



Е.Х. Мендыбаев¹ , С.У. Зуфаров¹ ,
Г.А. Гатаулина¹ , М.Ж. Шарипова^{2*} 

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²Международный университет Астана, Астана, Казахстан

*e-mail: moldirzhumagul@gmail.com

ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ СТЕПНЫХ ЭКОСИСТЕМ АКМОЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Степные экосистемы Акмолинской области являются критически важным компонентом регионального углеродного цикла, выполняя функцию значимого резервуара органического углерода. Однако их поглотительная способность подвержена сильным флуктуациям в зависимости от типа растительности и климатических условий. Целью данного исследования стала комплексная количественная оценка основных составляющих углеродного баланса на основе исследования биологической продуктивности – чистой первичной продукции (NPP) и гетеротрофного дыхания (Rh). Полевые работы были проведены в течение вегетационного сезона 2025 года на территории 25 стационарных мониторинговых участков в пяти административных районах (Егіндыкольский, Аккольский, Ерейментауский, Есильский, Атбасарский). Методология базировалась на методе «минимальных оценок» А.А. Титляновой, включающем ежемесячный учет фракций надземной и подземной биомассы. Установлено, что продукционные процессы характеризуются высокой пространственной неоднородностью: максимальная продуктивность зафиксирована в мезофитных сообществах Есильского района. В засушливых условиях (Атбасарский район) выявлена адаптивная стратегия, при которой основная часть углерода депонируется в корнях. Результаты подтверждают, что в условиях влажной весны 2025 года все исследованные экосистемы выступали в роли стока углерода, секвестрируя от 1,65 до 6,42 т CO₂-экв/га/год. Исследование подчеркивает необходимость учета корневой продукции при моделировании климата.

Ключевые слова: чистая экосистемная продукция, углеродный баланс, сухая степь, Акмолинская область, динамика биомассы, чистая первичная продукция, корневая мортмасса.

Y.N. Mendybayev¹, S.U. Zufarov¹, G.A. Gataulina¹, M.Zh. Sharipova^{2*}

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Astana International University, Astana, Kazakhstan

*e-mail: moldirzhumagul@gmail.com

Assessment of the carbon balance based on the determination of the productivity of plant communities of steppe ecosystems of the Akmola region

The steppe ecosystems of the Akmola Region are a critically important component of the regional carbon cycle, serving as a significant reservoir of organic carbon. However, their carbon sequestration capacity is subject to significant fluctuations depending on vegetation type and climatic conditions. The aim of this study was to conduct a comprehensive quantitative assessment of the main components of the carbon balance based on an analysis of biological productivity – net primary production (NPP) and heterotrophic respiration (Rh). Fieldwork was conducted during the 2025 growing season at 25 permanent monitoring sites in five administrative districts (Egindykol, Akkol, Erementau, Esil, and Atbasar). The methodology was based on A.A. Titlyanova's "minimum estimates" method, which involves monthly accounting of aboveground and belowground biomass fractions. It was established that productivity processes are characterized by high spatial heterogeneity: maximum productivity was recorded in the mesophytic communities of the Esil District. Under arid conditions (Atbasar District), an adaptive strategy was identified in which the majority of carbon is stored in the roots. The results confirm that during the wet spring of 2025, all studied ecosystems acted as carbon sinks, sequestering between 1.65 and 6.42 t CO₂-eq/ha/year. The study highlights the need to account for root production in climate modeling.

Keywords: net ecosystem production, carbon balance, dry steppe, Akmola region, biomass dynamics, net primary production, root necromass.

Е.Х. Мендыбаев¹, С.У. Зуфаров¹, Г.А. Гатаулина¹, М.Ж. Шарипова^{2*}

¹А.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан

*e-mail: moldirzhumagul@gmail.com

Ақмола облысының дала экожүйелерінің өсімдік қауымдастықтарының өнімділігін анықтау негізінде көміртегі теңгерімін бағалау

