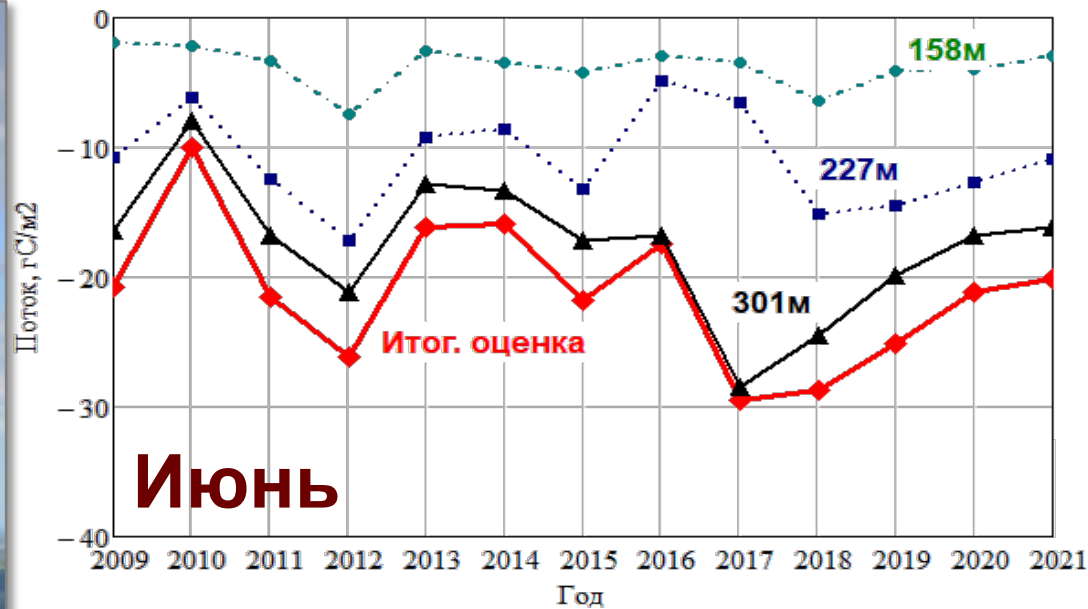
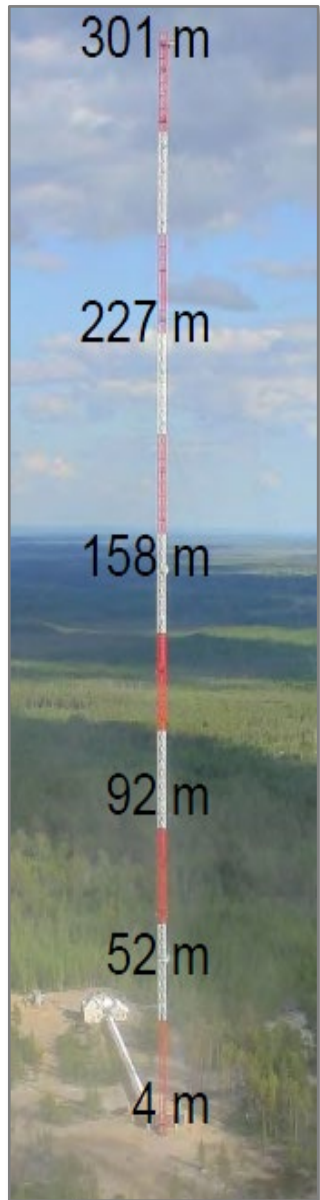
1. Аналитическая оценка обменных потоков углерода

Основное допущение: источником/поглотителем углерода являются подстилающая поверхность, поэтому оценка эмитированного/поглощенного потока углерода $QC = \int_h^H \Delta C(z) dz$ с высотой H должна изменяться **монотонно до границы слоя перемешивания (СП)** и достигая насыщения $QC_{\max}$ с нулевой производной. Вычисление QC во всем СП интегрированием по z невозможно, т.к. высота H_{mix} СП неизвестна. Допустимо использовать экстраполяцию по значениям QC_n , вычисленным для высот H_n измерительных площадок мачты, но прямая нелинейная экстраполяция QC_n по содержанию углерода (CC_n) в слое с высотой H_n (или самим H_n) для оценки $QC_{\max}$ практически невозможна. В СП с высотой, например, $H_{\text{mix}} = 2$ км находится около 400 гС/м^2 , что в 6 раз превышает CC в слое с высотой 301 м, поэтому экстраполяция, при которой знание H_{mix} не требуется, проводится по значениям x_n , обратным CC_n . Выбрав экстраполирующей функцией $QC(x) = a \cdot x^2 + b$ – параболу, можно аналитически оценить ее параметры, обеспечивая гладкое сопряжение $QC(x)$ с измерениями на первом отрезке, для которого начинается выполняться условие монотонности.

