

ОЦЕНКА ПОТОКОВ СО₂ В НАСТОЯЩЕЙ СТЕПИ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А.А. Бондарович^{*1}, Д.В. Ильясов², А.А. Каверин², Д.В.Кириллов¹, Е.Ю. Мордвин¹,
А.И. Ревякин¹, А.А. Шибанова¹, Т.М. Копытина¹

¹Алтайский государственный университет, просп. Ленина, 61, 656049, Барнаул,
Российская Федерация

²Югорский государственный университет, ул. Чехова, 16, 628012, Ханты-Мансийск,
Российская Федерация

* Автор для переписки: bondarovich@geo.asu.ru

Абстракт(Abstract)

Впервые в пределах настоящей степи Кулундинской равнины (Алтайский край) измерены чистый экосистемный обмен (NEE), дыхание экосистемы (R_{eco}) камерным методом и рассчитана валовая первичная продукция (GPP). Для выявления связи потоков СО₂ с экологическими факторами также были измерены: надземная фитомасса, ФАР, температура воздуха, температура и влажность почвы. Медианные (1Q, 3Q) NEE, R_{eco} и GPP составили соответственно: -103 (-152, -66), 90 (74, 105) и -200 (-251, -151) мгСм^{-2·ч⁻¹. Ключевыми факторами изменчивости NEE и GPP стала надземная фитомасса, а R_{eco} – влагозапас почвы в слое 100 см. На основе полученных данных при помощи алгоритма Левенберга-Марквардта успешно обучена нейронная сеть ($R^2_{train} = 0.9$, $R^2_{valid} = 0.9$, $R^2_{test} = 0.8$; $MSE_{train} = 335$ $MSE_{valid} = 647$, $MSE_{test} = 360$; $N_{train} = 50$; $N_{train}, N_{train} = 11$), которая в будущем будет использована для масштабирования потоков в пространстве и во времени.}

Ключевые слова (Key Words): летние потоки, диоксид углерода, настоящая степь, ООПТ, юг Западной Сибири, Кулундинская равнина, Алтайский край.

Assesment of CO₂ fluxes in the dry grassland of southern Western Siberia

А. А. Bondarovich^{*1}, Д. В. Ильясов², А.А. Каверин², Д.В.Кириллов¹, Е. Ю. Мордвин¹, А.И. Ревякин^{1*}, А.А. Шибанова¹, Т.М. Копытина¹

¹Altai State University, pr. Lenina 61, 656049, Barnaul, Russian Federation

²Yugra State University, ul. Chekhova 16, 628012, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

* Corresponding author: bondarovich@geo.asu.ru

Abstract. For the first time, net ecosystem exchange (NEE) and ecosystem respiration (R_{eco}) were measured using the chamber method within the dry grassland (true steppe) of the Kulunda Plain, West Siberia, (Altai Krai), and gross primary production (GPP) was calculated. To iden-

tify the relationship between CO₂ fluxes and environmental factors, the following parameters were also measured: aboveground phytomass (AGP), photosynthetically active radiation (PAR), air temperature, soil temperature and soil moisture. The median (1Q, 3Q) NEE, R_{eco}, and GPP were -103 (-152, -66), 90 (74, 105), and -200 (-251, -151) mg C m⁻² h⁻¹, respectively. The key factors of variability in NEE and GPP were aboveground phytomass, while for R_{eco} – soil moisture content in the 100 cm layer. Based on the obtained data, a neural network was successfully trained using the Levenberg-Marquardt algorithm ($R^2_{\text{train}} = 0.9$, $R^2_{\text{valid}} = 0.9$, $R^2_{\text{test}} = 0.8$; $\text{MSE}_{\text{train}} = 335$, $\text{MSE}_{\text{valid}} = 647$, $\text{MSE}_{\text{test}} = 360$; $N_{\text{train}} = 50$; $N_{\text{train}} = 11$), which will be used in the future to scale carbon fluxes in space and time.