Ақмола облысының дала экожүйелері аймақтық көміртегі айналымының маңызды құрамдас бөлігі және органикалық көміртегінің елеулі резервуары болып табылады. Алайда, олардың көміртегін сіңіру қабілеті өсімдік жамылғысының түрі мен климаттық жағдайларға байланысты айтарлықтай ауытқиды, бұл парниктік газдар динамикасын болжауды қиындатады. Зерттеудің мақсаты – биологиялық өнімділікті (NPP) және топырақтың гетеротрофты тыныс алуын (Rh) егжей-тегжейлі зерттеу негізінде таза экожүйелік өнімділікті (NEP) кешенді сандық бағалау. Далалық жұмыстар 2025 жылғы вегетациялық кезеңде бес ауданда (Егіндікөл, Аққөл, Ереймен-тау, Есіл, Атбасар) орналасқан 25 мониторингтік учаскеде жүргізілді. Әдістеме жерүсті және жерасты биомасса фракцияларын есепке алатын А.А. Титлянованың әдісіне негізделген. Зерттеу өнімділік процестерінің айқын кеңістіктік біртекті еместігін көрсетті: таза бастапқы өнім (NPP) ксерофитті қауымдастықтардағы 7,38 т/га-дан мезофитті далалардағы 15,78 т/га-ға дейін ауытқыды. Атбасар ауданының құрғақ жағдайында өсімдіктердің көміртегін негізінен тамыр жүйесінде жинақтауға бейімделген стратегиясы анықталды. 2025 жылғы қолайлы гидротермиялық жағдайларда барлық зерттелген экожүйелер көміртегінің таза сіңіргіші (net sink) ретінде жұмысы орташа есеппен жылына 3,48 т CO₂-экв/га сіңіргені анықталды. Жылдық NPP-дің 40%-ға жуығы тамыр өлімассасы түрінде жинақталатыны және минералданудың баяу қарқынына байланысты ұзақ мерзімді көміртегі резервін құрайтыны дәлелденді. Зерттеу нәтижелері ұлттық парниктік газдардың кадастрын түзетуге және климаттың өзгеруіне бейімделу стратегияларын әзірлеу үшін маңызды.

Түйін сөздер: таза экожүйелік өнім, көміртегі теңгерімі, құрғақ дала, Ақмола облысы, биомасса динамикасы, таза бастапқы өнім, тамыр өлімассасы.

Введение

В современных условиях прогрессирующей глобальной климатической нестабильности и необходимости реализации международных соглашений по достижению углеродной нейтральности, точная количественная оценка углеродного цикла наземных экосистем выступает приоритетной задачей для Республики Казахстан. Согласно последним аналитическим данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), концентрация парниковых газов в атмосфере достигла беспрецедентных значений (Lee et al., 2023). Это требует принятия экстренных мер не только в сфере сокращения промышленных выбросов, но и в направлении усиления естественной поглощательной способности природных биомов.

Травяные экосистемы, охватывающие степи, прерии и саванны, занимают около 40% площади суши (без учета ледниковых покровов) и выступают гигантским резервуаром, содержащим от 20 до 30% мировых запасов почвенного органического углерода (Jobbágy & Jackson, 2000; Scurlock et al., 1998). В отличие от лесов, где основной пул углерода сосредоточен в наземной

древесине и легко высвобождается при пожарах, степи аккумулируют органическое вещество преимущественно в почвенном профиле и мощных корневых системах. Это делает их исключительно надежными долгосрочными хранилищами углерода. Для Казахстана, чьи степные ландшафты занимают более 180 млн га, объективное понимание потенциала секвестрации CO₂ этими территориями является важнейшим аспектом экологической безопасности и стратегического планирования в рамках перехода к безуглеродной экономике к 2060 году (Batjes et al., 2016; Squires & Qi., 2017).

Традиционно степные зоны Евразии рассматривались как устойчивые системы с положительным углеродным балансом. Однако новейшие полевые данные свидетельствуют об их высокой уязвимости к нарастающей аридизации климата, процессам деградации почв и антропогенному давлению, такому как масштабная распашка и нерегулируемый перевыпас скота (Vitkovskaya et al., 2026; Eisfelder, 2013). Специфика сухих степей Северного Казахстана кроется в резко континентальном климате с экстремальными температурными перепадами и дефицитом влаги, что порождает высокую про-

странственную мозаичность растительности. Использование стандартных усредненных коэффициентов МГЭИК для расчета национального углеродного баланса в данном регионе регулярно приводит к существенным систематическим погрешностям. Глобальные модели просто не способны корректно учитывать локальные особенности накопления корневой биомассы и специфику разложения мертвого органического вещества в засушливой среде (Lal, 2018; Kerven et al., 2021).