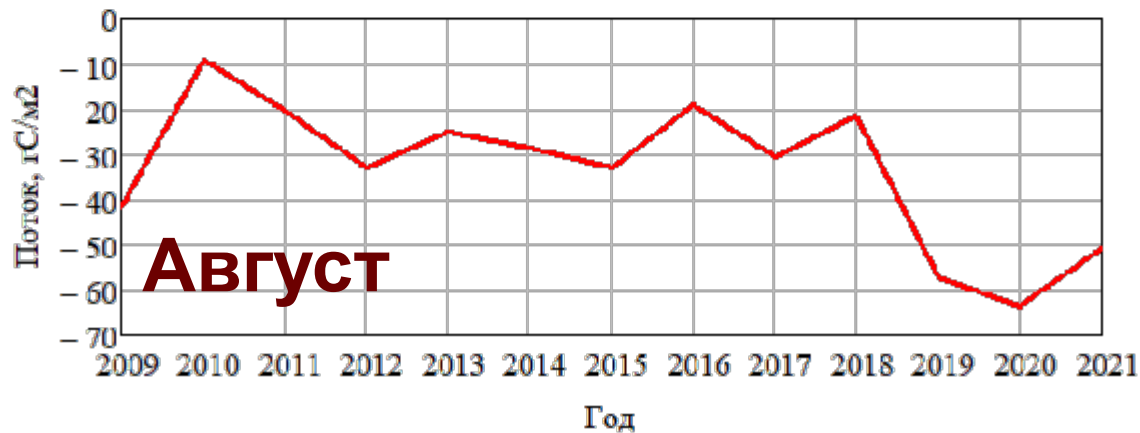
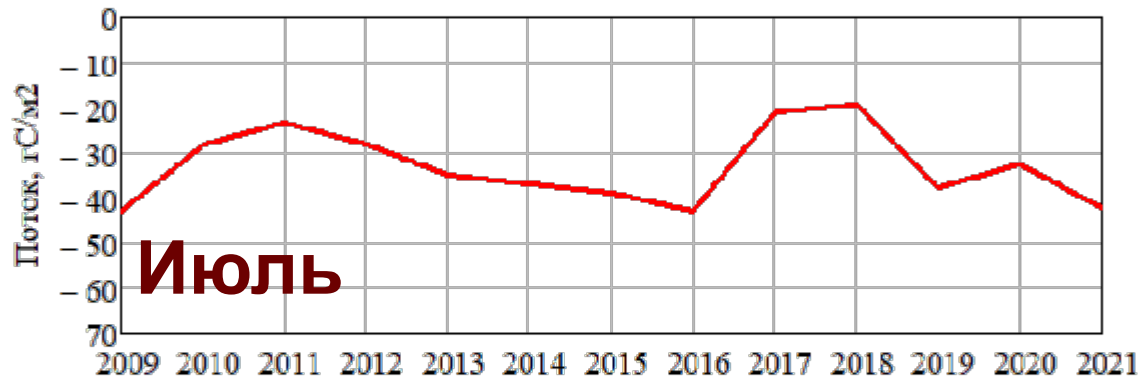
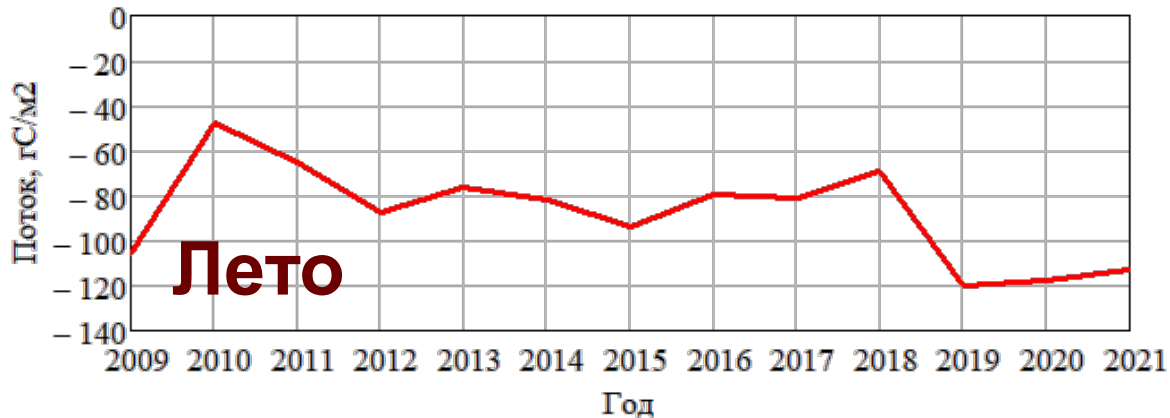
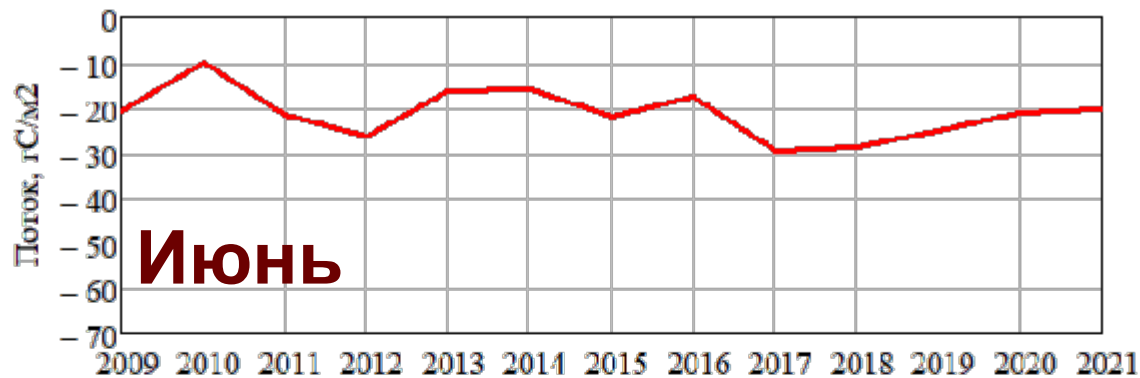
$$QC_{\max} = QC_n - \frac{1}{2} \cdot x_n \cdot \frac{d}{dx_n} QC$$



2. Уточнение оценки углеродных потоков по регрессиям



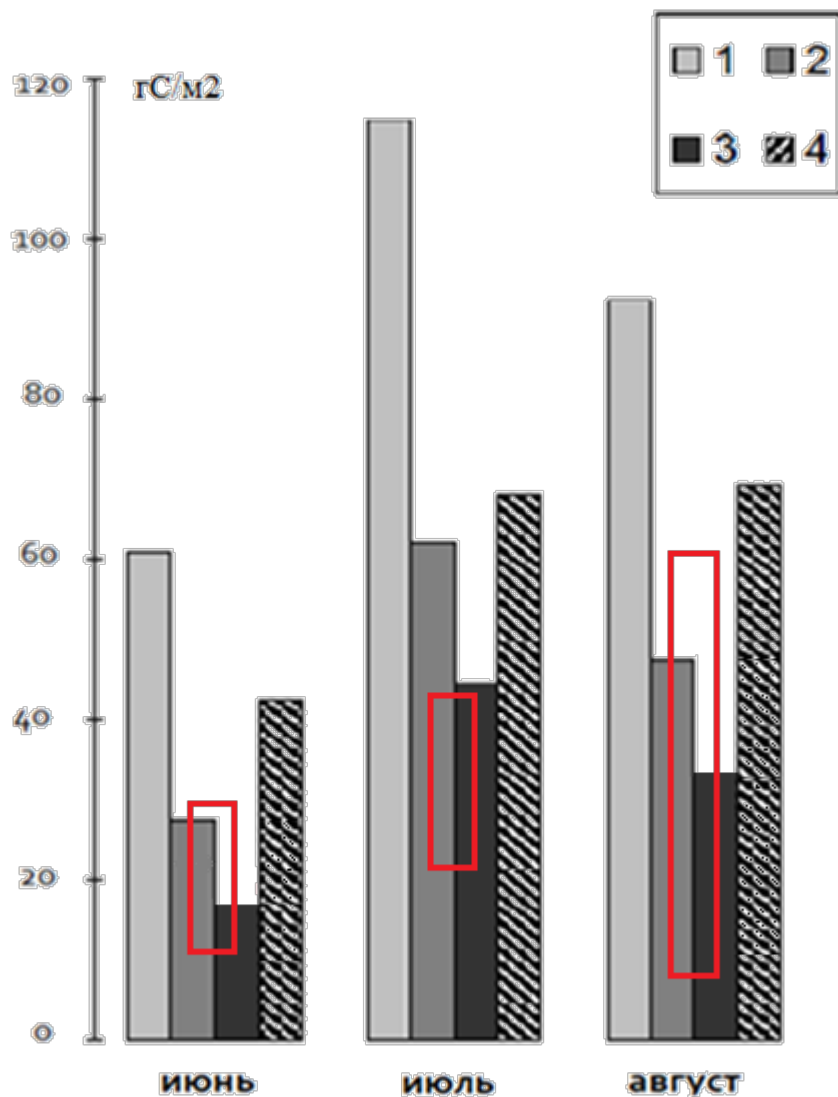
Межгодовой ход (2009 -2021) потоков углерода в летние месяцы