Key Words: carbon dioxide, summer fluxes, dry grassland, regional natural monument, south of Western Siberia, Kulunda Plain, Altai Krai.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск путей адаптации к изменению климата требует уточнения региональных оценок баланса CO₂ (и других парниковых агентов) (Cenci, Biffis, 2025), что отмечено как приоритетная задача на международном уровнях (IPCC, 2022). Инвентаризация и прогнозирование баланса CO₂ обычно осуществляется методами математического моделирования, что требует валидации при помощи региональных полевых данных. Кроме того, важно не только измерение потоков CO₂ в различных пространственных масштабах и типах наземных экосистем, но также поиск и анализ их сложной связи с метеорологическими и экологическими факторами (Pillai et al., 2025). В международной практике и в России исследования по измерению потоков CO₂ проводились преимущественно в лесных и болотных экосистемах (Shokoufeh и др., 2021, Глаголев, 2010, Мониторинг..., 2017, Куричева и др., 2023). Для степных биомов данные по потокам единичны (Gilmanov, 2003, Perez-Quzada, 2010, Титлянова и др., 2017, Golubyatnikov и др., 2023, Оценка..., 2023, Wen и др., 2024). Среди инструментальных измерений в степях России следует отметить оценки по чистому обмену экосистемы (англ., Net Ecosystem Exchange, далее NEE) в Республике Хакасия (Belelli..., 2007, Vuichard, 2008) и оценки дыхания экосистемы (англ., Ecosystem respirations, далее R_{eco}), на Восточно-Европейской равнине в пределах агроэкосистем (Sukhoveeva и др., 2023). Вышесказанное подтверждает, что до настоящего момента прямые инструментальные наземные измерения потоков CO₂ степных экосистем в России немногочисленны, а в Алтайском крае не проводились. При этом, степи являются важнейшим компонентом биоразнообразия и характеризуются крупнейшими запасами почвенного углерода юга России. Исторически они испытывали сильную антропогенную нагрузку, и, что весьма вероятно, именно степные экосистемы

будут подвержены глубоким преобразованиям в будущем, что обусловлено климатическими изменениями (Кулунда, 2021).

Учитывая сложности технические и финансовые в организации непрерывных инструментальных наблюдений в последнее время нарастает количество исследований по оценке выбросов углерода на основе машинного обучения (Al Nuaimi и др., 2025). В этой связи, цель данного исследования –оценка потоков CO₂ методом статических камер и апробация методов машинного обучения для масштабирования потоков CO₂ в пространстве и во времени в условиях дефицита (коротких рядов) инструментальных наблюдений. Для достижения цели в первые в настоящей степени Алтайского края были проведены сопряженные наземные инструментальные измерения потоков CO₂ и сопутствующих экологических факторов. На основе полученного короткого ряда данных при помощи алгоритма Левенберга-Марквардта обучена нейронная сеть (англ, neural network, далее NN).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Территория проведения исследований (Study Area). Измерения потоков CO₂ и сопутствующих экологических факторов были проведены с 22 по 25 июля 2024 года на четырех площадках измерений (далее, ПИ) на территории регионального памятника природы «Балочная система в Новокормихе» (ООПТ с 06.05.2014), расположенного на Кулундинской равнине в Алтайском крае (Координаты: 52.143755, 80.086703, WGS84) (Балочная система ..., 2025).

Климатические и погодные условия. По данным ближайшей метеостанции Росгидромета «Волчиха» (расположена в 30 км на юго-восток от места проведения исследований) среднегодовые температуры воздуха с 1995 по 2024 гг. варьировали от 0.5 до 4.5°C, а суммы осадков за этот же период – от 190 мм до 580 мм. В 2024 году среднегодовая температура составила 4°C, а сумма осадков – около 400 мм, что характеризует теплые и обеспеченные влагой условия в период проведения измерений. За последние 5 лет вегетационный период 2024 года оказался наиболее увлажненным, однако не самым жарким, в то время как период с июня по август характеризовался максимальными среднесуточными температурами воздуха. Непосредственно в период проведения полевых работ дождь наблюдался 22.07 (в ночной и дневной период), а также в ночь на 25.07.

Растительность и почвы. Памятник природы – это заросшая берёзовым лесом балка, глубиной до 15 м и прилегающий к ней плакор. Юго-западная экспозиция балки покрыта степной растительностью, а северо-восточная сообществом с древесным ярусом (*Betula pendula*). Днище балки – комплексы луговой и гидрофитной растительности.

Растительность исследуемого участка относится к классу формаций *настоящие степи* (Лавренко, 1991). Измерения потоков, экологических факторов и ботанические описания были проведены на плакоре, где произрастает разнотравно-тырсоковыльная настоящая степь на черноземах южных малогумусных среднемощных, по классификации FAO – Chernozem, по классификации WRB – Calcic, Chca (Балочная система..., 2025). В ходе полевых геоботанических описаний были выделены два степных сообщества, названия которым даны в соответствии с доминантными видами выделенных подъярусов. Сообщества находятся друг от друга на расстоянии 20 метров. Геоботанические описания сделаны по общепринятым методикам, обработанные по доминантно-детерминантной системе, содержащие следующие фитоценотические данные: фенологические показатели доминантных видов, флористическое разнообразие сообществ, общее проективное покрытие. Определены доминанты внутри ПИ. Латинские названия растений даны по данным «International Plant Names Index» (IPNI. URL: <https://ipni.org>). В пределах этих сообществ были заложены 4 площадки для измерений потоков CO₂ (далее ПИ).