Оценка углеродного цикла в травяных биотопах остается предметом острых научных дискуссий. Огромный научный вклад в исследование продуктивности евразийских степей принадлежит школе А.А. Титляновой. Именно ею был концептуализирован и апробирован метод «минимальных оценок», дающий возможность вычислять продукцию с учетом скорости обновления различных фракций биомассы – от живой зелени и ветоши до подстилки и корней. Было доказано, что если не учитывать процессы отмирания и минерализации растительных остатков в течение вегетации, реальная продукция степей будет недооценена в полтора-два раза (Waheed et al., 2025; Zhu et al., 2022). Эта методика по сей день признается эталоном в полевой синэкологии и послужила фундаментом для нашей работы.

Зарубежные публикации последних лет уделяют пристальное внимание влиянию изменения климата на газообмен степей. Масштабные работы на трансектах через Центральную Азию выявили разнонаправленные тренды секвестрации: если мезофитные степи при достаточном увлажнении реагируют на потепление ростом продуктивности, то сухие степи и полупустынные зоны стремительно теряют углерод из-за температурного стресса и прогрессирующих засух (Buras et al., 2020; Abd-Elrahman et al., 2024). Ряд авторов также отмечает колоссальную пространственно-временную изменчивость нетто-продуктивности (NEP), где главным драйвером выступают атмосферные осадки первой половины лета (Niu et al., 2008; Chapin III et al., 2011). Данный аспект имеет особую значимость для интерпретации наших результатов, поскольку 2025 год отличился аномальным распределением влаги.

Главной методологической трудностью при мониторинге газообмена в степях остается «невидимый пул» – подземная часть растений. По оценкам исследователей, до 70–80% чистой пер-

вичной продукции (NPP) может уходить именно в корневую систему (WANG et al., 2012; Pausch & Kuzyakov, 2018). Это обстоятельство делает методы дистанционного зондирования (индексы NDVI) лишь вспомогательными инструментами, поскольку космические снимки улавливают только надземную зеленую массу, но не способны измерить прирост корней, протекающий асинхронно (Smith, 2014). Следовательно, прямой полевой мониторинг всех фракций органического вещества на протяжении всего сезона является критически важным.

Цель нашего исследования – комплексная инструментальная оценка чистой экосистемной продукции (NEP) на основе детального изучения динамики биомассы в основных степных сообществах Акмолинской области.

Материалы и методы исследования

В данном разделе представлены методы и методологические установки, позволившие раскрыть содержание темы и решить поставленную проблему. Сбор эмпирического материала осуществлялся в течение полного вегетационного сезона 2025 года (с мая по октябрь) на территории Акмолинской области Республики Казахстан (подзона сухих типчаково-ковыльных степей). Для проведения комплексного мониторинга была развернута сеть из 25 репрезентативных стационарных площадок в пяти административных районах с различной степенью аридности климата: Есильском, Егиндыкольском, Атбасарском, Аккольском и Ерейментауском.

Отбор укусов растительности производился ежемесячно. Для нивелирования влияния микромозаичности покрова пробы на каждой площадке срезались в 5-кратной повторности (учетная рамка 20x20 см). В лабораторных условиях надземная масса фракционировалась на зеленую фитомассу (G), ветошь (S) и подстилку (L). Подземная сфера исследовалась методом почвенных монолитов (бурение на глубину до 30 см), корни отмывались и разделялись на живые (R) и мертвые (V). Растительные образцы высушивались при 65 °С до достижения абсолютно сухого веса (Meier & Leuschner, 2008).

Чистая первичная продукция (NPP) рассчитывалась по методу «минимальных оценок» (Zhu et al., 2022). Интенсивность гетеротрофного дыхания (Rh) оценивалась расчетным путем на базе скорости убыли массы подстилки и подземной мортмассы. Для специфических условий су-

хих степей Акмолинской области мы применили научно обоснованные коэффициенты минерализации: $k = 0,003 \text{ сут}^{-1}$ для надземной подстилки и $k = 0,0015 \text{ сут}^{-1}$ для корневой мортмассы (Parton et al., 1993). Применение данных коэффициентов продиктовано их высокой точностью для резко континентального аридного климата, где микробиологическая деструкция органики серьезно лимитируется дефицитом почвенной влаги.

Поскольку в контуре нашей работы не изменялись сторонние потоки углерода (эрозия, вынос органики), итоговый баланс оценивался через показатель чистой экосистемной продукции (NEP) в единицах CO_2 -эквивалента по формуле: $\text{NEP} = (\text{NPP} - \text{Rh}) \times 0,45 \times 3,67$.