Статистические параметры оценок потоков, гС/м²

Параметры	Июнь	Июль	Август	Лето
			т	
Среднее	-21.1	-33.1	-33.4	-87.6
Медиана	-21.2	-35.2	-30.7	-81.7
СКО	5.5	8.3	16.0	21.7
Максимум	-10.0	-19.3	-9.3	-47.5
Минимум	-29.5	-42.9	-63.8	-120.3

К валидации вычисленных потоков



Оценки поглощения CO₂ за летние месяцы **2009 г.** по разным методикам:

1, 2, 3 – оценки биометрическим (балансовым) методом для бореального леса возрастом 20, 55 и 90 лет.

4 – оценка по методу бюджета ABL (Atmosphere Boundary Layer).

Возраст сосен в окрестностях ZOTTO: 80 – 180 лет

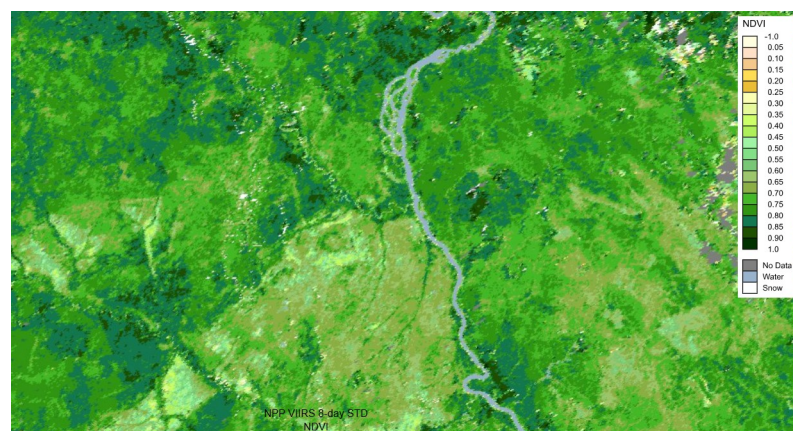
Barkhatov, Y.V., P.V. Belolipetsky, A.G. Degermendzhi, V.M. Belolipetskii, S.V. Verkhovetsc, A.V. Timokhina, A.V. Panov, A.L. Shchemela, E.F. Vedrova, O.V. Trephilova. Modeling of CO2 fluxes between atmosphere and boreal forest. The 18th Biennial Conference of International Society for Ecological Modelling. Procedia Environmental Sciences 13 (2012) 621 – 625

Горизонтальными границами красных прямоугольников отмечены минимальные и максимальные значения оценки потоков соответствующих месяцев в **2009-2021** годах, вычисленные по измерениям ZOTTO

Предикторы регрессий

NDVI - продукт MOD13A1 (версия v6) многоканального радиометра MODIS на спутниках NASA Terra/Aqua, с 16-дневной периодичностью и пространственным разрешением 500 м.
Район Центральной Сибири (60-61° с.ш., 89-91° в.д)