Надземная фитомасса. В пределах ПИ были произведены укосы AGP. Расчет запаса фитомассы (далее Р) производился по формуле:

$$P = AGP_{сыр} - AGP_{сух}/S_{ни} \quad (1)$$

Где AGP_{сыр} – вес в граммах надземной сырой фитомассы, AGP_{сух} – вес в граммах высушенной надземной фитомассы, S_{ни} – площадь основания в м². Сушка производилась в сушильном шкафу при температуре 105°C до достижения абсолютно сухого состояния.

Измерения потоков CO₂ проводились статическим камерным методом при помощи прозрачных и светонепроницаемых камер (закрытыми чехлами из фольгированного пенополиэтилена, который дополнительно снижал их нагрев). Прозрачные камеры использовали для измерения потоков CO₂: NEE, а непрозрачные – для R_{eco}; GPP была рассчитана как разность между NEE и R_{eco} (при этом отрицательные значения соответствуют стоку CO₂ из атмосферы в экосистемы и наоборот). Камеры были изготовлены из прозрачного оргстекла толщиной 4 мм в форме параллелепипеда (высота – 70 см, размер стороны 34 см×34 см, объем – 0.103 м³). Для измерения концентрации диоксида углерода использовали портативный инфракрасный газоанализатор EGM-5 Portable CO₂ Gas Analyzer (PP-System, США), погрешность измерения концентрации <1%, на диапазон от 0–100000 ppm. Измерения проводили на каждой ПИ в трехкратной временной повторности утром – с 9:30 до 11:30 часов и вечером – с 16:00 до 18:00. Продолжительность экспозиции составила 3 мин. Расчет удельных потоков CO₂

осуществляли в программном пакете MatLab (MathWorks, Inc., США) с использованием формулы:

$$\text{flux} = 2 aPMb \frac{H}{(T+T_0)}, \quad (2)$$

Оценку абсолютной погрешности рассчитанного потока выполняли по формуле:

$$\Delta \text{flux} = 2 aPM \frac{1}{(T+T_0)} (\Delta bH + |b| \Delta H), \quad (3)$$

где flux – удельный поток CO₂, (мгC м⁻² ч⁻¹), $a = 0.12$ мг моль K/(кг Дж млн-1), P – общее давление газовой смеси (Па), M – молярная масса газа (0.012 кг/моль для выражения потока в мгC м⁻² ч⁻¹, b – скорость изменения концентрации газа в атмосфере камеры (млн⁻¹/ч; рассчитан как тангенс угла наклона прямой роста концентрации в камере на основе метода наименьших квадратов с весами, функция `fitlm`, MatLab), H – высота камеры (м), T – температура в камере в конце измерения (К), T_0 – температура в камере в начале измерения (К), Δb – погрешность определения параметра b (млн⁻¹/ч), ΔH – погрешность определения высоты камеры (м; принята равной 0.05 м – что обусловлено, главным образом, неточностью оценки высоты установки камеры из-за неровностей поверхности). Для сопоставления полученных инструментальных оценок GPP и NPP были использованы продукты ДЗЗ: MOD17A2HGF.061: Terra Gross Primary Productivity 8-Day Global 500m, который представляет собой 8-дневный композит с 500-метровым пространственным разрешением значений GPP: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod17a2hgf-006>

Экологические факторы. Для мониторинга в течение светового дня температуры воздуха и почвы на высоте 100 см и глубине 0, 30 см были установлены автономные датчики Thermochron iButton DS1921 (Dallas Semiconductor, США) с заданной периодичностью измерения 3ч и точностью $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Один раз за сутки с 13:00 до 16:00 часов измеряли объемную влажность почвы в % на поверхности и далее с шагом 10 см до глубины 100 см с помощью экспресс-комплекта, состоящего из регистратора данных HH-2 и датчика ML3 ThetaProbe (точность измерений $\pm 1\%$) (Delta-T Devices, Великобритания). Интенсивность суммарной солнечной радиации (CCP) измеряли в течение светового дня термоэлектрическим пиранометром Янишевского, подключенным к записывающему устройству EMS12 (Environmental Measuring Systems, Czech Republic).

Статистическая обработка данных и машинное обучение.