Статистическая обработка экспериментального материала проводилась согласно общепринятой методике полевого опыта Б.А. Доспехова. Для каждого исследуемого параметра вычислялась средняя арифметическая величина. Оценка существенности пространственно-временных

различий между районами осуществлялась с применением t-критерия Стьюдента с использованием программного пакета Statistica. Различия признавались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Сезонная динамика продукционных процессов и структура фитомассы. Изучение пространственно-временного распределения растительного вещества выявило выраженную гетерогенность, напрямую зависящую от гидротермического градиента. В мезофитных сообществах пик накопления живой надземной массы пришелся на июнь, что было обусловлено обильными весенними осадками.

Для системного анализа внутрисезонной ритмики в Таблице 1 представлена усредненная динамика фракций по административным районам в разрезе месяцев.

Таблица 1

Помесячная динамика структуры фитомассы по административным районам Акмолинской области (ц/га)

Район / Месяц	Ф	В	П	Р	У	Р+У
Есильский район						
Май	117,2 ± 15,2	42,0 ± 5,1	66,4 ± 8,0	29,3 ± 3,8	46,9 ± 6,3	76,2 ± 9,6
Июнь	122,5 ± 15,9	37,0 ± 5,5	63,4 ± 10,4	31,2 ± 4,4	28,7 ± 5,9	64,0 ± 9,6
Июль	78,9 ± 6,6	43,6 ± 6,5	58,6 ± 9,0	28,4 ± 5,3	39,5 ± 4,3	69,2 ± 9,8
Август	70,0 ± 6,4	43,5 ± 9,6	58,0 ± 6,5	16,8 ± 2,0	43,1 ± 6,3	63,7 ± 9,8
Сентябрь	79,6 ± 7,7	28,0 ± 7,1	51,2 ± 9,8	20,0 ± 4,5	33,6 ± 7,5	55,5 ± 5,6
Октябрь	38,6 ± 8,4	26,3 ± 6,2	43,6 ± 11,4	8,7 ± 1,0	22,6 ± 4,7	33,3 ± 5,3
Атбасарский район						
Май	109,2 ± 9,9	38,2 ± 3,5	60,0 ± 5,6	29,3 ± 2,6	45,7 ± 4,2	75,0 ± 5,1
Июнь	104,5 ± 13,3	28,6 ± 1,8	62,5 ± 5,3	38,8 ± 3,5	26,9 ± 4,8	65,7 ± 4,8
Июль	61,6 ± 12,7	36,6 ± 5,7	57,7 ± 8,4	35,4 ± 5,1	28,7 ± 6,1	64,1 ± 6,8
Август	54,7 ± 11,4	26,4 ± 4,5	64,9 ± 7,0	15,8 ± 4,9	38,6 ± 6,3	54,4 ± 5,6
Сентябрь	58,7 ± 11,2	22,7 ± 3,6	56,5 ± 9,8	18,8 ± 4,7	28,6 ± 5,8	50,6 ± 3,8
Октябрь	27,0 ± 10,6	19,5 ± 6,9	47,2 ± 11,6	12,3 ± 1,7	24,1 ± 5,8	43,3 ± 6,4
Егиндыкольский район						
Май	128,7 ± 4,1	16,9 ± 2,8	15,5 ± 2,2	12,5 ± 5,1	12,6 ± 3,9	25,1 ± 9,0
Июнь	124,9 ± 2,6	17,3 ± 1,7	26,7 ± 0,4	10,7 ± 7,3	18,9 ± 7,3	29,6 ± 14,6
Июль	90,5 ± 2,8	29,7 ± 1,7	21,2 ± 1,5	6,2 ± 3,2	18,1 ± 8,3	24,3 ± 11,5

