ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2026, том 10, № 3, с. 5-24

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 551.583; 574.23

ВЛИЯНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС СТЕПНЫХ ЭКОСИСТЕМ С РАЗЛИЧНЫМ РЕЖИМОМ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

© 2026 г. П.С. Широких*, **, С.Н. Жигунова*, **, В.Д. Гимазетдинов*, **, И.Г. Бикбаев*, **, И.Р. Туктамышев*, **, В.Б. Мартыненко, Э.З. Баишева**, Д.Т. Габбасова*, **, Д.М. Гулов*, ****

**Уфимский государственный нефтяной технический университет*
Россия, 450078, г. Уфа, ул. Чернышевского, д. 145. E-mail: shirpa@mail.ru

***Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН*
Россия, 450054, г. Уфа, просп. Октября, д. 69. E-mail: vazir.gimazetdinov@mail.ru

Поступила в редакцию 26.03.2026. После доработки 05.06.2026. Принята к публикации 01.09.2026.

В работе представлены первые результаты прямых камерных измерений потоков CO_2 (NEE и Reco), выполненных на участке Евразийского карбонового полигона «Зауральская степь» (Республика Башкортостан) в течение гидротермически нетипичного вегетационного сезона 2025 года. Целью исследования было оценить сезонный углеродный баланс 4 типов сообществ степной зоны: естественной степи, залежи, пастбища с разнотравьем и полынкового пастбища в условиях смещения максимума осадков на весну и повышенного летнего водного стресса. Установлено, что все изученные экосистемы функционировали как чистые источники CO_2. Кумулятивная эмиссия углерода за период с апреля по сентябрь составила в естественной степи 284.4 гС·м$^{-2}$, на пастбище с разнотравьем – 60.1 гС·м$^{-2}$, на полынковом пастбище – 66.0 гС·м$^{-2}$, на залежи – 85.0 гС·м$^{-2}$. Максимальные значения дневного стока (NEE) отмечены в июне на пастбище разнотравного типа (-187 мгС·м$^{-2}$·ч$^{-1}$) и на залежи (-171.6 мгС·м$^{-2}$·ч$^{-1}$), однако высокая интенсивность экосистемного дыхания (Reco – до 387.3 мгС·м$^{-2}$·ч$^{-1}$ на залежи) нивелировала стоковый потенциал. Установлено, что основным фактором в формировании сезонного эмиссионного баланса сыграли раннее снеготаяние (29 марта), смещение пика NDVI на конец мая и последующий водный стресс (92 дня с VPD > 1,5 кПа), что привело к угнетению фотосинтеза при сохраняющемся высоком уровне дыхания. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в гидротермических условиях 2025 г. смещение фенологического окна активной вегетации и усиление дыхания привели к переходу степных экосистем Зауралья в устойчивый режим источника CO_2, независимо от типа землепользования.

Ключевые слова: степные экосистемы, пастбища, углеродный баланс, поток CO_2, чистый экосистемный обмен, NEE, экосистемное дыхание, Reco, дефицит давления водяного пара, VPD, постагрогенные залежи, Южно-Уральский регион.
DOI: 10.24412/2542-2006-2026-3-5-24
EDN: OSEBJH

Степные экосистемы занимают значительные площади в континентальных районах Евразии и играют важную роль в региональном и глобальном углеродном балансе, одновременно сочетая высокую межгодовую вариабельность продуктивности и чувствительность к изменениям климата и режиму землепользования (Мордкович, 2014; Чибилев, 2016). В семиаридных степях баланс между поглощением CO_2 растительностью и его эмиссией через почвенное и экосистемное дыхание определяется сложным взаимодействием температурного режима, распределения осадков, влагообеспеченности почв и структуры растительного покрова. При этом межгодовые колебания гидротермических условий способны радикально менять знак чистого экосистемного обмена

углерода (англ. «net ecosystem exchange» или NEE). Численные оценки показывают, что в полузасушливых экосистемах именно вариации валовой первичной продукции и связанных с ней потоков экосистемного дыхания, контролируемые водным стрессом и дефицитом давления водяного пара (VPD), объясняют большую часть изменчивости NEE по сезонам и годам (Wang et al., 2020).

Ключевым регулятором баланса парниковых газов в семиаридных степных ценозах выступает уровень увлажнённости почвы и распределение осадков во времени. Повышение количества осадков, как правило, приводит к усилению почвенного и экосистемного дыхания, тогда как эпизоды краткосрочного переувлажнения одновременно увеличивают депонирующую способность экосистем за счёт роста биомассы растительности и повышения валовой первичной продукции (Hao et al., 2017; Li et al., 2021). В условиях как кратковременной, так и продолжительной засухи изменяется структура и интенсивность гетеротрофного дыхания почв, причём его максимум приходится на отдельные пики активности, в которые сосредоточены наибольшие значения эмиссии CO_2 (Карелин и др., 2015). На сезонную динамику потоков экосистемного дыхания дополнительно влияет зимний режим промерзания и оттаивания почв: глубина и продолжительность промерзания определяют скорость микробного разложения опада и величину весенних выбросов CO_2 при оттаивании (Хорошаев и др., 2023).

В условиях постсоветского изменения землепользования существенные площади степей в России и Казахстане были выведены из сельскохозяйственного оборота и перешли в состояние залежей, а значительная часть осталась под пастбищным использованием, что существенно изменило запасы углерода в почвах и биомассе, а также характер обмена CO_2 с атмосферой (Kurganova et al., 2015; Perez-Quezada et al., 2010; Lu et al., 2025). Показано, что постагрогенные экосистемы способны длительно аккумулировать углерод, тогда как интенсивный выпас и деградация растительного покрова приводят к снижению запасов органического вещества и изменению баланса парниковых газов (Lu et al., 2025; Wang et al., 2021). Однако для степей Южно-Уральского региона, включая Башкирское Зауралье, количественные оценки сезонного и годового баланса CO_2 при различных видах землепользования (естественные степи, залежи, пастбища) остаются ограниченными и фрагментарными, особенно в свете усиливающихся климатических аномалий (Куричева и др., 2023; Баишева и др., 2023).

Цель исследования – количественно оценить сезонный углеродный баланс репрезентативных степных экосистем Башкирского Зауралья при различных видах землепользования в условиях гидротермически нетипичного года и выявить роль температуры, влагообеспеченности, радиации, VPD и фенологии растительного покрова в формировании баланса CO_2.

Данное исследование следует рассматривать как первое приближение, основанное на ограниченном наборе камерных измерений и укрупнённом учёте климатических драйверов и продолжительности светового дня. По мере накопления многолетнего ряда наблюдений потоков CO_2, уточнения параметров фотосинтетической активности (включая распределение фотосинтетически активных часов по сезонам) и получения детальных данных о запасах органического вещества планируется перейти к более точным расчётам полного углеродного баланса и масштабирование потоков до годовых величин.

Материалы и методы

Объектом исследования являются пробные площади, заложенные в естественной лессингоковыльной степи, на залежи с восстанавливающейся степной растительностью на месте заброшенной пашни, на пастбище с доминированием разнотравья и на полынковом пастбище.

Участок 1 – «Естественная степь» характеризуется преобладанием дерновинных злаков (*Stipa lessingiana*[1]*, Stipa capillata, Festuca valesiaca*) с участием полыней (*Artemisia austriaca, Artemisia lerchiana*), а также видов лугово-степного (*Galium verum, Oxytropis spicata, Thalictrum minus, Phlomoides tuberosa, Medicago romanica*) и сухо-степного разнотравья (*Jurinea multiflora, Galatella villosa, Allium flavescens, Ferula tatarica, Nepeta ucranica*). Среднее проективное покрытие травяного яруса составляет 80%, высота – 40 см.

Участок 2 – «Пастбище полынковое» отличается высоким обилием полыней (*A. austriaca, A. lerchiana*), а также однолетних видов пастбищного низкотравья (*Polygonum aviculare, Eremopyrum orientale, Androsace maxima, Ceratocarpus arenarius*). Проективное покрытие травяного яруса варьирует от 30 до 50%, высота – от 20 до 40 см. Сообщества являются типичными и широко распространенными в пределах степной зоны Республики Башкортостан, Челябинской и Оренбургской областей.

Участок 3 – «Пастбище разнотравное» характеризуется доминированием хорошо выдерживающих выпас злаков (*Stipa lessingiana, S. capillata, Festuca valesiaca*), но в отличие от участка естественной степи в этом сообществе практически отсутствуют виды разнотравья. Проективное покрытие варьирует от 50 до 80%. Средняя высота травостоя составляет от 20 до 30 см, максимальная – 50 см.

Участок 4 – сообщества участка «Залежь» близки по составу к фитоценозам естественной степи. Доминирует *S. lessingiana*, содоминирует *Achillea nobilis, Oxytropis pilosa*. Эти сообщества отличаются присутствием группы видов, индицирующих наличие нарушений в недавнем прошлом: *Convolvulus arvensis, Lactuca tatarica, Euphorbia virgata, Carduus acanthoides, Cichorium inthybus.* Среднее проективное покрытие травостоя составляет 90%, высота – от 30 до 45 см.

Пробные площади расположены в 2.8 км юго-западнее с. Степной в Хайбуллинском районе Республики Башкортостан (рис. 1). Лессингоковыльная степь и пастбище разнотравное расположены на ровном участке на высоте 360-384 м н.у.м. БС. Пастбище полынковое и залежь находятся на пологом склоне с уклоном 10° на высоте 364-380 м. Согласно геоморфологическому районированию, район исследования относится к Зауральским пенепленам с деллювиальными почвообразующими породами, с преобладанием черноземов обыкновенных (Хазиев и др., 1995).

Климатические показатели за вегетационные периоды определялись на основе данных ERA5 космической программы Copernicus (Climate Data Store, 2026). Почасовые климатические данные ERA5 были рассчитаны методом скользящего среднего с использованием пакета анализа данных MS Excel. Для расчета потоков парниковых газов были использованы данные климатической станции САМ-У (г. Томск).