Для полученных данных были рассчитаны стандартные непараметрические статистики: медиана выборки по измерениям потоков CO₂ и экологических факторов,

характеристики неопределённости – первый и третий квартили. Статистические гипотезы были проверены при помощи теста Краскелла-Уоллиса на уровне значимости $p = 0.01$. Модель (на входе: экологические факторы среды; на выходе: потоки CO₂) была получена методом машинного обучения при помощи модуля Neural Network Toolbox в среде MATLAB (MathWorks, Inc., США). Использовалась стандартная двухслойная прямая NN (two-layer feed-forward network). Для обучения NN использовался алгоритм Левенберга-Марквардта, который показал свою эффективность в использовании при работе с обучающей выборкой малого размера, слабыми корреляциями между потоками CO₂ и параметрами среды (Beale et al., 2010). Входные параметры были проверены на отсутствие высокой внутренней коррелированности ($R^2 \geq 0.5$). Набор входных и целевых данных был разделен (по умолчанию) на три подвыборки: «Training» (обучающая) (70%); «Testing» (тестовая) (15%) «Validation» (валидирующая) (15%). Количество слоев нейронов (10) в скрытом было подобрано эмпирически, для достижения наибольшей эффективности обучения, которая выражалась наименьшим MSE (Beale et al., 2010).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе полевых работ были проведены геоботанические описания степных сообществ и заложенных в их пределах площадок для измерений: ПИ1 и ПИ4 - тырсоковыльно-полынная степь, а ПИ2 и ПИ3 - типчаково-тырсоковыльная степь. В результате измерений на ПИ были получены данные по NEE и Reco: CO₂, а также сопутствующих экологических факторов. На основе замеров NEE и Reco произведен расчет GPP: CO₂ (см.таблица 1.)

Таблица 1. Потоки CO₂ и экологические факторы среды по ПИ 1-4 (медиана / 1 квартиль / 3 квартиль).

Параметры	ПИ 1-4	ПИ 1	ПИ 2	ПИ 3	ПИ 4
NEE	-103 / -152 / - 66	-145 / -159 / -118	-68 / -85 / - 56	-162 / -200 / -134	-54 / -90 / - 41
R _{eco}	90 / 74 / 105	99 / 86 / 111	74 / 67 / 86	101 / 79 / 135	91 / 85 / 95
GPP	-200 / -251 / - 151	-237 / -266 / -205	-149 / -156 / -134	-284 / -310 / -241	-157 / - 181 / -137
P	218 / 140 / 323	291	129	419	144
ФАР	1206 / 1007 / 1368	1057 / 777 / 1406	1240 / 1042 / 1387	1217 / 1100 / 1265	1204 / 1051 / 1362
T _{возд}	31 / 28 / 34	31 / 27 / 34	32 / 28 / 34	32 / 29 / 34	32 / 28 / 34

T₀	29 / 27 / 37	28 / 27 / 38	29 / 27 / 37	31 / 27 / 38	31 / 27 / 37
T₃₀	22 / 22 / 22	22 / 22 / 22	22 / 22 / 22	22 / 22 / 23	22 / 22 / 23
W₀	22 / 20 / 24	21 / 20 / 21	23 / 20 / 25	22 / 20 / 25	22 / 17 / 25
W₁₀	18 / 17 / 19	18 / 17 / 21	18 / 18 / 23	19 / 18 / 19	17 / 17 / 18
W₂₀	16 / 15 / 18	15 / 13 / 18	17 / 15 / 26	15 / 13 / 20	16 / 16 / 18
W₃₀	13 / 13 / 14	13 / 13 / 14	15 / 13 / 16	13 / 13 / 18	13 / 11 / 14
W₄₀	15 / 14 / 16	15 / 13 / 16	16 / 15 / 16	15 / 14 / 16	12 / 11 / 14
W₅₀	14 / 13 / 15	14 / 13 / 15	15 / 15 / 16	13 / 13 / 14	13 / 12 / 13
W₆₀	14 / 13 / 16	14 / 12 / 16	16 / 15 / 16	15 / 14 / 16	12 / 12 / 14
W₇₀	16 / 14 / 17	16 / 13 / 18	17 / 17 / 18	15 / 15 / 18	14 / 14 / 14
W₈₀	17 / 17 / 18	18 / 13 / 19	17 / 17 / 18	18 / 15 / 19	17 / 16 / 19
W₉₀	19 / 17 / 20	17 / 15 / 20	17 / 17 / 18	22 / 19 / 22	20 / 15 / 21
W₁₀₀	22 / 20 / 24	19 / 16 / 20	24 / 23 / 24	24 / 23 / 26	20 / 19 / 22
W_{ep}	17 / 17 / 18	17 / 15 / 17	18 / 17 / 19	18 / 17 / 18	16 / 15 / 17

Примечание: размерность удельных потоков CO₂ (NEE, Reco, GPP) – мгC м⁻² ч⁻¹; запасов фитомассы (P) – г/м², температуры воздуха ($T_{возд}$) и почвы на глубине 30 см (T_{30}) – °C, влажности почвы по глубинам (W_i) – объемная влажность, %.