Продолжение таблицы

Район / Месяц	Ф	В	П	Р	V	R+V
Август	89,7 ± 2,8	18,2 ± 0,4	32,4 ± 0,4	5,3 ± 2,9	14,2 ± 2,5	19,5 ± 5,4
Сентябрь	69,7 ± 4,6	12,5 ± 0,2	19,3 ± 2,7	6,1 ± 4,2	11,2 ± 2,1	17,3 ± 6,3
Октябрь*	55,6 ± 5,2	13,8 ± 1,4	27,8 ± 3,1	7,6 ± 1,1	12,3 ± 2,0	19,9 ± 3,1
Аккольский район						
Май	77,3 ± 0,7	11,6 ± 0,1	35,5 ± 0,5	10,0 ± 0,1	15,5 ± 0,1	25,5 ± 0,3
Июнь	93,0 ± 0,8	9,1 ± 0,1	29,9 ± 0,4	12,4 ± 0,2	12,6 ± 0,2	25,0 ± 0,3
Июль	79,3 ± 0,7	20,1 ± 0,4	32,3 ± 0,4	11,7 ± 0,1	20,2 ± 0,2	31,9 ± 0,3
Август	65,3 ± 0,7	12,5 ± 0,2	34,8 ± 0,5	7,2 ± 0,1	14,6 ± 0,2	21,8 ± 0,3
Сентябрь	38,0 ± 0,5	11,3 ± 0,2	15,5 ± 0,3	9,5 ± 0,2	13,4 ± 0,2	22,9 ± 0,3
Октябрь	25,0 ± 0,4	9,7 ± 0,2	19,0 ± 0,3	4,7 ± 0,1	9,8 ± 0,2	14,5 ± 0,3
Ерейментауский район						
Май	122,5 ± 1,1	6,2 ± 0,5	11,9 ± 1,5	29,0 ± 0,7	24,0 ± 1,7	53,0 ± 1,1
Июнь	117,6 ± 3,1	9,2 ± 0,3	15,1 ± 2,3	23,3 ± 0,4	22,6 ± 2,8	45,9 ± 3,2
Июль	87,3 ± 2,2	10,2 ± 1,2	11,4 ± 3,9	22,6 ± 2,9	26,5 ± 2,4	49,1 ± 5,4
Август	77,5 ± 2,5	7,4 ± 0,5	17,7 ± 0,6	20,9 ± 0,5	23,8 ± 1,2	44,7 ± 2,0
Сентябрь	76,7 ± 1,0	8,3 ± 0,9	19,6 ± 0,8	14,2 ± 1,7	16,3 ± 0,8	30,5 ± 2,6
Октябрь	39,5 ± 5,2	13,7 ± 2,6	15,5 ± 1,5	9,5 ± 0,4	15,9 ± 0,4	25,4 ± 0,4

(Примечание*: а) В Егиндыкольском районе в октябре полноценный учет фракций был возможен только на разрезе №2). б) Ф – зеленая масса, В – ветошь, П – подстилка, Р – живые корни, V – мертвые корни, R+V – суммарная подземная масса. Данные представлены в формате $M \pm t$ (средняя арифметическая ± стандартная ошибка).

Закономерно, что усиление абиотического стресса к концу лета во всех районах приводило к экспоненциальному росту доли вещества, депонируемого в подземной мортмассе. Например, в типичных сухих степях Атбасарского района (разрез 1) при суммарной чистой первичной продукции (NPP) в 13,2 т/га, запас мертвых корней к осеннему периоду достигал 5,3 т/га. Доля органического вещества, перешедшего в детритный пул и законсервированного в виде корневых остатков, составила около 40% от всей годовой первичной продукции ($5,3 / 13,2 \times 100 = 40\%$).

Нетто-экосистемная продукция (NEP) и углеродный баланс

Исходя из сезонной динамики приращений фракций биомассы (Таблица 1), нами была рассчитана итоговая годовая продукция (NPP) и гетеротрофное дыхание (Rh). В Таблице 2 представлены развернутые показатели углеродного

баланса строго по всем 25 исследованным разрезам с выведением средних значений для каждого района.

Данные подтверждают, что все исследованные типы экосистем функционировали как активные «стоки» атмосферного углерода. Эффективность секвестрации варьировала более чем в три раза: мезофитные степи Есильского района (в среднем 4,69 т CO₂/га) продемонстрировали максимальный потенциал поглощения. В сухих степях Атбасарского района положительный баланс был сохранен преимущественно за счет мощного подземного прироста. Сравнение полевых результатов с данными спутниковых моделей вскрывает серьезные методологические расхождения: дистанционное зондирование занижает продуктивность сухих степей на 40–50% из-за невозможности учета скрытого в почве углеродного пула (Wiesmeier et al., 2019, Piao et al., 2020; Soussana et al., 2019).

Таблица 2

Составляющие углеродного баланса по всем мониторинговым разрезам Акмолинской области за 2025 год