Расчет суммарных дневных (NEE) и ночных (Reco) потоков за каждый месяц (с 1 апреля по 30 сентября) проводился с учетом светового и тёмного режимов вегетационного периода, а также облачности по данным реанализа ERA5-Land по переменной «surface solar radiation downwards» (SSRD). Значения SSRD в ERA5 представляют собой почасовую накопленную энергию солнечной радиации в Дж·м$^{-2}$ за предшествующий час, поэтому для перевода в мощность в Вт·м$^{-2}$ они были разделены на 3600 с. Час считался «дневным», если рассчитанная мощность поверхностной коротковолновой радиации была ≥ 20 Вт·м$^{-2}$, и «ночным» при радиации < 20 Вт·м$^{-2}$; далее количество дневных и ночных часов суммировалось для каждого месяца с апреля по сентябрь (табл. 1). Выбор порога 20 Вт·м$^{-2}$ основан на том, что световая компенсационная точка для травянистых C_3-растений и злаков обычно лежит в диапазоне ~20-40 мкмоль фотонов м$^{-2}$·с$^{-1}$ PAR (Valladares, Niinemets, 2012), что соответствует нескольким десяткам Вт·м$^{-2}$ коротковолновой радиации при условии, что

[1] Латинские названия растений приводятся по работе С.К.Черепанова (1995).

около половины солнечной энергии приходится на фотосинтетически активную радиацию (PAR). Таким образом, при освещённости < 20 Вт·м$^{-2}$ скорость фотосинтеза практически не компенсирует дыхание и чистый экосистемный обмен по CO_2 близок к 0 или остаётся положительным, поэтому такие часы были отнесены к «ночному» режиму фотосинтеза.



Рис. 1. Расположение пробных площадей на участке Евразийского карбонового полигона «Зауральская степь» (Хайбуллинский район Республики Башкортостан; Google.Maps, 2026). *Условные обозначения:* 1 – естественная степь, 2 – пастбище полынковое, 3 – пастбище разнотравное, 4 – зарастающая степной растительностью залежь на бывшей пашне.
Fig. 1. Sample plots on the Eurasian carbon polygon “Zauralskaya Steppe” in the Haibullinskiy District of the Republic of Bashkortostan (Google.Maps, 2026). *Legend:* 1 – native steppe, 2 – *Artemisia* pasture, 3 – motley grass pasture, 4 – fallow overgrowth by steppe vegetation on an abandoned crop land.

Таблица 1. Число дневных и ночных часов, рассчитанных по данным ERA5-Land.
Table 1. Amount daylight and nighttime hours according to the ERA5-Land data.

Месяц	Дневных часов	Ночных часов
Апрель	391	328
Май	443	300
Июнь	450	270
Июль	461	283
Август	424	319
Сентябрь	355	363

С апреля по сентябрь 2025 года было выполнено и обработано 552 измерения потоков диоксида углерода, равномерно распределённых по исследуемым типам экосистем и

времени суток. Измерения проводились при помощи статического камерного метода с использованием портативного газоанализатора Li-Cor 7810 (Los Gatos Research, США, точность измерения концентрации CO_2 – 1.5 ppm). Частота измерения концентраций – 1 раз в секунду, продолжительность экспозиции – от 2 до 4 мин. в зависимости от величины потока. Для выполнения расчетов использовали программный пакет MATLAB R2023a.

Измерительная система состояла из герметичной камеры, соединённой с газоанализатором в замкнутый контур. Процедура измерения включала установку камеры на грунтовый воротник с последующей регистрацией изменения концентрации CO_2 в течение 120-240 секунд. Параллельно с газообменом фиксировались синхронные метеорологические (солнечная радиация, температура и влажность воздуха) и почвенные (температура и влажность почвы на глубине 5-10 см) параметры с помощью датчиков, установленных в непосредственной близости от камеры. Были использованы прозрачные и светонепроницаемые камеры, закрытые чехлами из фольгированного пенополиэтилена, который дополнительно снижал их нагрев. Прозрачные камеры (рис. 2) использовались для измерения чистого обмена диоксида углерода между экосистемой и атмосферой, непрозрачные камеры – для измерения дыхания экосистемы (Reco) или валового дыхания (англ. «ecosystem respiration»). Камеры устанавливали на квадратные металлические основания площадью 0.16 $м^2$ с глубиной врезки в почву 10 см. В желоб основания, функционирующий как гидрозатвор, наливали отстоянную колодезную воду.



Рис. 2. Измерение удельных потоков парниковых газов дневной фазы.
Fig 2. Day time measurement of the specific fluxes of the greenhouse gases.

Для количественной оценки начала вегетационного периода были использованы два независимых критерия: спутниковый индекс NDVI (MODIS) и температурный порог по данным ERA5. В качестве фенологического индикатора старта вегетации мы приняли дату, когда сглаженная по времени кривая NDVI устойчиво превышала значение 0.2, что соответствует переходу от состояния оголённой почвы и редкой растительности к фазе

активного наращивания зелёной биомассы; аналогичный порог широко применяется в фенологических исследованиях как индикатор начала сезона роста для травянистых экосистем (USGS, 2018; Khalil et al., 2024). Температурный старт сезона определялся как первая дата, с которой среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м в течение не менее 7 последовательных дней оставалась выше +5°C, что близко к общепринятому порогу эффективных температур для начала активной вегетационной активности в умеренных широтах (Körner et al., 2023).

Результаты и обсуждение

Потоки парниковых газов тесно связаны с климатическими и почвенно-гидрологическими условиями вегетационного сезона, поскольку именно они задают условия для обмена CO_2 между экосистемой и атмосферой.

Для интерпретации потоков CO_2, измеренных в 2025 году, в качестве климатического референса использовались данные 2024 года. Данный подход обусловлен задачами исследования: нам было важно подчеркнуть различие в гидротермических условиях двух смежных лет для выявления чувствительности степных экосистем к водному стрессу. Кроме того, использование среднемноголетних «норм» на начальном этапе мониторинга (до накопления длительных рядов наблюдений) нивелировало бы экстремальные сигналы 2025 года и затруднило бы интерпретацию физиологического ответа растительности. Выбор пары последовательных лет соответствует общепринятой практике потоковых исследований (FLUXNET) на стадии запуска мониторинговых программ.

Климатические условия и фенология вегетационного периода. Анализ метеоданных ERA5 показал, что на участке полигона «Зауральская степь» в 2025 году были отмечены более теплые весна и осень, что нехарактерно для данного района (рис. 3), а также более высокие температуры в течение лета. Среднегодовая температура воздуха в районе исследования составила около +7.6°C, что существенно превышает среднемноголетние значения для Республики Башкортостан (+2…+3°C; Гидрометцентр России, 2020), что также указывает на аномально тёплый характер вегетационного сезона по региональным меркам. Данные по среднемесячным осадкам в 2025 году показали смещение их максимума на начало вегетационного периода (апрель-июнь), что, в свою очередь, также могло способствовать раннему началу вегетации в районе исследования, тогда как в 2024 году основные осадки выпадали в июне-августе, обеспечивая более длительное увлажнение почв в середине вегетационного сезона (рис. 3), что более типично для умеренно-континентального и степного климата Южного Зауралья. Суммарно в 2025 году с апреля по октябрь выпало 271 мм осадков, а за этот же период в 2024 г. – 484 мм.

Суточные суммы коротковолновой радиации показывают типичный годовой ход с максимумом в июне-июле и минимумом в зимние месяцы (рис. 4). По сравнению с 2024 годом 2025 год отличался более низкой радиацией в весенний период (с середины апреля до середины мая) и более высокой радиацией в летний период. Период с марта по апрель 2025 года был менее солнечным, чем в 2024 г. (до −50 Вт·м$^{-2}$). Максимум солнечной радиации отмечен в июне (~280-310 Вт·м$^{-2}$). В целом, вегетационный сезон 2025 года характеризовался как более солнечный (до +100 Вт·м$^{-2}$). Растительность испытывала более высокий световой и энергетический пресс именно в середине вегетационного сезона 2025 г.

Анализ динамики NDVI по данным MODIS показал существенные различия в фенологии растительного покрова между двумя годами исследования (рис. 5). В 2024 году начало вегетации по NDVI и по температурному критерию (устойчивое превышение +5°C в течение 5 суток) было практически синхронным (6 и 9 апреля соответственно), а максимум NDVI

приходился на август, что указывает на длительный период активной вегетации.

В 2025 году начало вегетации по NDVI было зафиксировано 22 марта, т.е. почти на 3 недели раньше, чем устойчивый прогрев воздуха выше +5°C (13 апреля) и примерно на 2 недели раньше, чем в 2024 г. Пик NDVI (0.59) был отмечен во второй декаде мая, после чего в июле-августе наблюдался выраженный спад «зелёности» растительного покрова с признаками небольшого вторичного осеннего повышения. Это говорит о том, что растения в 2025 году отреагировали на ранние весенние сигналы (освещённость, возможно температура почвы или кратковременные потепления) ещё до того, как среднесуточная температура воздуха устойчиво превысила биоклиматический порог. В 2024 году оба индикатора практически совпали (±3 дня), что типично для нормального весеннего хода.