Для выявления значимых отличий по величине потоков CO₂ в группах между ПИ был использован тест Краскелла-Уоллиса на уровне значимости $p = 0.01$. (таблица 2.). Возникшие отличия для NEE и GPP вероятнее всего были связаны с запасом фитомассы (P). Более высокие значения NEE и GPP по ПИ 1 и 3 связаны с более высокими значениями продуктивности – 291 и 419 г/м² соответственно, а более низкие значения NEE и GPP по ПИ 2 и 4 с более низкими значениями - 129 и 144 г/м². Согласно нашим расчетам запасов влаги в метровом слое полагаем, что результат теста Reco по ПИ 4 обусловлен именно этим фактором.

Таблица 2. Тест Краскелла-Уоллиса на предмет значимых отличий по величине потоков CO₂ в группах между ПИ

ПИ	NEE	R _{eco}	GPP
1	A	A	A
2	B	B	B
3	A	A	A
4	B	AB	B

Примечание: ПИ 1 и 4 - тырсоковыльно-полынная степь, ПИ 2 и 3 - типчаково-тырсоковыльная степь

Независимая оценка GPP и NPP была получена по спутниковым данным MODIS/Terra, согласно которым для исследуемой территории на 23-28.07.2024 значения GPP колебались около $310 \text{ мгC м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, а NPP $\sim 230 \text{ мгC м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, что в целом согласуется с медианными значениями для участков 1 и 3, растительные сообщества которых являются доминирующими в исследуемом регионе. Следует отметить, что спутниковые данные $300-310 \text{ мгC м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ являются аномальными и превышают среднем многолетнее (2000-2024 гг) на 20%, что может быть связано с высокой увлажненностью в исследуемый период. Как правило максимум в GPP данным MOD17A2HGF наблюдался в период 25 июня - 05 июля, однако в 2024 году он был сдвинут на 04-12 июля в связи с обильными осадками, приводящими к увеличению влагозапасов в почве.

Далее исходя из предположения, что методы машинного обучения позволяют получить оценки потоков на основе использования только экологических факторов, а также в перспективе экстраполировать полученные зависимости на больший временной и пространственный диапазон было проведено обучение модели. Для обучения модели по взаимной корреляции были выбраны: фитомасса (P), температура воздуха на высоте 100 см ($T_{\text{возд}}$), температура почвы на глубине 30 см (T_{30}), влажность почвы на глубинах 10, 30, 60, 80, 90 см ($W_{10}, W_{30}, W_{60}, W_{80}, W_{90}$). Результаты обучения NN для предсказания потоков NEE, R_{eco} и GPP представлены на рисунке 1.

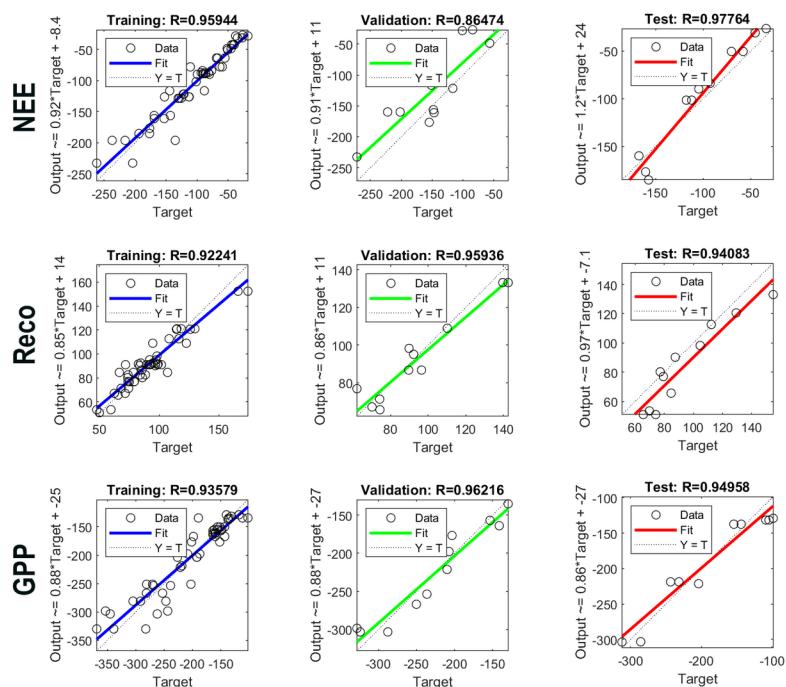


Рис. 1. Результаты обучения нейронной сети для предсказания величин потоков NEE, R_{eco} и GPP в зависимости от экологических факторов: фитомассы растений (P), $T_{\text{возд}}$, T_{30} , W_{10} , W_{30} , W_{60} , W_{80} , W_{90} . Синий – обучающая выборка, зеленый – валидирующая, красный – тестовая