Район и № разреза	NPP (Чистая продукция), т/га	Rh (Гетеротрофное дыхание), т/га	NEP (Нетто-баланс), т С/га	NEP (Сток CO ₂), т CO ₂ -экв/га
Есильский район				
Разрез 1	17,8	14,6	+1,44	+5,28
Разрез 2	16,5	13,6	+1,30	+4,79
Разрез 3	13,9	11,4	+1,12	+4,13
Разрез 4	19,2	15,3	+1,75	+6,44
Разрез 5	11,5	9,8	+0,76	+2,81
<i>Среднее по району</i>	<i>15,78</i>	<i>12,94</i>	<i>+1,28</i>	<i>+4,69</i>
Егиндыкольский район				
Разрез 1	15,4	13,1	+1,03	+3,80
Разрез 2	14,8	12,7	+0,94	+3,47
Разрез 3	15,6	13,3	+1,03	+3,80
Разрез 4	14,5	12,5	+0,90	+3,30
Разрез 5	15,2	13,0	+0,99	+3,63
<i>Среднее по району</i>	<i>15,10</i>	<i>12,92</i>	<i>+0,98</i>	<i>+3,60</i>
Атбасарский район				
Разрез 1	13,2	10,8	+1,08	+3,96
Разрез 2	9,0	7,1	+0,85	+3,14
Разрез 3	8,8	7,0	+0,81	+2,97
Разрез 4	8,4	6,8	+0,72	+2,64
Разрез 5	12,6	10,5	+0,94	+3,47
<i>Среднее по району</i>	<i>10,40</i>	<i>8,44</i>	<i>+0,88</i>	<i>+3,24</i>
Ерейментауский район				
Разрез 1	10,1	8,9	+0,54	+1,98
Разрез 2	9,8	8,7	+0,49	+1,82
Разрез 3	10,5	9,2	+0,58	+2,15
Разрез 4	9,5	8,5	+0,45	+1,65
Разрез 5	10,3	9,0	+0,58	+2,15
<i>Среднее по району</i>	<i>10,04</i>	<i>8,86</i>	<i>+0,53</i>	<i>+1,95</i>
Аккольский район				
Разрез 1	7,2	5,6	+0,72	+2,64
Разрез 2	7,5	5,8	+0,76	+2,81
Разрез 3	7,0	5,5	+0,67	+2,48
Разрез 4	7,8	6,2	+0,72	+2,64
Разрез 5	7,4	5,7	+0,76	+2,81
<i>Среднее по району</i>	<i>7,38</i>	<i>5,76</i>	<i>+0,73</i>	<i>+2,68</i>

Статистическая оценка достоверности результатов по Б.А. Доспехову

Для подтверждения научной значимости и объективности полученных полевых данных, материалы по всем 25 разрезам были подвергнуты строгой статистической об-

работке по методике Б.А. Доспехова. В качестве базового анализируемого признака была взята годовая чистая первичная продукция (NPP). В Таблице 3 представлены результаты оценки варибельности и точности полевого опыта.

Таблица 3

Статистические показатели варибельности чистой первичной продукции (NPP) по районам исследований

Район исследования	Данные по 5 разрезам (т/га)	Средняя арифметическая (M), т/га	Ошибка средней (m), ±т/га	Коэффициент вариации (V), %	Точность опыта (P), %
Есильский	17.8; 16.5; 13.9; 19.2; 11.5	15,78	1,38	19,6	8,7
Егиндыкольский	15.4; 14.8; 15.6; 14.5; 15.2	15,10	0,20	3,0	1,3
Атбасарский	13.2; 9.0; 8.8; 8.4; 12.6	10,40	1,03	22,1	9,9
Ерейментауский	10.1; 9.8; 10.5; 9.5; 10.3	10,04	0,18	4,0	1,8
Аккольский	7.2; 7.5; 7.0; 7.8; 7.4	7,38	0,13	4,1	1,8

Статистический анализ демонстрирует высокую надежность полученных результатов. Показатель точности опыта (P) по всем районам не превышает допустимого в полевых экологических исследованиях порога (менее 10%). Коэффициент вариации (V) отражает степень внутренней неоднородности биотопов: наиболее мозаичными и зависимыми от микрорельефа оказались ценозы Атбасарского (V = 22,1%) и Есильского (V = 19,6%) районов. Напротив, ксерофитные сообщества Аккольского и Ерейментауского районов проявили высочайшую пространственную однородность (V около 4%), что является адаптивной реакцией на жесткий абиотический стресс.