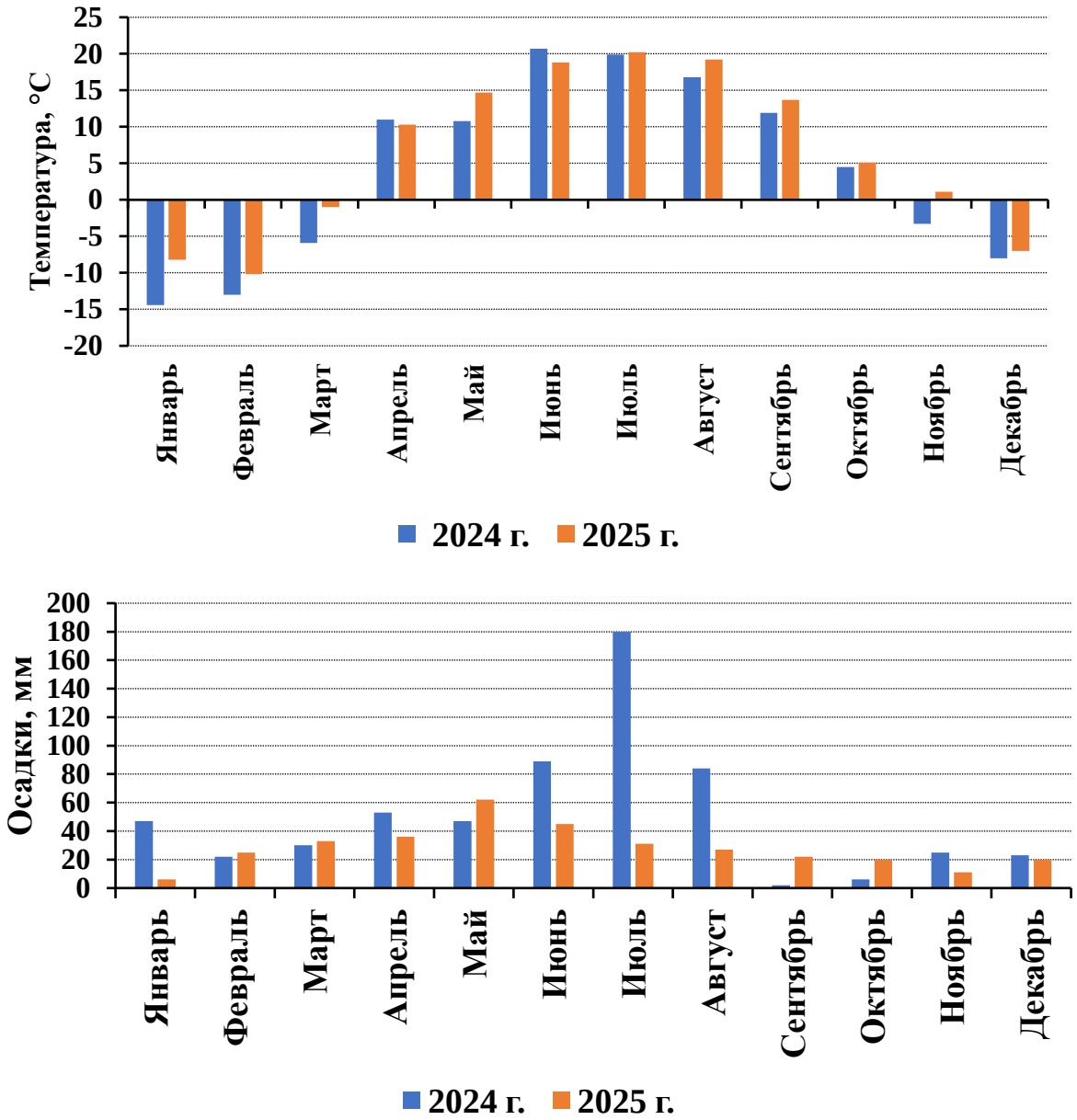

Рис. 3. Среднемесячная температура воздуха и сумма осадков в 2024-2025 годы в районе исследования (Climate Data Store, 2026). **Fig. 3.** Average monthly air temperature and total precipitation in 2024-2025 on the sample plots (Climate Data Store, 2026).

В 2024 году первый пик NDVI (0.62) был также отмечен в конце мая, затем значения этого показателя оставались довольно высокими (около 0.6) почти до конца августа, что связано с высокой влагообеспеченностью этого периода. В 2024 году количество осадков с июня по август было значительно выше, чем за аналогичный период 2025 г. (рис. 3). Небольшое «проседание» значений NDVI в июне и июле также могло быть связано с большим количеством осадков, так как влажная поверхность листьев растений может влиять на спектральный сигнал растительности и снижать показали NDVI даже после кратковременных осадков, что вызывает расхождения между истинной и наблюдаемой «зеленостью» растительности (Gao et al., 2025).

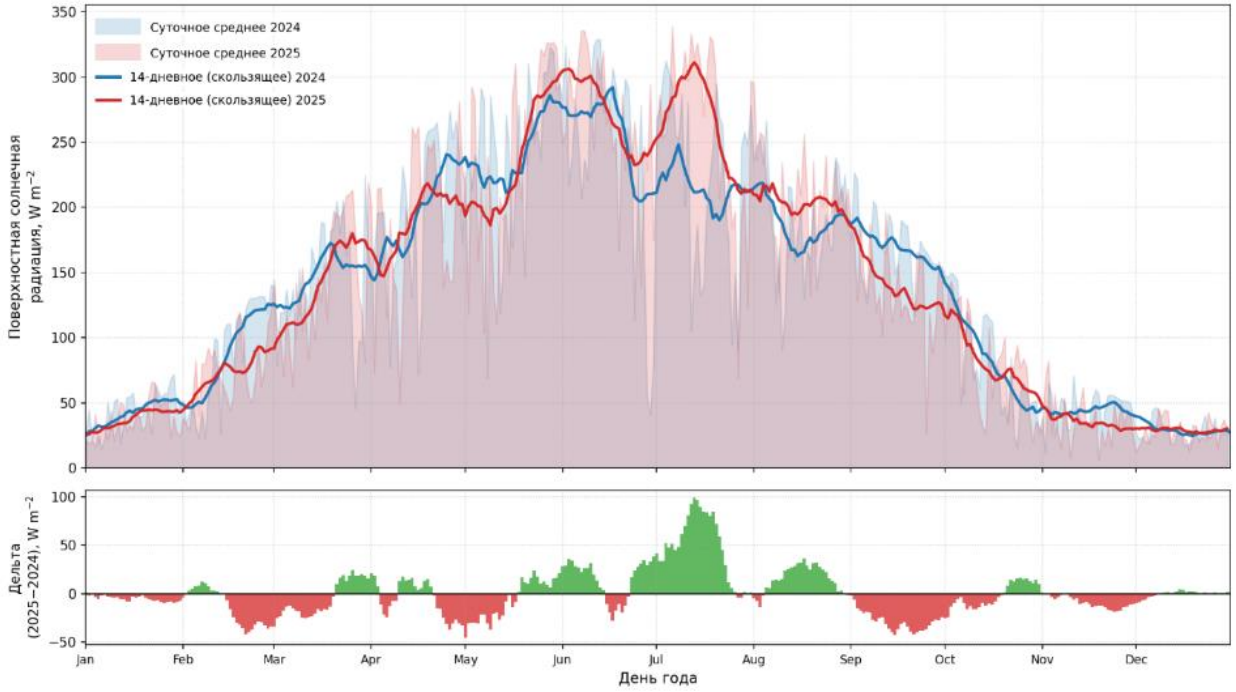

Рис. 4. Суточная сумма коротковолновой радиации в районе исследований за 2024-2025 гг. (Climate Data Store, 2026). *Условные обозначения:* верх – годовой ход по дням года (среднесуточные значения и 14-дневное скользящее среднее), низ – разность между 2025 и 2024 гг., зелёные столбцы – более солнечные периоды в 2025 г., красные – более солнечные периоды в 2024 г. **Fig. 4.** Daily sum of shortwave radiation in the research area in 2024-2025 (Climate Data Store, 2026). *Legend:* top panel – the annual progress by day of the year (daily averages and a 14-day moving average), bottom panel – the difference between 2025 and 2024, green columns – the sunnier periods of 2025, red columns – the sunnier periods of 2024.

Выявленное несоответствие между началом вегетации по NDVI и прогревом воздуха находит своё объяснение при анализе динамики снежного покрова (рис. 6). Расчёт водного эквивалента снега (SWE) показал, что в зимний сезон 2023/2024 годов запасы воды в снеге были выше, а полное таяние снежного покрова происходило позже (9 апреля 2024 г.), тогда как зимой 2024/2025 годов суммарный SWE был меньше, а дата полного таяния сместилась на 29 марта 2025 г. Это означает более раннее освобождение почвы от снега и потенциально более раннее включение почвенных и растительных процессов весной 2025 г.

По данным ERA5, суточное VPD демонстрировало резкое усиление водного стресса в 2025 году (рис. 7). Суммарно с апреля по сентябрь 2025 год были зарегистрированы 92 дня со значениями VPD выше 1.5 кПа (порог стрессовой транспирации для степных C_3-злаков),

тогда как в 2024 году таких дней было 49; число «критических» дней с VPD выше 3.0 кПа составило 9 и 2 соответственно. Наибольший рост стресса, когда дневной VPD систематически превышал 1.5-2.0 кПа, отмечен в июле (+13 дней) и августе (+19 дней), характерный для изогидрических C_3-злаков, таких как ковыль и овсяница. Эти условия соответствуют фазе выраженного устьичного ограничения у степных злаков (Hao et al., 2017; Li et al., 2021).