Коэффициенты корреляции (R) для всех выборок оказались равны или превысили 0.9. Полученная NN может быть использована для (в первую очередь) пространственного масштабирования величин потоков CO_2 в силу того, что изменчивость входных переменных в период измерений была незначительна. Границы применимости текущей нейронной сети по входным переменным P , $T_{\text{возд}}$, T_{30} , W_{10} , W_{30} , W_{60} , W_{80} , W_{90} следующие: 129–419 $\text{г}/\text{м}^2$, 24–44°C, 21–23°C, 17–23%, 11–18%, 12–16%, 13–19%, 15–22% и соответственно за их пределами может быть получен неадекватный результат. При дальнейшем сборе полевых данных в разные временных и экологических условиях NN следует дообучить. Хорошая согласованность прямых и спутниковых данных в нашем исследовании настоящей степи, а также при оценке GPP экстразональных лесных экосистем в степи Алтайского края (Рыгалова и др., 2024) позволяет с высокой долей вероятности предполагать дальнейшую продуктивную работу по временной и пространственной экстраполяции наземных данных, а также для верификации и возможно калибровки данных ДЗЗ в регионе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена измерениям потоков CO_2 в настоящей степи Алтайского края. Технологической основой исследования послужили полевые камерные наблюдения концентрации CO_2 . Впервые для региона были получены оценки таких параметров как чистый экосистемный обмен (NEE), дыхание экосистемы (R_{eco}), валовая первичная продукция (GPP). Выявлены корреляционные связи потоков CO_2 с различными экологическими факторами, такими как: надземная фитомасса, ФАР, температура воздуха, температура и влажность почвы. Медианные (1Q, 3Q) NEE, R_{eco} и GPP составили соответственно: -103 (-152 , -66), 90 (74 , 105) и -200 (-251 , -151) $\text{мгСм}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$. Ключевыми факторами изменчивости NEE и GPP стала надземная фитомасса, а R_{eco} – влагозапас почвы в слое 100 см. На основе полученных данных при помощи алгоритма Левенберга–Марквардта обучена нейронная сеть, позволяющая выполнять реконструкцию GPP с использованием обозначенных выше климатических параметров, где $R^2_{\text{test}} = 0.8$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание на проведение научных исследований, выполняемых в АлтГУ, проект FZMW-2023-0007)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балочная система в Новокормихе // Министерство природных ресурсов и экологии Алтайского края. URL: https://minprirody-old.alregn.ru/directions/prirodnye_resursy/oopt/ooptAK/pamjatniki_prirody/pamjatniki_prirody_kraevogo_znachenija/balochnaja_sistema_v_novokormixe/ (дата обращения: 10.12.2025)