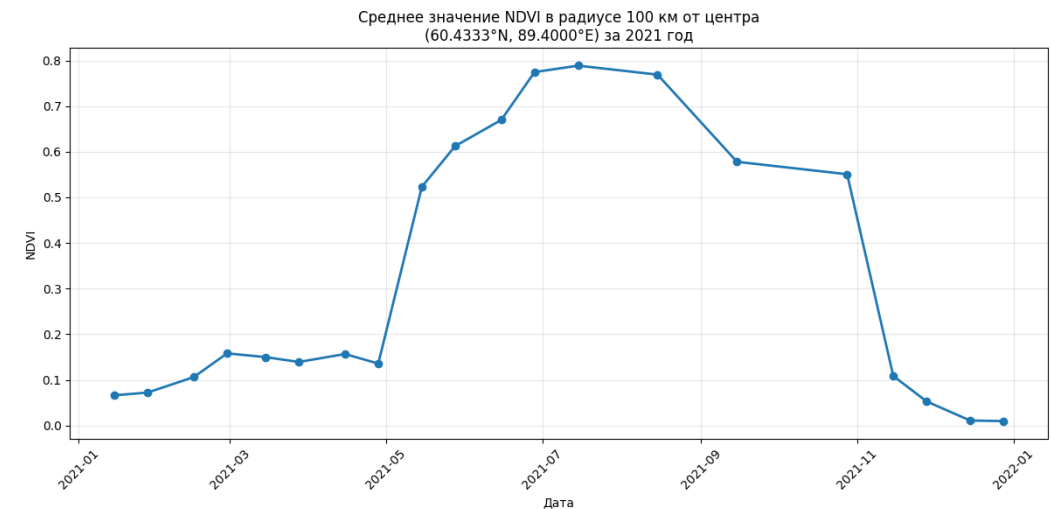
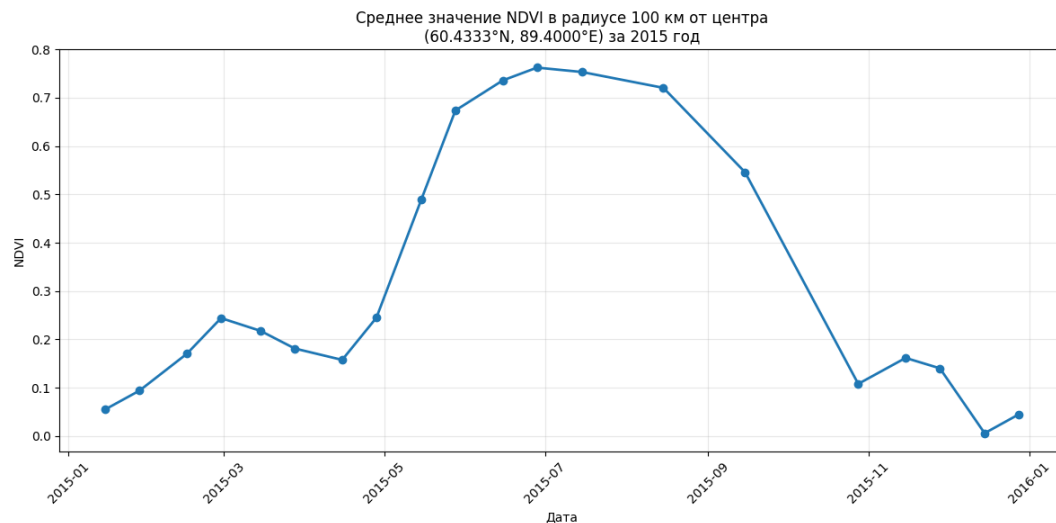
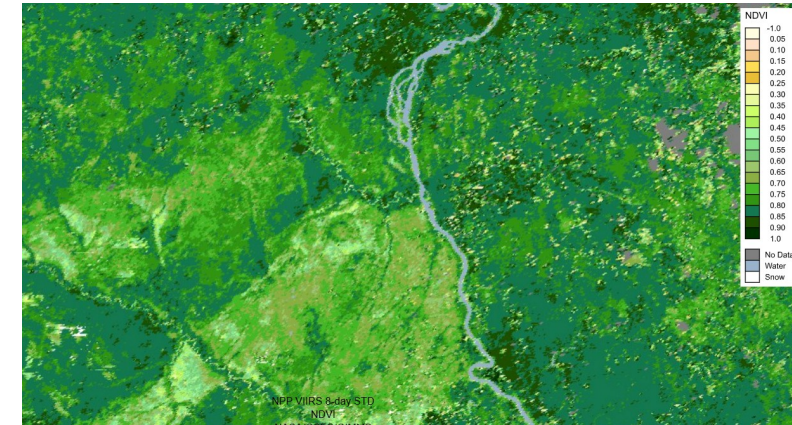
Июнь



Июль



Август



Предикторы регрессий

Средние месячные и годовые температуры (°C) воздуха в Бору

год	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	за год
1934	-22.6	-13.2	999.9	999.9	999.9	999.9	16.1	15.4	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9
1935	-23.0	-14.0	-10.4	-6.6	4.5	14.8	16.0	11.7	5.8	-6.5	-17.1	-29.1	-4.5
1936	-26.1	-20.7	-14.4	-3.6	4.9	9.6	17.4	13.0	9.4	-0.6	-19.9	-16.5	-4.0
2009	-22.1	-27.5	-11.6	0.6	3.4	13.4	19.5	15.5	8.0	-2.1	-19.5	-32.0	-4.5
2010	-28.7	-28.4	-11.5	-1.3	4.2	13.4	16.1	13.0	5.4	0.4	-11.1	-30.5	-4.9
2011	-24.4	-20.1	-6.5	2.3	8.5	18.5	14.0	12.8	8.6	2.3	-12.5	-15.8	-1.0
2012	-25.0	-17.8	-9.5	-0.1	6.6	18.2	19.9	12.5	10.9	-3.5	-17.4	-29.6	-2.9
2013	-26.0	-20.6	-14.3	-0.3	4.2	14.7	19.1	15.7	5.4	-1.7	-8.3	-11.9	-2.0
2014	-24.9	-26.9	-6.8	1.4	4.8	14.5	18.9	12.3	4.8	-4.9	-17.1	-13.1	-3.1
2015	-21.3	-14.5	-8.6	2.0	8.7	17.2	18.8	13.9	6.0	-2.3	-15.0	-11.2	-0.5
2016	-26.4	-14.8	-6.7	2.5	4.5	19.2	19.9	15.5	9.8	-5.4	-18.7	-21.1	-1.8
2017	-23.1	-14.7	-3.8	-0.8	5.1	17.7	17.7	14.2	5.1	-1.6	-13.4	-14.4	-1.0
2018	-25.3	-20.3	-11.3	-1.7	2.3	19.6	16.7	14.0	8.1	3.5	-15.7	-26.9	-3.1
2019	-18.0	-18.9	-3.7	-1.6	5.9	15.1	19.9	16.5	7.5	0.0	-16.4	-18.6	-1.0
2020	-13.2	-12.3	-5.3	5.9	10.9	14.9	17.2	17.8	10.2	-1.7	-7.5	-24.1	1.1
2021	-31.0	-23.1	-9.7	-0.2	6.2	12.5	18.0	15.3	7.0	0.9	-11.3	-22.2	-3.1
2022	-18.0	-14.4	-11.4	0.8	9.9	15.8	17.3	13.3	5.9	0.8	-14.7	-22.2	-1.4