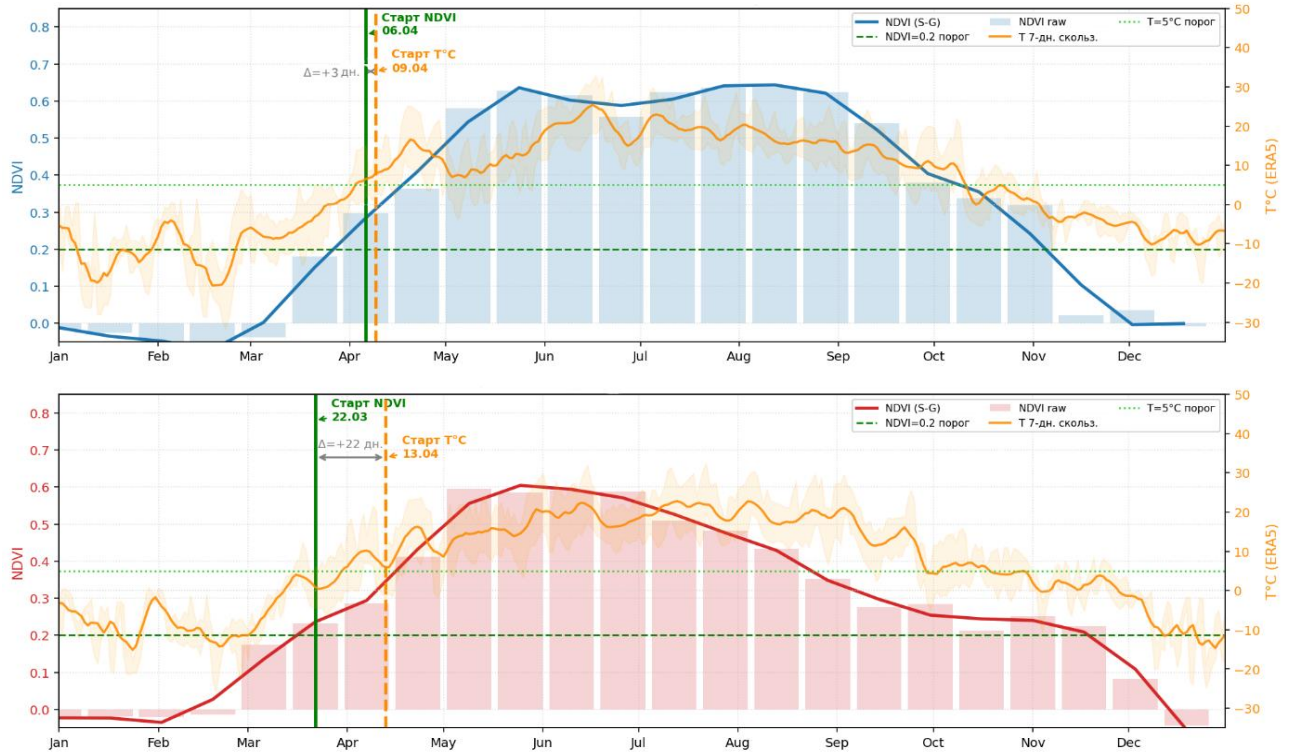

Рис. 5. Сезонная динамика температурного режима и NDVI в 2024 (вверху) и 2025 (внизу) гг.
Fig. 5. Seasonal dynamics of the temperature and NDVI in 2024 (top) and 2025 (bottom).

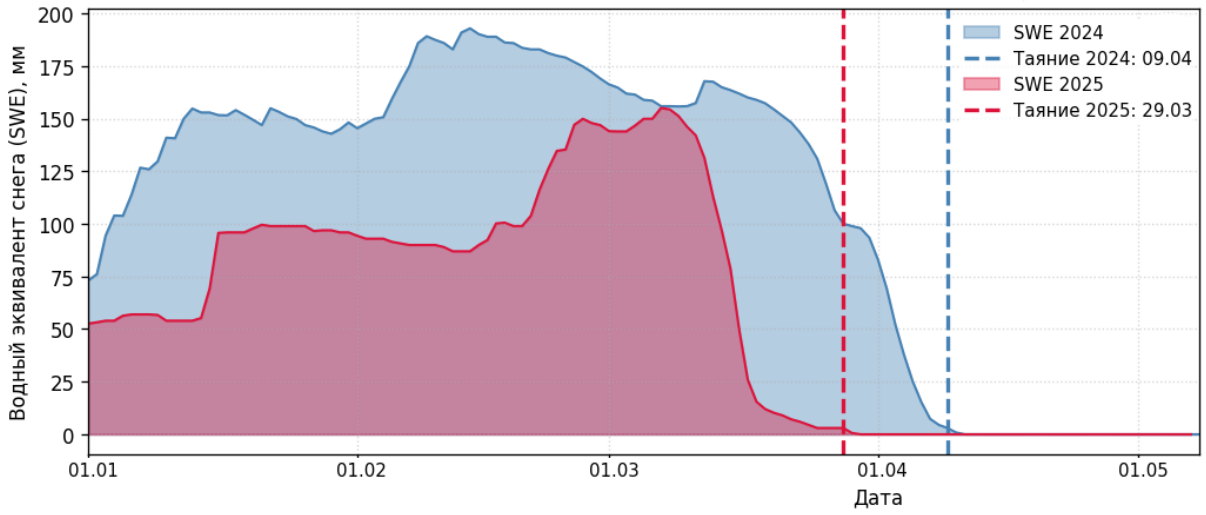

Рис. 6. Запасы воды в снежном покрое и динамика полного таяния снега в 2024-2025 гг.
Fig. 6. Water stocks in the snow cover and dynamic of snow melting in 2024-2025.

Таким образом, по данным ERA5, в период активной вегетации растительности в степных экосистемах (май-июль) 2025 год был более экстремальным, чем 2024 г. В 2025 году были отмечены стресс по дефициту давления водяного пара, большее количество приходящей солнечной радиации на 15%, значительное снижение среднемесячных осадков в летние месяцы (по сравнению с 2024 годом количество осадков в июне 2025 года было ниже в 2 раз, в июле – в 6 раз, в августе – более чем в 3 раза) и снижение влажности почвы на 24% в июне-июле. Подобное сочетание климатических факторов и смещённого во времени максимума осадков создаёт нетипичный гидротермический режим, способствующий раннему запуску вегетации и последующему развитию водного стресса у степной растительности, включая истощение запасов почвенной влаги, что согласуется с данными о высокой чувствительности полузасушливых экосистем к межгодовой вариабельности температуры и распределения (Hao et al., 2017). Резкий рост радиации в июне-июле 2025 года привел к интенсивной транспирации, что в сочетании с дефицитом осадков неизбежно приводит к пожелтению и раннему переходу растительности в состояние покоя (эстивации) уже к середине лета.

Анализ потоков парниковых газов. Результаты измерений потоков CO_2 за вегетационный сезон 2025 года в изученных 4 типах сообществ карбонового полигона «Зауральская степь» показали значительную вариабельность как между сообществами, так и в течение сезона (табл. 2; рис. 7, 8). В целом с апреля по сентябрь 2025 года в дневное время все сообщества функционировали как сток углерода, демонстрируя отрицательные удельные дневные потоки CO_2 (NEE) за вегетационный сезон за исключением апреля и сентября. На участке полынкового пастбища дневной сток углерода был незначительным. Максимальное по модулю дневное поглощение CO_2 фиксировалось в июне на разнотравном пастбище и на залежи.

Таблица 2. Средние значения удельных потоков CO_2 за 2025 год на пробных площадях участка карбонового полигона «Зауральская степь» (мгС$м^{-2}ч^{-1}$). **Table 2.** Average specific fluxes CO_2 on the sample plots of the carbon polygon “Zauralskaya Steppe” in 2025 (mg$C^{-2}h^{-1}$)

Месяц	Степь		Пастбище разнотравное		Пастбище полынковое		Залежь	
	NEE	Reco	NEE	Reco	NEE	Reco	NEE	Reco
Апрель	-11.8	162.2	-17.3	161.0	49.4	130.3	4.9	162.0
Май	-62.9	235.6	-102.2	176.0	-13.5	176.1	-83.4	274.6
Июнь	-40.1	309.0	-187.0	191.0	-56.3	222.0	-171.6	387.3
Июль	-32.0	248.8	-138.6	157.0	-32.9	183.3	-125.6	306.0
Август	-24.0	188.6	-90.1	122.9	-9.4	144.7	-79.5	224.7
Сентябрь	-7.8	68.1	6.8	54.8	37.5	67.3	12.6	62.2
Среднее за сезон	-29.8	202.0	-88.1	143.8	-4.2	153.9	-73.8	236.1

Ночные потоки (Reco) на протяжении всего сезона оставались положительными и существенно превышали по величине дневное поглощение (табл. 2). Наибольшие значения дыхания наблюдались на залежи и в естественной степи, что свидетельствует о высокой метаболической активности этих экосистем и значительных запасах органического вещества в почве и мортмассе (Карелин и др., 2015; Stolbovoi, 2003). Пастбища обоих типов демонстрировали несколько меньшие значения потоков, что может быть связано с меньшими

запасами органического вещества и частичным удалением надземной биомассы выпасом (Lu et al., 2025; Wang et al., 2021).

Анализ помесячной динамики чистого экосистемного обмена (NEE, дневные потоки) (рис. 8) показывает сложную картину взаимодействия фотосинтеза и дыхания. Апрель на всех участках характеризовался либо слабым стоком, либо эмиссией CO_2 (значения NEE – от -4.6 до 19.3 гС·м$^{-2}$месяц$^{-1}$; рис. 8), что соответствует периоду начала вегетации при низких температурах воздуха и остаточной влажности почвы после снеготаяния. Фотосинтетическая активность растительности в апреле была минимальной, а процессы почвенного дыхания уже активизировались. С мая на фоне роста температуры и достаточного влагообеспечения все типы сообществ переходили к режиму устойчивого дневного поглощения CO_2 (отрицательный NEE). Наиболее выраженное поглощение наблюдалось в июне, что совпало с пиком влагообеспеченности и оптимальными для фотосинтеза температурами. В этот период пастбище разнотравное (-84.2 гС·м$^{-2}$месяц$^{-1}$) и залежь (-77.2 гС м$^{-2}$месяц$^{-1}$) проявили максимальную сезонную продуктивность (рис. 8). С июля по мере снижения вегетационной активности экосистемы и роста VPD поглощающая способность экосистем, как и дыхание, уменьшалась (табл. 1; рис. 8, 9). К сентябрю оба пастбища и залежь переходили к положительным значениям NEE, тогда как в естественной степи отмечался слабый сток углерода на фоне общего падения продуктивности.