2. Кулунда: сельское хозяйство и низкоэмиссионные технологии устойчивого землепользования: коллективная монография / под науч. ред. В.И. Беляева, М.М. Сильтантьевой, А.М. Никулина, А.А. Бондаровича. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2021. 619 с. ISBN 978-5-7904-2593-6.
3. Куричева О.А., Авилов В.К., Варлагин А.В., Гитарский М.Л., Дмитриченко А.А., Дюкарев Е.А., Загирова С.В., Замолодчиков Д.Г., Зырянов В.И., Карелин Д.В., Карсанаев С.В., Курганова И.Н., Лапшина Е.Д., Максимов А.П., Максимов Т.Х., Мамкин В.В., Марунич А.С., Мигловец М.Н., Михайлов О.А., Панов А.В., Прокушкин А.С., Сиденко Н.В., Шилкин А.В., Курбатова Ю.А. Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть RuFlux. Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2023;87(4):512–535. <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052>. EDN: CTGOHO
4. Лавренко Е. М., Карамышев З. В., Никулина Р. И. Степи Евразии. Л: 1991. 146 с
5. Мониторинг потоков парниковых газов. Монография / под ред. Д.Г.Замолодчикова, Д.В.Карелина, М.Л.Гитарского, В.Г.Блинова. Саратов «Амирит». 2017. 279 с.
6. Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации/под ред. член. корр. РАН А.А.Романовской. Москва: ИГКЭ, ООО «Принт», 2023. 346 с.
7. Рыгалова Н.В., Мордвин Е.Ю., Бондарович А.А. Продуктивность и секвестрация углерода *Pinus sylvestris* L. ленточных боров в сухой степи Западной Сибири по данным дендрохронологии и спутниковых измерений MODIS // Сибирский экологический журнал. 2024. № 6 DOI: 10.15372/SEJ20240612 С. 975-987
8. Титлянова А.А., Шибарева С.В. Новые оценки запасов фитомассы и чистая первичная продукция степных экосистем Сибири и Казахстана. Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2017;(4):43-55. <https://doi.org/10.7868/S0373244417040041>
9. Al Nuaimi Hala Salem, Acquaye Adolf, Mayyas Ahmad, Machine learning applications for carbon emission estimation, Resources, Conservation & Recycling Advances, Volume 27, 2025, 200263, ISSN 2667-3789, <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200263>.
10. Beale, C.M., Lennon, J.J., Yearsley, J.M., Brewer, M.J. and Elston, D.A. (2010), Regression analysis of spatial data. Ecology Letters, 13: 246-264. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01422.x>
11. Belelli Marchesini L. Carbon balance assessment of a natural steppe of southern Siberia by multiple constraint approach / L. Belelli Marchesini, D. Papale, M. Reichstein et al. // Biogeosciences. 2007. Vol. P. 581-595.
12. Cenci, S., Biffis, E. Lack of harmonisation of greenhouse gases reporting standards and the methane emissions gap. Nat Commun 16, 1537 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56845-3>
13. Gilmanov T.G. Gross primary production and light response parameters of four Southern Plains ecosystems estimated using long-term CO₂-flux tower measurements / T.G.Gilmanov, S.B. Verma, P.L. Sims et al. // Global Biogeochemical Cycles. 2003. V. № 2. P. 1071.
14. Golubyatnikov L.L., Kurganova I.N., Lopes de Gerenu V.O. Estimation of Carbon Balance in Steppe Ecosystems of Russia // Izvestiâ Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana. - 2023. - Vol. 59. - N. 1. - P. 71-87. doi: 10.31857/S0002351523010042
15. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

16. Perez-Quezada J.F. Land Use Influences Carbon Fluxes in Northern Kazakhstan / J.F.Perez-Quezada, N.Z. Saliendra, K. Akshalov et al. // Rangeland Ecol. Manag. 2010. V.63. P.82-93.
17. Pillai, N. D., Wille, C., Nieberding, F., Helbig, M., and Sachs, T.: Assessing Carbon Flux Variability in an Alpine Stepp e: Insights from Dual-Height Measurements, EGUSphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-530>, 2025.
18. Shokoufeh Salimi, A.A.A.N Suhad., Miklas Scholz Almuktar, Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands, Journal of Environmental Management, Volume 286, 2021, 112160, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112160>.
19. Sukhoveeva O., Karelina D., Lebedeva T., Pochikalov A., Ryzhkov O., Suvorov G., Zolotukhin A., (2023) Greenhouse gases fluxes and carbon cycle in agroecosystems under humid continental climate conditions, Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 352, 2023, 108502, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108502>.
20. Vuichard N. Carbon sequestration due to the abandonment of agriculture in the former USSR since 1990 / N.Vuichard, P.Ciais, L. Belelli et al. // Glob. Biochem. Cycles. 2008. Vol. 22.