Предикторы регрессий

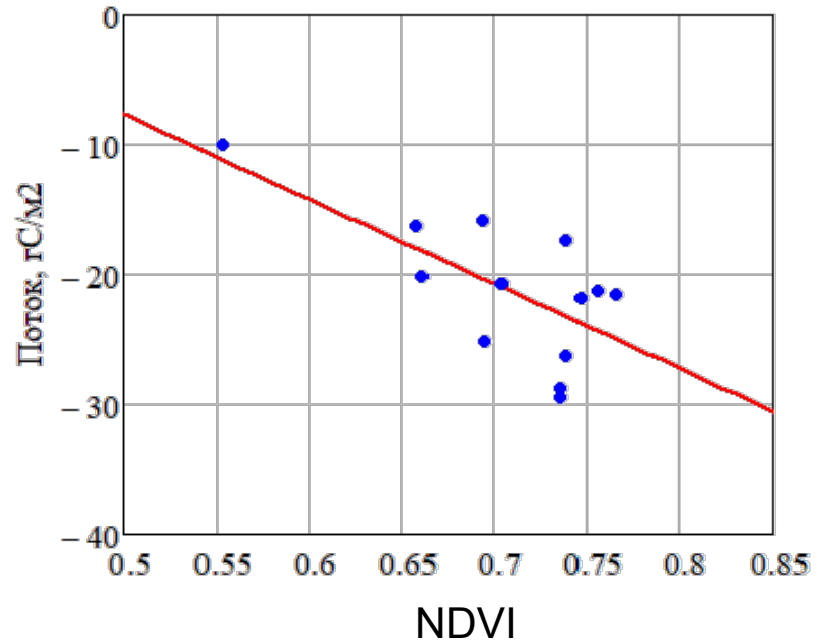
Месячные и годовые суммы выпавших осадков (мм) в Бору

<https://www.pogodaiklimat.ru>

год	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	за год
1936	35	24	23	7	22	33	87	106	39	61	41	19	497
1937	15	11	7	19	47	46	46	92	47	34	33	26	423
2009	38	12	18	29	28	34	38	72	50	38	50	31	437
2010	49	15	20	19	44	64	76	89	93	61	49	30	609
2011	17	26	30	32	35	39	112	94	35	44	52	40	554
2012	27	15	23	18	25	24	7	56	73	55	46	16	383
2013	51	22	38	39	91	75	15	64	112	65	56	69	698
2014	48	26	55	35	44	60	51	83	73	80	42	48	646
2015	59	48	45	53	29	37	117	135	67	83	22	65	761
2016	2	39	39	27	29	28	32	38	11	15	68	58	385
2017	45	29	38	42	84	79	73	109	83	41	64	56	743
2018	36	17	44	37	61	29	34	99	71	57	52	38	575
2019	48	21	37	64	59	74	53	83	64	68	55	57	681
2020	57	29	92	7	72	52	123	66	67	87	57	40	749
2021	30	41	60	45	68	88	54	95	93	69	80	36	757
2022	42	24	53	25	78	77	76	67	62	59	42	32	636

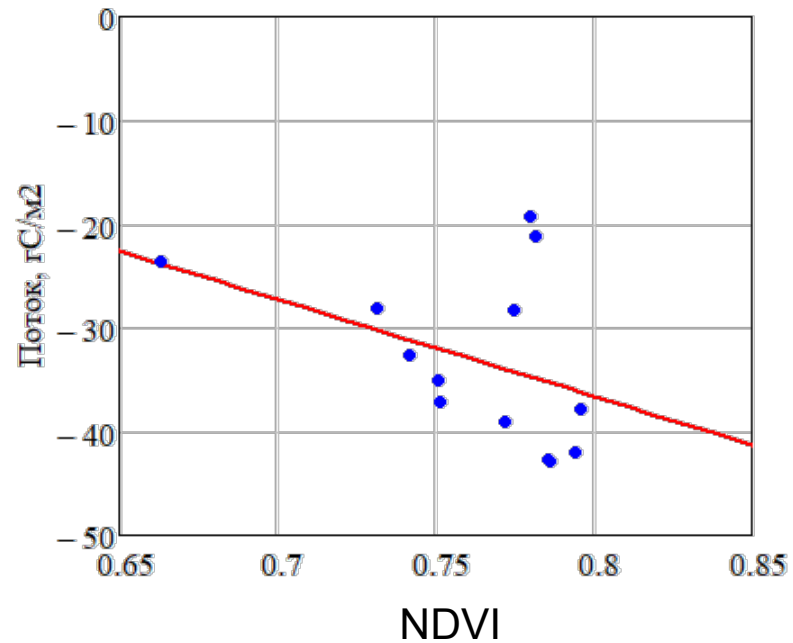
NDVI-регрессии для оценки потоков углерода (1)