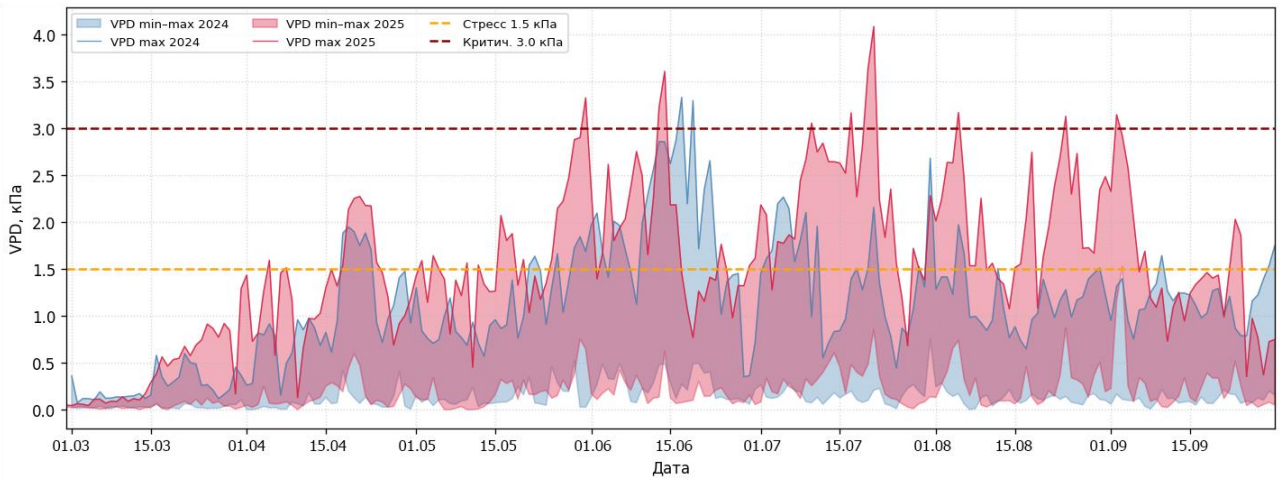

Рис. 7. Суточный диапазон дефицита давления пара (VPD) в 2024-2025 гг.
Fig. 7. Daily range of deficiency of vapor pressure deficit in 2024-2025.

В отличие от дневного NEE ночные потоки на протяжении всего сезона остаются положительными, отражая непрерывную эмиссию CO_2 за счёт гетеротрофного и корневого дыхания (рис. 9). Наибольшие значения Reco характерны для залежи и естественной степи, где в июне-июле средние потоки достигают 104.6 и 83.4 гС·м$^{-2}$·месяц$^{-1}$ соответственно, что указывает на высокую метаболическую активность почв с большими запасами органического вещества и мортмассы. На пастбищах обоих типов ночное дыхание несколько ниже, однако и здесь Reco во все месяцы существенно превышает по модулю дневное поглощение, что в итоге обеспечивает положительный сезонный углеродный баланс для всех обследованных сообществ.

Интеграция потоков показала, что суммарный углеродный баланс за сезон 2025 года был положительным для всех 4 типов сообществ (табл. 3). Наибольшая кумулятивная эмиссия наблюдалась в естественной степи, залежи и полынковом пастбище, тогда как наименьшие значения характерны для разнотравного пастбища. Это означает, что все 4 исследованные

экосистемы в 2025 году выступили чистыми источниками (эмитентами) углекислого газа в атмосферу.

Влияние гидротермических условий и водного стресса. Полученные в 2025 году результаты демонстрируют ключевую роль водного стресса и распределения осадков в формировании сезонного углеродного баланса семиаридных степных экосистем. Смещение максимума осадков на весенне-раннелетний период, более раннее таяние снежного покрова и высокие значения летней радиации создали условия для раннего начала вегетации и быстрого достижения пика NDVI уже в конце мая. Однако последующее увеличение VPD в июле-августе привело к выраженной физиологической засухе: устьичное ограничение транспирации снижало фотосинтетическую активность, что проявлялось в летнем снижении NDVI и уменьшении по модулю отрицательных значений NEE. При VPD выше 1.5-2.0 кПа у растений злаковых степей отмечается снижение устьичной проводимости и валовой первичной продуктивности (GPP), что проявляется в уменьшении NDVI и досрочном завершении вегетационного сезона (Hao et al., 2017; Li et al., 2021).

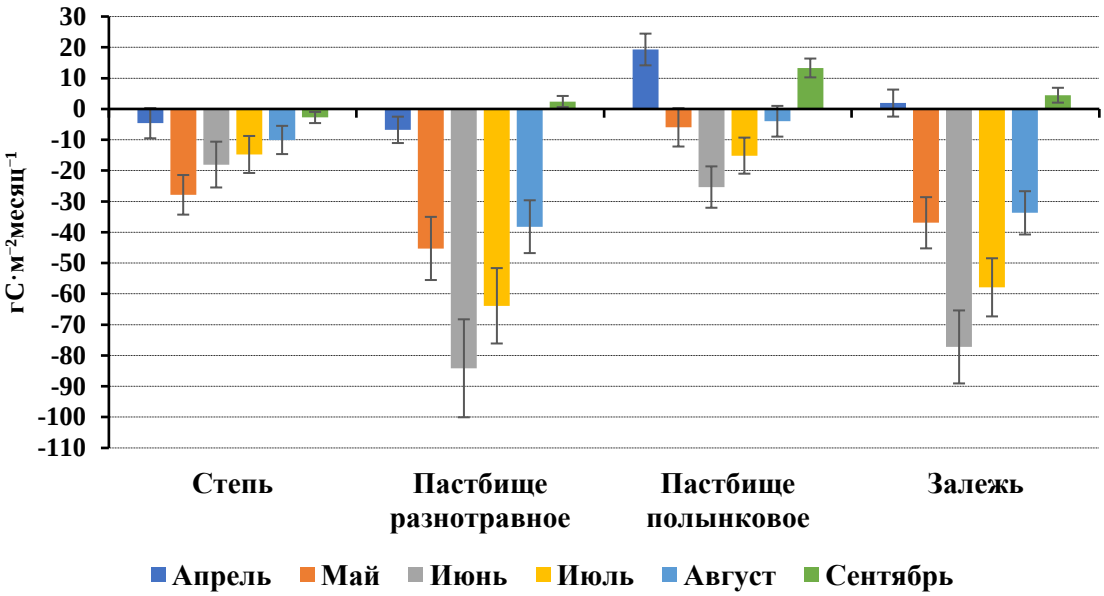

Рис. 8. Кумулятивный эффект за месяц в дневную фазу (NEE).
Fig. 8. Monthly cumulative effect in day time (NEE).

Это свидетельствует о том, что в середине лета 2025 года растения ковыльных степей уже находились в условиях устьичного ограничения, устьица были частично или полностью закрыты в дневные часы, фотосинтез подавлен, а раннее пожелтение растений и сокращение периода активной вегетации имели прямое физиологическое объяснение. При этом дыхание оставалось высоким на протяжении практически всего сезона, особенно на участках с предположительно большими запасами органического вещества (в нашем районе исследования – естественная степь и залежь; Сергалиев и др., 2015), где активизировались микробные и корневые процессы минерализации углерода (Карелин и др., 2015; Stolbovoi, 2003). При дефиците осадков это неизбежно приводит к пожелтению и раннему переходу растительности в состояние покоя (эстивации) уже к середине лета. В результате даже при существенном дневном стоке CO_2 в пик сезона (май-июнь) суммарный углеродный баланс смещался в сторону эмиссии, что согласуется с выводами о доминирующей роли дыхания в полузасушливых экосистемах при благоприятном сочетании температуры и влажности (Hao et al., 2017; Li et al., 2021).

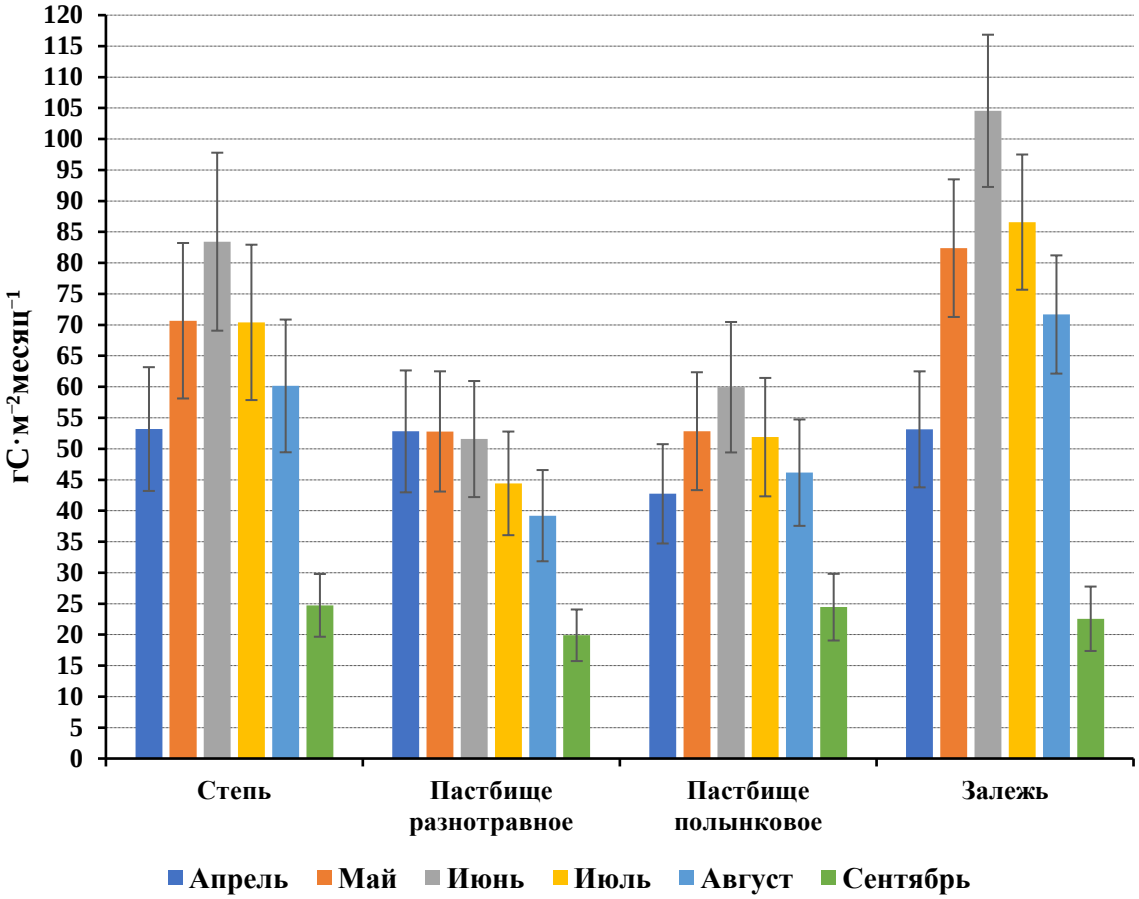

Рис. 9. Кумулятивный эффект за месяц в ночную фазу (Reco).
Fig. 9. Monthly cumulative effect in night time (Reco).