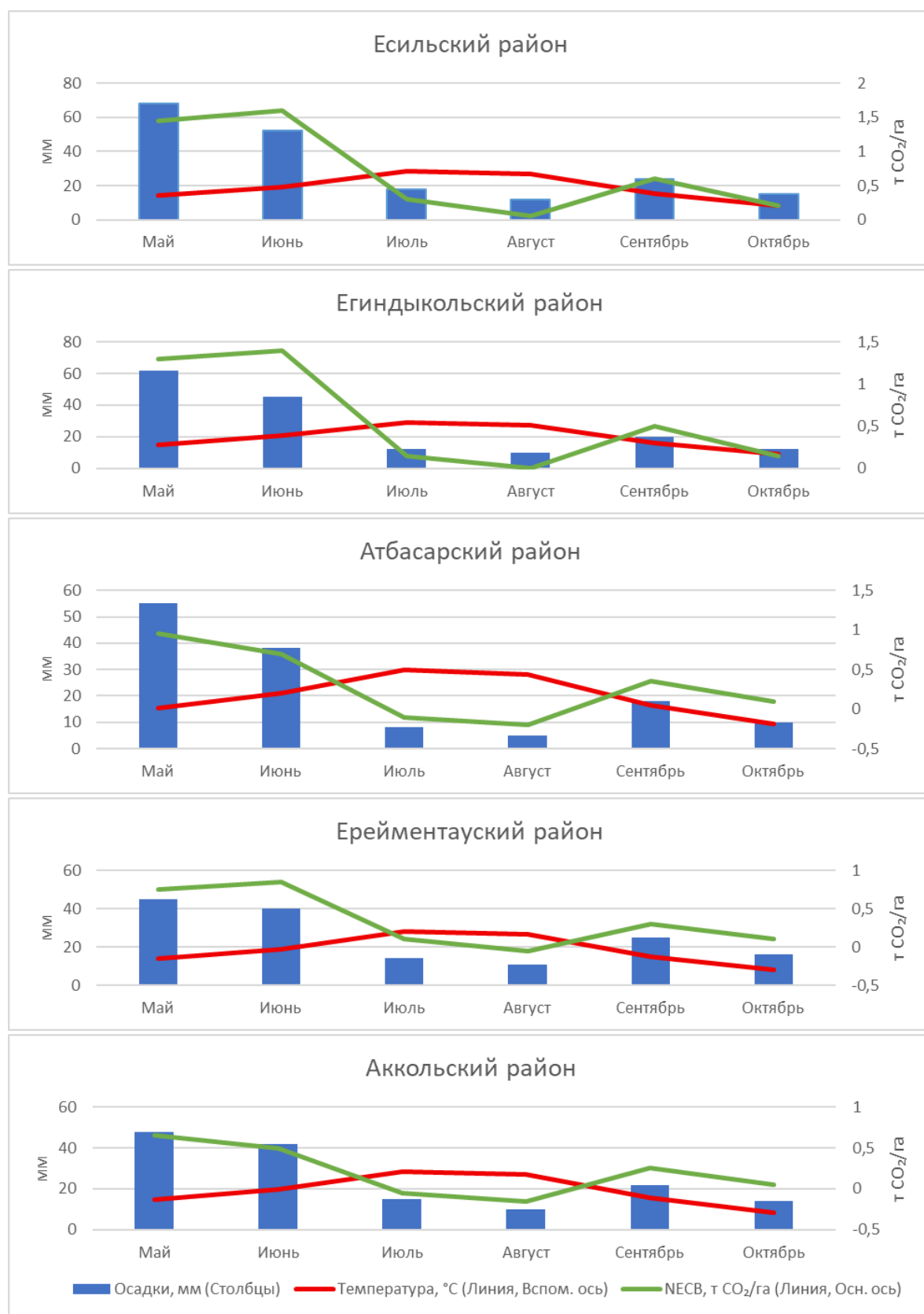
Для наглядной визуализации выявленных пространственно-временных закономерностей нами был построен график сезонной динамики углеродного обмена (Рисунок 1). Представленные графические данные убедительно доказывают, что внутрисезонная ритмика чистой экоси-

стемной продукции (NEP) находится в жесткой зависимости от динамики гидротермического коэффициента. В частности, весенне-раннелетний период (май–июнь) четко выделяется на всех графиках как фаза «углеродного максимума». В этот временной отрезок благодаря аномально высокой влагообеспеченности почвы и оптимальным температурам интенсивность фотосинтетических процессов достигала своих пиковых значений.

Однако во второй половине вегетации (июль–август) на фоне резкого повышения температур и критического дефицита осадков наблюдалась кардинальная смена функционального режима. Растения активировали защитные механизмы для минимизации потерь влаги, что привело к угнетению фотосинтеза. В результате кривая нетто-баланса в засушливых зонах опустилась до околонулевых значений, маркируя переход экосистем из состояния активного стока в режим газообменного равновесия.