Июнь



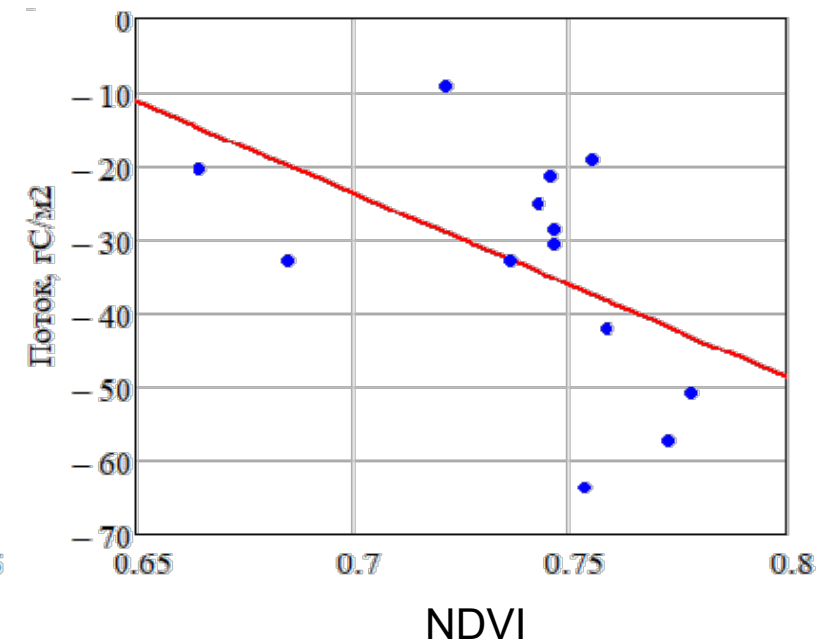
Среднее = 21.1 гC/м2

Июль



Среднее = 33.1 гC/м2

Август

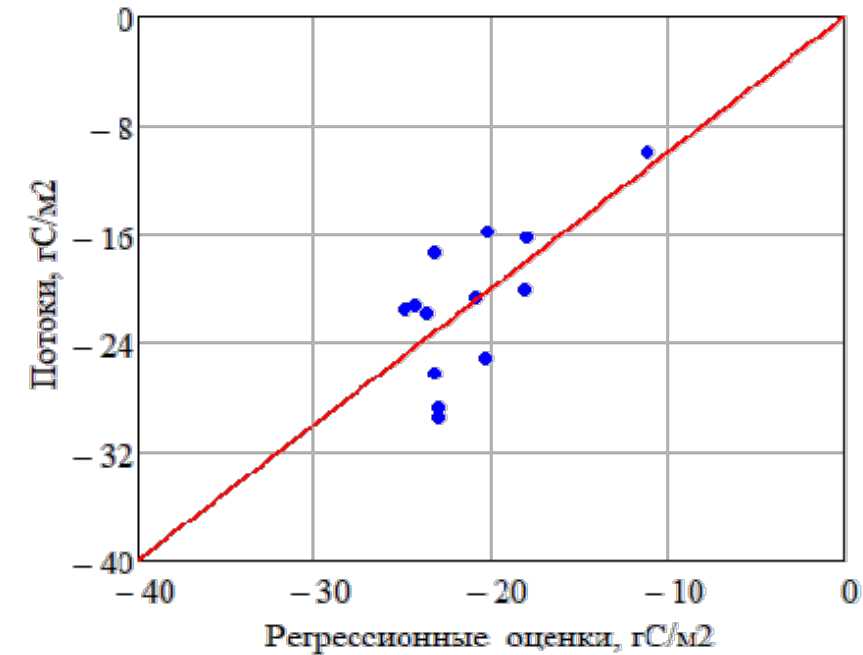


Среднее = 33.4 гC/м2

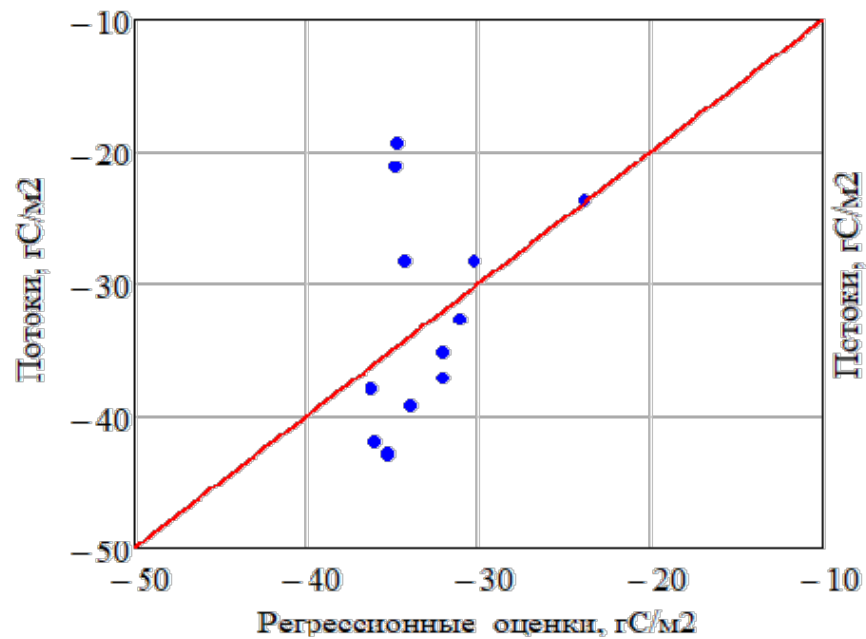
СКО = 4.2 гC/м2 или 20% от среднего СКО = 7.9 гC/м2 или 24% от среднего СКО = 14.4 гC/м2 или 43% от среднего

NDVI-регрессии для оценки потоков углерода (2)

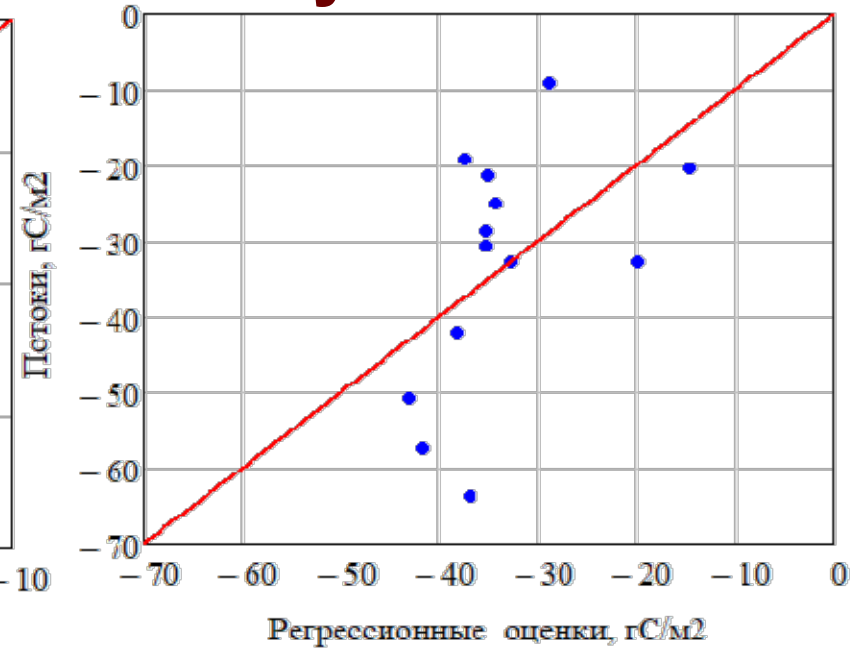
Июнь



Июль



Август



СКО = 4.2 гС/м2 или 20% от среднего, СКО = 7.9 гС/м2 или 24% от среднего, СКО = 14.4 гС/м2 или 43% от среднего