Таблица 3. Накопление углерода на участках степи с различным использованием за вегетационный сезон 2025 г. (гСм$^{-2}$сезон$^{-1}$). **Table 3.** Carbon stocks in the steppe sample plots with different usage types during the vegetation season of 2025 (gCm^{-2}season^{-1}).

Месяц	Степь	Пастбище разнотравное	Пастбище полынковое	Залежь
Апрель	48.6	46.0	62.0	55.0
Май	42.8	7.5	46.9	45.5
Июнь	65.4	-32.6	34.6	27.3
Июль	55.6	-19.5	36.7	28.7
Август	50.1	1.0	42.2	38.0
Сентябрь	22.0	22.3	37.7	27.0
Кумулятивная эмиссия за весь период, гСм$^{-2}$	284.4	24.8	260.1	221.5

Проведённый статистический анализ подтверждает определяющую роль водного стресса и фенологии в углеродном обмене исследованных сообществ. Выявленные высокие

отрицательные корреляции NEE с NDVI ($r = -0.859$, $p < 0.001$) и VPD ($r = -0.949$, $p < 0.001$) свидетельствуют о том, что продуктивность экосистем в 2025 году лимитировалась как количеством зелёной фитомассы, так и физиологической засухой. В свою очередь экосистемное дыхание ожидаемо контролировалось термическим режимом ($r = 0.930$, $p < 0.001$) и было чувствительно к иссушающему эффекту высокого VPD ($r = 0.977$, $p < 0.001$). Совместный учёт VPD, NDVI и влажности почвы объясняет до 93-95% вариабельности NEE, что подчёркивает критическую важность водного режима для функционирования степных экосистем Башкирского Зауралья в условиях аномально тёплого вегетационного сезона.

Это подтверждает, что сочетание гидротермических условий и водного стресса определяет не только величину потоков CO_2, но и на продолжительность периода, в течение которого экосистема способна функционировать как эффективный сток углерода (Куричева и др., 2023; Карелин и др., 2023). Дополнительный вклад в рост эмиссии вносят повышенные температуры почвы (Э.О. Чимитдоржиева, Г.Д. Чимитдоржиева, 2011) и общая аридизация климата степей, усиливающая почвенное дыхание в условиях дефицита осадков (Чимитдоржиева и др., 2010).

Различия между типами сообществ и роль землепользования. Сравнение пространственных различий между типами сообществ показывает, что землепользование и стадия сукцессии существенно модифицируют реакцию степной экосистемы на климатические драйверы. Разнотравное пастбище продемонстрировало наибольшую поглощающую способность в пик сезона при относительно умеренных значениях Reco, что обеспечило ему минимальную кумулятивную эмиссию за сезон – 24.8 гС·м$^{-2}$сезон$^{-1}$ (табл. 3). Полынковое пастбище, сформировавшееся в результате длительного выпаса, характеризовалось высокой кумулятивной эмиссией углерода в 2025 г. (260.1 гС·м$^{-2}$сезон$^{-1}$). Тем не менее, дневные потоки в течение лета были отрицательными, что подчёркивает высокую продуктивность полынно-злаковых сообществ в условиях достаточного увлажнения.

В итоге в дневное время в течение всего лета пастбище разнотравное и полынковое являлись стоком углерода. Это согласуется с данными о том, что умеренный выпас может поддерживать высокую продуктивность травостоя без чрезмерного накопления легкоразлагаемой мортмассы (Laubach et al., 2023; Wall et al., 2023). Также это можно связать с ослаблением микробной активности вследствие уплотнения почвы и снижения количества свежих растительных остатков (Lu et al., 2025; Wang et al., 2021).

Залежь на заброшенной пашне сочетала высокие показатели фотосинтеза и максимальные значения дыхания и показала достаточно высокое суммарное значение (221.5 гС·м$^{-2}$сезон$^{-1}$). На ранних этапах постагрогенной сукцессии доля надземной биомассы и вклад быстро разлагаемой органики в поток CO_2 повышены (Титлянова, Шибарева, 2022; Баишева и др., 2023; Kurganova et al., 2015). В таких условиях, даже при значительном дневном стоке углерода, общий баланс может оставаться положительным из-за высокой интенсивности гетеротрофного дыхания.

Естественная степь продемонстрировала наиболее высокую кумулятивную эмиссию (284.4 гС·м$^{-2}$сезон$^{-1}$), несмотря на относительно стабильные, но умеренные по величине отрицательные значения NEE. Это может быть связано с большими запасами корневой и подземной биомассы, а также мортмассы, обеспечивающих устойчивый субстрат для дыхания (Мордкович, 2014; Чибилёв, 2016). На ранних этапах постагрогенной сукцессии залежи характеризуются относительно низкой долей корневой биомассы и высокой долей быстрообновляемой надземной фитомассы (Баишева и др., 2023), тогда как в зрелой степи со временем доля подземной биомассы возрастает (Титлянова, Шибарева, 2022). Это объясняет бóльшие по модулю отрицательные значения NEE на залежи по сравнению с эталонной

степью при сопоставимых или даже более высоких потоках Reco. На пастбищах интенсивный выпас приводит к уплотнению почвы и снижению активности микробного сообщества, что уменьшает почвенную эмиссию CO_2 (Wang et al., 2021), но одновременно сокращает надземную биомассу и ограничивает потенциал дневного поглощения. Тем не менее, на разнотравных пастбищах с преобладанием злаков значения дневных потоков достаточно высоки.

Значения сезонной эмиссии, полученные для обследованного естественного степного участка в 2025 году, сопоставимы или несколько превышают оценки для некоторых казахстанских степей (Perez-Quezada et al., 2010), что подчёркивает высокую межгодовую вариабельность углеродного баланса степных сообществ, в зависимости от конкретного сочетания температурного и водного режимов. Высокая депонирующая способность залежей относительно естественных степей согласуется с оценками вклада травянистых и восстанавливающихся экосистем в углеродный баланс России (Stolbovoi, 2003). В связи с этим данный вопрос требует дополнительного изучения, но это может объясняться значительными запасами органического вещества и соответствующими высокими тратами на дыхание (Reco), особенно в благоприятных условиях увлажнения 2025 г.

Выводы

Результаты исследований, проведённых в вегетационный сезон 2025 г. в четырех типах степных сообществ Башкирского Зауралья, показали, что в условиях аномального гидротермического режима все изученные экосистемы функционировали как чистые источники CO_2 в атмосферу. Полученные данные подтверждают, что направленность углеродного баланса семиаридных экосистем определяется не столько абсолютными значениями фотосинтетической продуктивности, сколько соотношением между процессами поглощения и дыхания, чувствительность которых к климатическим драйверам существенно различается.

Выявлена ведущая роль раннесезонных условий (снеготаяние, распределение осадков, радиационный режим) в формировании дальнейшей траектории углеродного баланса: смещение максимума увлажнения на весну при последующем развитии водного стресса в середине лета привело к функциональному дисбалансу между фотосинтезом и дыханием, что в итоге обеспечивает результирующую эмиссию даже в сообществах с высоким стоковым потенциалом. Это обстоятельство имеет принципиальное значение для понимания механизмов функционирования степных экосистем в условиях климатических изменений, сопровождающихся ростом частоты засушливых явлений и перераспределением осадков внутри сезона.

Сравнительный анализ сообществ с разной историей землепользования показал, что антропогенная трансформация (выпас разной интенсивности, постагрогенное восстановление) модифицирует структуру биомассы и запасы органического вещества, что напрямую влияет на интенсивность дыхательных потоков и, следовательно, на результирующий углеродный баланс. Полученные оценки вносят вклад в понимание роли вторичных восстановительных сукцессий и пастбищного режима в регулировании эмиссионных процессов в степных экосистемах и могут быть использованы при разработке региональных стратегий адаптации растительности к изменениям климата и повышения углеродной нейтральности агроландшафтов.