REFERENCES

1. Balochnaja sistema v Novokormihe // Ministerstvo prirodnih resursov i jekologii Altajskogo kraja. URL: https://minprirody-old.alregn.ru/directions/prirodnye_resursy/oop/oopAK/pamjatniki_prirody/pamjatniki_prirody_kraevogo_znachenija/balochnaja_sistema_v_novokormixe/ (data obrashhenija: 10.12.2025)
2. Kulunda: sel'skoe hozjajstvo i nizkojemissionnye tehnologii ustojchivogo zemlepol'zovanija: kollektivnaja monografija / pod nauch. red. V.I. Beljaeva, M.M. Silant'evoj, A.M. Nikulina, A.A. Bondarovicha. Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 2021. 619 s. ISBN 978-5-7904-2593-6.
3. Kuricheva O.A., Avilov V.K., Varlagin A.V., Gitarskij M.L., Dmitrichenko A.A., Djukarev E.A., Zagirova S.V., Zamolodchikov D.G., Zyrjanov V.I., Karelina D.V., Karsanaev S.V., Kurganova I.N., Lapshina E.D., Maksimov A.P., Maksimov T.H., Mamkin V.V., Marunich A.S., Miglovec M.N., Mihajlov O.A., Panov A.V., Pro-kushkin A.S., Sidenko N.V., Shilkin A.V., Kurbatova Ju.A. Monitoring jekosi-stemnyh potokov parnikovyh gazov na territorii Rossii: set' RuFlux. Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija geograficheskaja. 2023;87(4):512–535. <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052>. EDN: CTGOHO
4. Lavrenko E. M., Karamysheva Z. V., Nikulina R. I. Stepi Evrazii. L: 1991. 146 s
5. Monitoring potokov parnikovyh gazov. Monografija / pod red. D.G.Zamolodchikova, D.V.Karelina, M.L.Gitarskogo, V.G.Blinova. Saratov «Amirit». 2017. 279 s.
6. Ocenka potokov parnikovyh gazov v jekosistemah regionov Rossijskoj Federacii/pod red. chlen. korr. RAN A.A.Romanovskoj. Moskva: IGKJe, OOO «Print», 2023. 346 s.
7. Rygalova N.V., Mordvin E.Ju., Bondarovich A.A. Produktivnost' i sekvestracija ugleroda Pinus sylvestris L. lentochnyh borov v suhoj stepi Zapadnoj Sibiri po dannym dendrochronologii i sputnikovyh izmerenij MODIS // Sibirskij jekologicheskij zhurnal.2024. № 6 DOI: 10.15372/SEJ20240612 S. 975-987
8. Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Novye ocenki zapasov fitomassy i chistaja pervichnaja produkcija stepnyh jekosistem Sibiri i Kazahstana. Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija geograficheskaja. 2017;(4):43-55. <https://doi.org/10.7868/S0373244417040041>

9. Al Nuaimi Hala Salem, Acquaye Adolf, Mayyas Ahmad, Machine learning applications for carbon emission estimation, *Resources, Conservation & Recycling Advances*, Volume 27, 2025, 200263, ISSN 2667-3789, <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200263>.
10. Beale, C.M., Lennon, J.J., Yearsley, J.M., Brewer, M.J. and Elston, D.A. (2010), Regression analysis of spatial data. *Ecology Letters*, 13: 246-264. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01422.x>
11. Belelli Marchesini L. Carbon balance assessment of a natural steppe of southern Siberia by multiple constraint approach / L. Belelli Marchesini, D. Papale, M. Reichstein et al. // *Biogeosciences*. 2007. Vol. P. 581-595.
12. Cenci, S., Biffis, E. Lack of harmonisation of greenhouse gases reporting standards and the methane emissions gap. *Nat Commun* 16, 1537 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56845-3>
13. Gilmanov T.G. Gross primary production and light response parameters of four Southern Plains ecosystems estimated using long-term CO₂-flux tower measurements / T.G.Gilmanov, S.B. Verma, P.L. Sims et al. // *Global Biogeochemical Cycles*. 2003. V. № 2. P. 1071.
14. Golubyatnikov L.L., Kurganova I.N., Lopes de Gerenuy V.O. Estimation of Carbon Balance in Steppe Ecosystems of Russia // *Izvestiâ Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana*. - 2023. - Vol. 59. - N. 1. - P. 71-87. doi: 10.31857/S0002351523010042
15. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
16. Perez-Quezada J.F. Land Use Influences Carbon Fluxes in Northern Kazakhstan / J.F.Perez-Quezada, N.Z. Saliendra, K. Akshalov et al. // *Rangeland Ecol. Manag.* 2010. V.63. P.82-93.
17. Pillai, N. D., Wille, C., Nieberding, F., Helbig, M., and Sachs, T.: Assessing Carbon Flux Variability in an Alpine Stepp e: Insights from Dual-Height Measurements, EGUsphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-530>, 2025.
18. Shokoufeh Salimi, A.A.A.N Suhad., Miklas Scholz Almuktar, Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands, *Journal of Environmental Management*, Volume 286, 2021, 112160, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112160>.
19. Sukhoveeva O., Karelina D., Lebedeva T., Pochikalov A., Ryzhkov O., Suvorov G., Zolotukhin A., (2023) Greenhouse gases fluxes and carbon cycle in agroecosystems under humid continental climate conditions, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 352, 2023, 108502, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108502>.
20. Vuichard N. Carbon sequestration due to the abandonment of agriculture in the former USSR since 1990 / N.Vuichard, P.Ciais, L. Belelli et al. // *Glob. Biochem. Cycles*. 2008. Vol. 22.