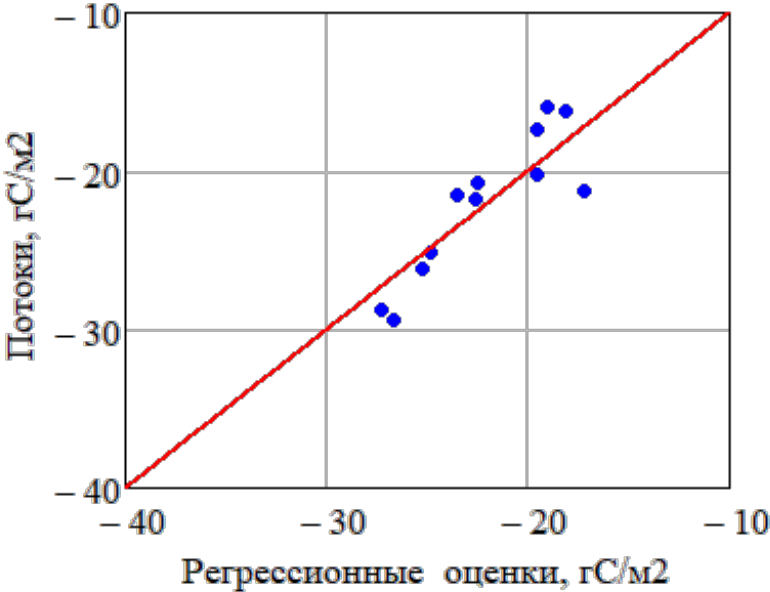
R=68%

R=41%

R=50%

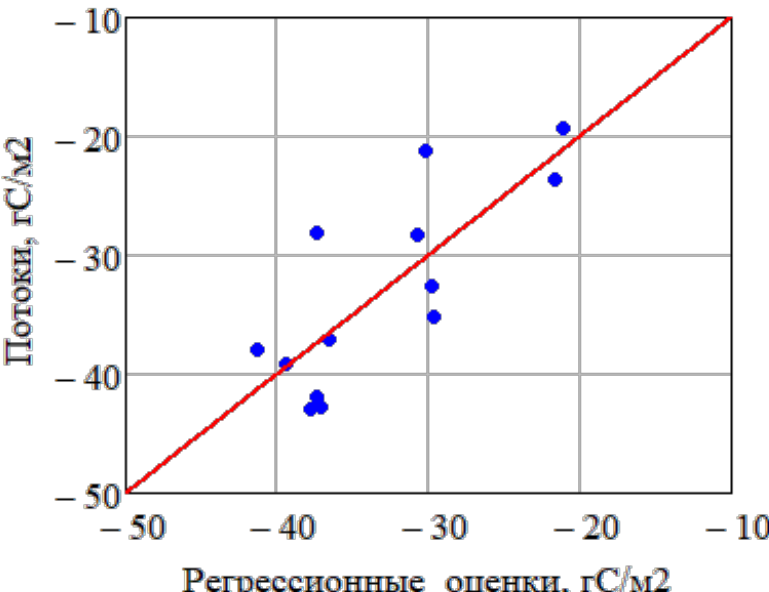
Оценка потоков углерода по NDVI и среднемесячным температурам

Июнь



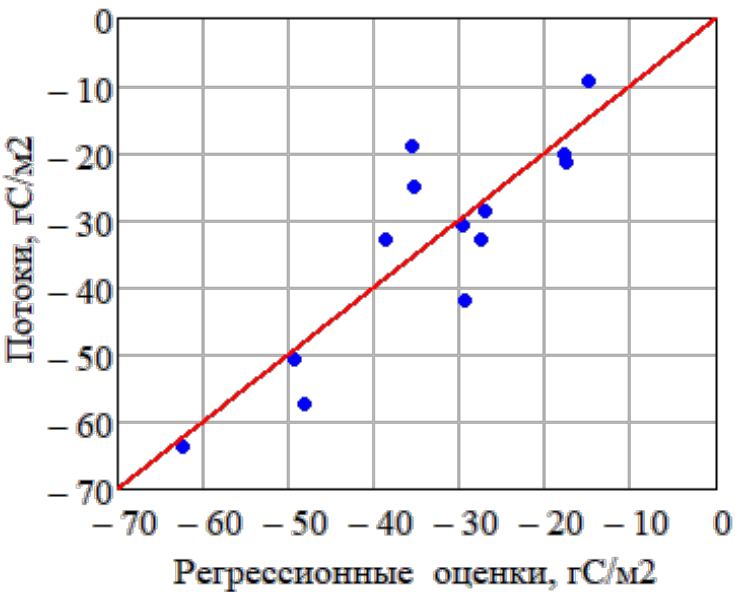
С учетом среднемесячной температуры за **апрель и июнь**
СКО= 2.5 гС или 12% от среднего,
R=92%

Июль



С учетом среднемесячной температуры за **май и июль**
СКО= 6.9 гС или 21% от среднего,
R=69%

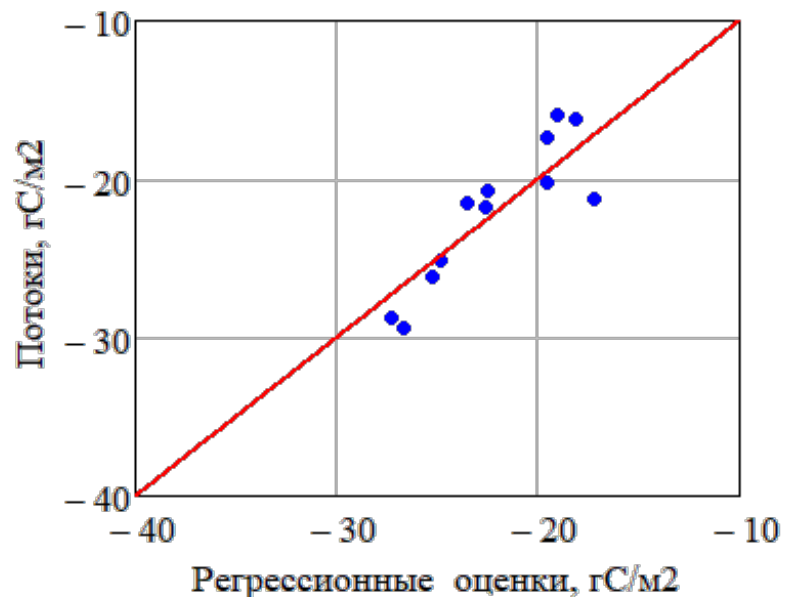
Август



С учетом среднемесячной температуры за **май и август**
СКО= 10.2 гС или 31% от среднего,
R=83%