Для перехода от констатации эмиссионного статуса экосистем в отдельно взятом сезоне к прогнозным оценкам и верификации климатических моделей необходим многолетний мониторинг, включающий годы с различными сочетаниями гидротермических условий и охватывающий полный годовой цикл потоков парниковых газов. Только такой подход

позволит отделить внутрисезонную вариабельность от долгопериодных трендов и количественно оценить вклад степных экосистем Южно-Уральского региона в региональный углеродный бюджет.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на тему «Оценка объёма эмиссии и поглощения парниковых газов репрезентативными типами экосистем на участках Евразийского карбонового полигона и поиск оптимальных технологических решений для декарбонизации Республики Башкортостан» (Номер для публикаций: FEUR-2024-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баишева Э.З., Федоров Н.И., Жигунова С.Н., Широких П.С., Комиссаров М.А., Габбасова И.М., Мулдашев А.А., Бикбаев И.Г., Туктамышев И.Р., Шендель Г.В., Сулейманов Р.Р., Гарипов Т.Т.* 2023. Продуктивность растительности и запасы углерода в луговой степи на залежи в Башкирском Предуралье (Южно-Уральский регион) // Юг России: экология, развитие. Т. 18. № 4. С. 64-73.
2. Гидрометцентр России. Климатические характеристики Уфы. 2020 [Электронный ресурс https://meteoinfo.ru/categ-articles/15-climate-cat/klimaticheskie-normy/clim-towns/1746-1246618396 (дата обращения 01.05.2026)].
3. *Карелин Д., Люри Д., Горячкин С., Лунин В., Кудиков А.* 2015. Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в черноземной лесостепи // Почвоведение. С. 1354-1366.
4. *Карелин Д.В., Суховеева О.Э., Глаголев М.В., Добрянский А.С., Сабреков А.Ф., Замотаев И.В.* 2023. Годовой бюджет углеродсодержащих биогенных парниковых газов при смешанном землепользовании: Льговский район как модельный объект Центрального Черноземья // Почвоведение. № 8. С. 911-924.
5. *Куричева О.А., Авилов В.К., Варлагин А.В., Гитарский М.Л., Дмитриченко А.А. и др.* 2023. Мониторинг экосистемных потоков

REFERENCES

1. Baisheva EZ, Fedorov NI, Shirokikh PS, Komissarov MA, Gabbasova IM, Muldashev AA, Bikbaev IG, Tuktamyshev IR, Shendel GV, Suleymanov RR, Garipov TT. Vegetation Productivity and carbon stock of the meadow steppe on the fallow lands of the Bashkir Cis-Urals (Southern-Ural region) [Produktivnost' rastitel'nosti i zapasy ugleroda v lugovoy stepi na zalezhi v Bashkirskom Predural'ye (Yuzhno-Ural'skiy region)]. *South of Russia: Ecology, Development [Yug Rossii: ekologiya, razvitiye]*. 2023;18:64-73.
2. Russian hydrometeorological centre [*Gidromettsentr Rossii*] *Climate record of Ufa [Klimaticheskiye kharakteristiki Ufy]*. 2020, Available at https://meteoinfo.ru/categ-articles/15-climate-cat/klimaticheskie-normy/clim-towns/1746-1246618396 (Date of Access 01/05/2026).
3. Karelin D, Luri D, Goryachkin C, Lunin V, Kudikov A. Changes in soil carbon dioxide emissions during postagrogenic succession in the chernozem forest-steppe [Izmeneniye pochvennoy emissii dioksida ugleroda v khode postagrogennoy suktsessii v chernozemnoy lesostepi]. *Eurasian Soil Science*. 2015;1354-1366.
4. Karelin DV, Sukhoveeva OE, Glagolev MV, Dobryanskiy AS, Sabrekov AF, Zamotayev IV. Annual budget of carbon-containing biogenic greenhouse gases in mixed land use: Lgovsky district as a model object of the Central Chernozem region [Godovoy byudzhet uglerodsoderzhashchikh biogennykh parnikovykh gazov pri smeshannom zemlepol'zovanii: L'govskiy rayon kak model'nyy ob''yekt Tsentral'nogo

парниковых газов на территории России: сеть ruflux // Известия Российской академии наук. Серия географическая. Т. 87. № 4. С. 512-535.

6. *Мордкович В.Г.* 2014. Степные экосистемы. Новосибирск: Гео. 170 с.
7. *Сергалиев Н.Х., Жиенгалиева А.Т., Турбаев А.Ж., Абишева С.Х.* 2015. Измерение эмиссии диоксида углерода из почвы с разной пастбищной нагрузкой // Новости науки Казахстана. № 4 (126). С. 195-207.
8. *Титлянова А.А., Шибарева С.В.* 2022. Изменение чистой первичной продукции и восстановление запасов углерода в почвах залежей // Почвоведение. № 4. С. 500-510.
9. *Хазиев Ф.Х., Мукатанов А.Х., Хабиров И.К., Кольцова Г.А., Габассова И.М., Рамазанова Р.Я.* 1995. Почвы Башкортостана. Т. 1: Эколого-генетическая и агропроизводственная характеристика: монография. Уфа: Гилем. 384 с.
10. *Хорошаев Д.А., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О.* 2023. Оценка отклика гетеротрофного почвенного дыхания на режим выпадения летних осадков и разную глубину снежного покрова // Почвоведение. № 11. С. 1400-1417.
11. *Черепанов С.К.* 1995. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). 2-е изд. СПб.: Мир и семья-95. 990 с.
12. *Чибилёв А.А.* 2016. Степная Евразия: региональный обзор природного разнообразия. Оренбург: Институт степи РАН/РГО. 324 с.
13. *Чимитдоржиева Г.Д., Егорова Р.А., Мильхеев Е.Ю., Цыбенов Ю.Б.* 2010. Потоки углерода в степных экосистемах (на примере южного Забайкалья) // Растительный мир Азиатской России: Вестник Центрального сибирского

Chernozem'ya]. *Eurasian Soil Science.* 2023;8:911-924.

5. Kuricheva OA, Avilov VK, Varlagin AV, Gitarskiy ML, Dmitrichenko AA et al.. Monitoring of ecosystem fluxes of greenhouse gases in Russia: ruflux network [Monitoring ekosistemnykh potokov parnikovykh gazov na territorii Rossii: set' ruflux]. Proc. of Russian Academy of Science [Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk] Geographical series [Seriya geograficheskaya]. 2023;87 (4):512-535.
6. Mordkovich VG. Steppe ecosystems [Stepnyye ekosistemy]. Novosibirsk: Geo, 2014:170.
7. Sergaliev NH, Zhiengalieva AT, Turbaev AZh, Abisheva SH. Measurement of carbon dioxide emissions from soils with different pasture stress [Izmereniye emissii dioksida ugleroda iz pochvy s raznoy pastbishchnoy nagruzkoy]. *Scientific News of Kazakhstan [Novosti nauki Kazakhstana]*. 2015;4 (126):195-207.
8. Titlyanova AA, Shibareva SV. Change in net primary production and restoration of carbon stock in the soils of fallows [Izmeneniye chistoy pervichnoy produktsii i vosstanovleniye zapasov ugleroda v pochvakh zalezhey]. *Eurasian Soil Science.* 2022;4:500-510.
9. Khaziev FH, Mukatanov AH, Habirov IK, Koltsova GA, Ramazanova RYa. Bashkortostan soils [*Pochvy Bashkortostana*] *Vol. 1: Ecology-genetics and agrologic productive property: monography [T. 1: Ekologo-geneticheskaya i agroproizvodstvennaya kharakteristika: monografiya]*. Ufa: Gilem, 1995:384.
10. Khoroshaev DA, Kurganova IN, Lopes de Gerenyu VO. Assessment of the response of heterotrophic soil respiration to the summer precipitation regime and different snow cover depths [Otsenka otklika geterotrofnogo pochvennogo dykhaniya na rezhim vypadeniya letnikh osadkov i raznuyu glubinu snezhnogo pokrova]. *Eurasian Soil Science.* 2023;11:1400-1417.
11. Cherepanov SK. Vascular plants of Russia and adjacent states (within the limits of the former USSR) [*Sosudistyye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv (v predelakh*

ботанического сада СО РАН. № 2 (6). С. 33-39.

14. *Чимитдоржиева Э.О., Чимитдоржиева Г.Д.* 2011. Эмиссия диоксида углерода из постагрогенных степных и сухостепных почв западного Забайкалья // Известия ТСХА: экология, почвоведение, земледелие. Вып. 2. С. 93-102.
15. Climate Data Store. 2026 [Электронный ресурс https://cds.climate.copernicus.eu/datasets (дата обращения 05.06.2026)].
16. *Gao S., Yan, K., Yan G., Rautiainen M., Knyazikhin Y., Myneni R.B.* 2025. Rainfall-Caused Water Film on Canopy Surface Biases Remotely-Sensed Vegetation Greenness // Remote Sensing of Environment. Vol. 324. Article No. 114747.
17. Google.Maps. 2026 [Электронный ресурс https://www.google.com/maps (дата обращения 05.06.2026)].
18. *Hao Y., Zhou C., Liu W., Li L., Jiang L., Kang X., Wang Y., Wang Y., Xu C.* 2017. Aboveground Net Primary Productivity and Carbon Balance Remain Stable under Extreme Precipitation Events in a Semiarid Steppe Ecosystem // Agricultural and Forest Meteorology. P. 240-241.
19. *Khalil R., Khan M.S., Hasan Y., Nacer N., Khan S.* 2024. Supervised NDVI Composite Thresholding for Arid Region Vegetation Mapping // Engineering, Technology and Applied Science Research/Engineering, Technology and Applied Science Research. P. 1420-1442.
20. *Körner C., Möhl P., Hiltbrunner E.* 2023. Four Ways to Define the Growing Season // Ecology Letters. Vol. 26. No. 8. P. 1277-1292.
21. *Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y.* 2015. Large-scale Carbon Sequestration in Post-Agrogenic Ecosystems in Russia and Kazakhstan // Catena. Vol. 133. P. 461-466.
22. *Laubach J., Hunt J.E., Graham S.L., byvshego SSSR)*]. 2nd ed. Saint-Petersburg: Mir i Semya-95, 1995:990.
12. Chibilev AA. Eurasian steppe: local view of environment diversity [Stepnaya Yevraziya: regional'nyy obzor prirodnogo raznoobraziya]. Orenburg: Institut stepi RAN/RGO, 2016:324.
13. Chimitdorzhieva GD, Egorova RA, Milheev EYu, Cibenko YuB. Carbon fluxes in steppe ecosystems (on the example of southern Transbaikalia) [Potoki ugleroda v stepnykh ekosistemakh (na primere yuzhnogo Zabaykal'ya)]. *Flora of Asian Russia: Bulletin of the Central Siberian Botanical Garden SD RAS [Rastitel'nyy mir Aziatskoy Rossii: Vestnik Tsentral'nogo sibirskogo botanicheskogo sada SO RAN]*. 2010;2 (6):333-39.
14. Chimitdorzhieva EO, Chimitdorzhieva GD. Carbon dioxide emissions from postagrogenic steppe and dry steppe soils of western Transbaikalia [Emissiya dioksida ugleroda iz postagrogennykh stepnykh i sukhostepnykh pochv zapadnogo Zabaykal'ya]. *Proc. of Moscow Timiryazev Agricultural Academy: Ecology, Soil Science, and Agronomy [Izvestiya TSKHA: ekologiya, pochvovedeniye, zemledeliye]*. 2011;2:93-102.
15. Climate Data Store. 2026, Available at https://cds.climate.copernicus.eu/datasets (Date of Access 05/06/2026).
16. Gao S, Yan K, Yan G, Rautiainen M, Knyazikhin Y, Myneni RB. Rainfall-caused water film on canopy surface biases remotely-sensed vegetation greenness. *Remote Sensing of Environment.* 2025;324:114747.
17. Google.Maps. 2026, Available at https://www.google.com/maps (Date of Access 05/06/2026).
18. Hao Y, Zhou C, Liu W, Li L, Jiang L, Kang X, Wang Y, Wang Y, Xu C. Aboveground net primary productivity and carbon balance remain stable under extreme precipitation events in a semiarid steppe ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2017:240-241.
19. Khalil R, Khan MS, Hasan Y, Nacer N, Khan S. Supervised NDVI Composite Thresholding for Arid Region Vegetation Mapping. *Engineering, Technology and*

Buxton R.P., Rogers G.N.D., Mudge P.L., Goodrich J.P., Whitehead D. 2023. Mitigation Potential and Trade-Offs for Nitrous Oxide Emissions and Carbon Balances of Irrigated Mixed-Species and Ryegrass-Clover Pastures // Agricultural and Forest Meteorology. Vol. 330. 14 p.

23. *Li X., Yan Y., Fu L.* 2021. Effects of Rainfall Manipulation on Ecosystem Respiration and Soil Respiration in an Alpine Steppe in Northern Tibet Plateau // Frontiers in Ecology and Evolution. 9 p.
24. *Lu Naijing, Tianqi Zhao, Jianying Guo, Mengli Zhao, Guodong Han, Zhongwu Wang, Jiangfeng He, Rui Zhao, Yong Wang, Jian Guan, Bin Zhang, Guang Yang.* 2025. Grazing Disturbance Reduces soil Organic Carbon Sequestration and Stability in Desert Steppe // Journal of Environmental Management. Vol. 395. Article No. 127675. p. 14.
25. *Perez-Quezada J.F., Saliendra N.Z., Akshalov K., Johnson D.A., Laca E.A.* 2010. Land Use Influences Carbon Fluxes in Northern Kazakhstan // Rangeland Ecology & Management. Vol. 63. P. 82-93.
26. *Stolbovoi V.* 2003. Soil Respiration and Its Role in Russia's Terrestrial C Flux Balance for the Kyoto Baseline Year // Tellus. Vol. B55. P. 258-269.
27. USGS. Deriving Phenology Metrics from NDVI. USGS Remote Sensing Phenology. 2018 [Электронный ресурс https://www.usgs.gov/special-topics/remote-sensing-phenology/science/science-topics/deriving-phenology-metrics-ndvi (дата обращения 04.05.2026)].
28. *Wall A.M., Goodrich J.P., Campbell D.I., Morcom C.P., Schipper L.A.* 2023. The Carbon Balance of a Temperate Grazed Pasture Following Periodic Maize Silage Cropping Depends on Climate and Management // Agriculture, Ecosystems & Environment. Vol. 352. P. 108523.
29. *Wang F., Chen Y., Li T., Wang C., Applied Science Research/Engineering, Technology and Applied Science Research.* 2024:1420-1442.
20. Körner C, Möhl P, Hiltbrunner E. Four ways to define the growing season. *Ecology Letters.* 2023;26 (8):1277-1292.
21. Kurganova I, Lopes de Gerenyu V, Kuzyakov Y. Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan. *Catena.* 2015;133:461-466.
22. Laubach J, Hunt JE, Graham SL, Buxton RP, Rogers GND, Mudge PL, Goodrich JP, Whitehead D. Mitigation potential and trade-offs for nitrous oxide emissions and carbon balances of irrigated mixed-species and ryegrass-clover pastures. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2023;330:14.
23. Li X, Yan Y, Fu L. Effects of rainfall manipulation on ecosystem respiration and soil respiration in an alpine steppe in northern Tibet Plateau. *Frontiers in Ecology and Evolution.* 2021:9.
24. Lu Naijing, Tianqi Zhao, Jianying Guo, Mengli Zhao, Guodong Han, Zhongwu Wang, Jiangfeng He, Rui Zhao, Yong Wang, Jian Guan, Bin Zhang, Guang Yang.. Grazing disturbance reduces soil organic carbon sequestration and stability in desert steppe. *Journal of Environmental Management.* 2025;395 (127675):14.
25. Perez-Quezada JF, Saliendra NZ, Akshalov K, Johnson DA, Laca EA. Land use influences carbon fluxes in northern Kazakhstan. *Rangeland Ecology & Management.* 2010;63:82-93.
26. Stolbovoi V. Soil respiration and its role in Russia's terrestrial C flux balance for the Kyoto baseline year. *Tellus.* 2003;B55:258-269.
27. USGS. Deriving phenology metrics from NDVI. USGS Remote Sensing Phenology. 2018, Available at https://www.usgs.gov/special-topics/remote-sensing-phenology/science/science-topics/deriving-phenology-metrics-ndvi (Date of Access 04/05/2026).
28. Wall AM, Goodrich JP, Campbell DI, Morcom CP, Schipper LA. The carbon

Wang D., Fu B., Lv Y., Wu X. 2021. Grazing Reduces the Soil–Atmosphere Exchange of Greenhouse Gases during Freeze–Thaw Cycles in Meadow Steppes in Inner Mongolia // Ecology and Evolution. 9 p.

30. *Wang J., Zeng N., Wang H. et al.* 2020. Environmental Control of Land–Atmosphere CO_2 Fluxes in the Northern Hemisphere // Tellus B. Vol. 72. 25 p.

balance of a temperate grazed pasture following periodic maize silage cropping depends on climate and management. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2023;352:108523.

29. Wang F, Chen Y, Li T, Wang C, Wang D, Fu B, Lv Y, Wu X. Grazing reduces the soil–atmosphere exchange of greenhouse gases during freeze–thaw cycles in meadow steppes in Inner Mongolia. *Ecology and Evolution.* 2021:9.
30. Wang J, Zeng N, Wang H et al. Environmental control of land–atmosphere CO_2 fluxes in the Northern Hemisphere. *Tellus B.* 2020;72:25.

UDC 551.583; 574.23

IMPACT OF EXTREME CLIMATE ON THE CARBON BALANCE OF STEPPE ECOSYSTEMS WITH DIFFERENT LAND-USE REGIMES

© 2026. P.S. Shirokikh*, **, S.N. Zhigunova*, **, V.D. Gimazetdinov*, **, I.G. Bikbayev*, **, I.R. Tuktamyshev*, **, V.B. Martynenko, E.Z. Baisheva**, D.T. Gabbasova*, **, D.M. Gulov*, ****

**Ufa State Petroleum Technological University*
145 Chernyshevskogo, Ufa, 450078, Russia. E-mail: shirpa@mail.ru
***Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences*
69, Oktyabrya Avenue, Ufa, 450054, Russia. E-mail: vazir.gimazetdinov@mail.ru

Received March 23, 2026. Revised Juni 05, 2026. Accepted September 01, 2026.

We present the first results of our direct chamber measurements of CO_2 fluxes (NEE, Reco) in steppe ecosystems of the «Zauralskaya Steppe» site of Eurasian Carbon Polygon (Republic of Bashkortostan) in 2025, during the hydrothermally abnormal vegetation season. Our aim was to assess the seasonal carbon balance of 4 ecosystems under conditions of a spring-shifted precipitation maximum and enhanced summer water stress: the natural steppe, post-agrogenic fallow, forb-dominated pasture, and *Artemisia* pasture. These ecosystems were found to function as net sources of CO_2. The cumulative carbon emission from April to September amounted to 284.4 gC m^{-2} in the natural steppe, 60.1 gC m^{-2} in the forb-dominated pasture, 66.0 gC m^{-2} in the *Artemisia* pasture, and 85.0 gC m^{-2} in the fallow. The largest daytime CO_2 uptake (NEE) was observed in June at the forb-dominated pasture (−187 mgC m^{-2} h^{-1}) and fallow (−171.6 mgC $m^{-2}h^{-1}$), but this sink potential was offset by high ecosystem respiration, with Reco peaking at 387.3 mgC $m^{-2}h^{-1}$ at the fallow. The main drivers of the seasonal net emission balance were the earlier start of snowmelt (29 March), the shift of the NDVI peak to late May, and the subsequent water stress (92 days with VPD > 1.5 kPa), which suppressed photosynthesis, while maintaining high respiratory fluxes. The results of our research indicate that, under the hydrothermal conditions of 2025, a shift of the phenological window of active vegetation and enhanced respiration made the steppe ecosystems of the Trans-Urals a persistent CO_2 source, regardless of their land-use type.

Keywords: steppe ecosystems, pastures, carbon balance, CO_2 flux, net ecosystem exchange, NEE, ecosystem respiration, Reco, vapor pressure deficit, VPD, post-agrogenic fallow, Southern Ural region.
DOI: 10.24412/2542-2006-2026-3-5-24
EDN: OSEBJH