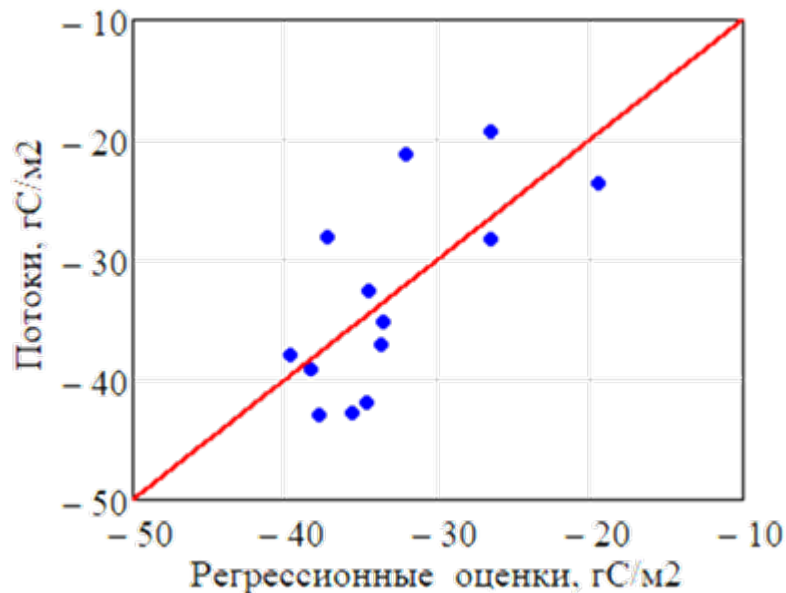
Оценка потоков углерода по NDVI, среднемесячным температурам и осадкам

Июнь



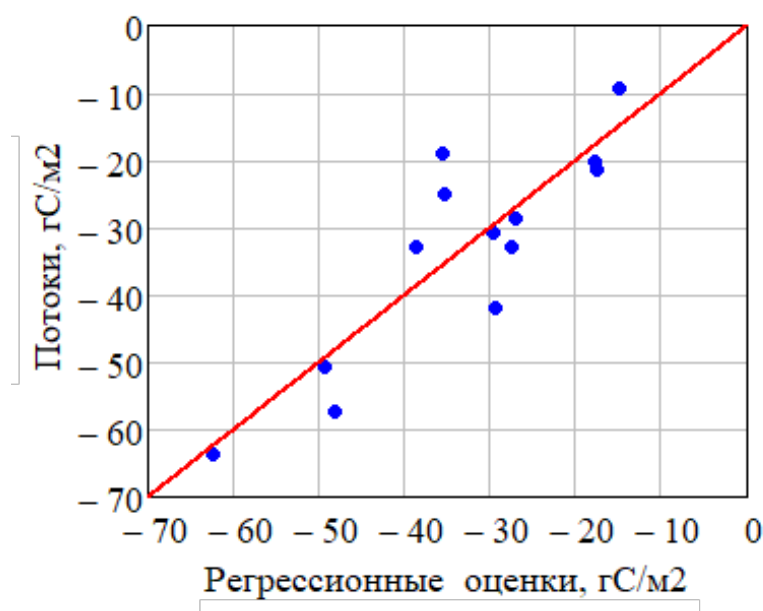
С учетом среднемесячной температуры за **июнь и апрель**, осадков за **два предыдущих месяца**
СКО= 2.2 гС или 11% от среднего,
R=95%

Июль



С учетом среднемесячной температуры за **июль и май**, осадков за **два предыдущих месяца**
СКО= 6.6 гС или 20% от среднего,
R=79%

Август



С учетом среднемесячной температуры за **август и май**, осадков за **два предыдущих месяца**
СКО= 10.3 гС или 31% от среднего,
R=87%

Сводная таблица параметров полученных регрессий

Общий вид регрессии для оценки потоков углерода $QC = d + a \cdot NDVI + b_1 \cdot T_1 + b_2 \cdot T_2 + c_1 \cdot Pr_1 + c_2 \cdot Pr_2$

Месяц	Параметры регрессии				
	d	a	Df*	СКО, гC/м ²	R, %
Июнь	24.87	-65.14	11	4.2	68
Июль	37.99	-93.24	11	7.9	41
Август	150.89	-249.38	11	14.4	50

Месяц	Параметры регрессии						
	d	a ¹⁾	b1	b2	Df	СКО, гC/м ²	R, %
Июнь	52.20	-118.98	0.582	1.999	9	2.5	92
Июль	59.91	-49.23	-2.743	-0.989	9	6.9	69
Август	200.18	-238.69	-2.439	-3.754	9	10.2	83

Месяц	Параметры регрессии								
	d	a ²⁾	b1	b2	c1	c2	Df	СКО, гC/м ²	R,%
Июнь	58.60	-129.78	0.642	2.305	-0.048	0.072	7	2.2	95
Июль	48.88	-42.17	-2.548	-0.836	-0.178	0.206	7	6.6	79
Август	216.30	-270.98	-1.627	-5.920	0.164	-0.027	7	10.3	87

¹⁾ Коэффициенты при линейных членах для NDVI, среднемесячных температур текущего месяца и мая (апреля для июня)

²⁾ Коэффициенты при линейных членах для NDVI, среднемесячных температур текущего месяца и мая (апреля для июня), осадкам за два предыдущих месяца

* Df (degrees of freedom) – число степеней свободы регрессионного уравнения



Заключение

- Разработана методика определения потоков углерода в форме диоксида карбона для Центральной Сибири по измеренным профилям концентрации CO_2 на высотной мачте ZOTTO. Валидация методики по известным опубликованным данным подтвердила ее работоспособность
- Выполнены расчеты месячных потоков углерода за летние месяцы 2009-2021 годов. Показано, что в течение этих лет Центральная Сибирь являлась постоянным стоком углерода, поглощая летом в среднем около 90 гС/м^2 в год.
- Получены оценки потоков углерода для летних месяцев с 2009 по 2021 г.г. и их регрессионные зависимости от NDVI, определяемого по данным MODIS, со среднеквадратической ошибкой 20-40%. Корреляция потоков углерода с их оценками была в диапазоне 40-70% в зависимости от месяца.
- Включение в состав предикторов среднемесячных температур за текущий месяц и май (апрель, если текущий месяц июнь), а также месячных сумм осадков за два предыдущих месяца по данным метеостанции Бор (в 100 км от Зотино) существенно повысило точность регрессий. Диапазон изменения коэффициента корреляция потоков углерода с их оценками стал 80-90%.

A photograph of a forest floor covered in a thick layer of white, fuzzy moss. Several small, green, leafy plants with clusters of bright red berries are growing out of the moss. In the background, a dense forest of tall, thin evergreen trees stands against a clear blue sky.

**Спасибо за
внимание!**