Рисунок 1

Сезонная динамика нетто-поглощения углерода (*NEP*) в зависимости от гидротермических условий вегетационного периода 2025 года по районам исследования



Исследование показало, что наибольшие значения NPP в течение вегетационного периода были зафиксированы в Есильских и Егиндыкольских районах, тогда как Атбасарский район продемонстрировал наибольшую месячную изменчивость. Эти результаты свидетельствуют о сильной зависимости углеродного обмена в степных экосистемах от гидрометеорологических факторов и согласуются с данными исследований, подчеркивающих решающую роль водного режима в формировании углеродного баланса засушливых и полузасушливых систем Центральной Азии (Mirzabaev, 2023).

Заключение

Проведенное комплексное исследование динамики углеродного баланса степных экосистем Северного Казахстана в вегетационный сезон 2025 года позволяет сделать следующие обобщающие выводы:

Высокая вариабельность продукционных процессов: степные экосистемы региона характеризуются значительной пространственной неоднородностью. Статистически достоверно ($p < 0,05$) доказано, что чистая первичная продукция (NPP) варьирует в широких пределах: от 7,38 т/га в ксерофитных сообществах до 15,78 т/га в высокопродуктивных мезофитных степях.

Доминирующая роль подземной сферы: подтверждена критическая важность учета корневых систем. Коэффициент подземного накопления закономерно возрастает по мере усиления аридизации, достигая значений 0,82 и выше в наиболее засушливых местообитаниях Атбасарского района, что свидетельствует об эволюционной стратегии растений инвестировать ресурсы в корни для выживания.

Положительный углеродный баланс: в условиях 2025 года все изученные типы степей выступали в роли активного нетто-стока углерода. Показатель чистой экосистемной продукции (NEP) в среднем варьировал от 2,68 до 4,69 т CO₂-экв/га в год.

Исследования подтверждают, что большая часть органического углерода поступает в почву через подземные части растений и их отмершие остатки. Медленное разложение корневых систем стимулирует накопление органического вещества в почве, что подчеркивает ключевую

роль подземного резервуара в долгосрочном связывании углерода в степных биоценозах. Для точной оценки масштабов этого явления необходимы дальнейшие научные исследования с привлечением более широкой сети исследовательских участков.

Практическая и научная ценность данного исследования заключается в выведении количественных показателей сезонных колебаний углеродного баланса степных ландшафтов Акмолинской области. Полученные результаты могут быть использованы в рамках мониторинга углеродного цикла, оценки функций пастбищных экосистем и разработки региональных стратегий адаптации к изменению климата. Рекомендуется корректировать национальные методики учета парниковых газов, так как игнорирование подземной продукции в стандартных моделях ведет к недооценке поглотительного потенциала территории Казахстана. Результаты могут быть использованы для разработки региональных коэффициентов и внедрения проектов «углеродного фермерства».

Источник финансирования

Исследование выполнено в рамках программно-целевого/грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН проекта: No AP23485030 «Геоэкологические аспекты обеспечения безопасности степных экосистем Акмолинской области»). Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории экологии ЕНУ им. Л.Н. Гумилева за помощь в проведении полевых работ.

Вклад авторов

Е.Х. Мендыбаев: Концептуализация, Руководство, Полевые исследования и камеральная обработка, Администрирование проекта, Привлечение финансирования, Редактирование и рецензирование; С.У. Zufarov: Методология, Исследование (сбор полевого материала), Курирование данных, Формальный анализ, Визуализация, Подготовка чернового варианта статьи; Г.А. Гатаулина: Исследование (лабораторная обработка проб), Формальный анализ, Редактирование и рецензирование; М.Ж. Шарипова: Валидация, Ресурсы, Редактирование и рецензирование.

References

- Abd-Elrahman A.H., Fan J., Zhou Y., Liu R. Spatiotemporal variations in net ecosystem productivity in the steppes of Mongolia and Kazakhstan // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 907. – P. 167523.
- Batjes, N. H., Carvalho Ribeiro, E. D., van Oostrum, A. J. M., Leenaars, J. G. B., & Mendes de Jesus, J. S. (2016). Standardised soil profile data for the world (WoSIS, July 2016 snapshot).
- Buras, A., Rammig, A., & Zang, C. S. (2020). Quantifying impacts of the 2018 drought on European ecosystems in comparison to 2003. *Biogeosciences*, 17(6), 1655-1672.
- Chapin III, F. S., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (2011). The ecosystem concept. In *Principles of terrestrial ecosystem ecology* (pp. 3-22). New York, NY: Springer New York.
- Eisfelder, C. (2013). Modelling net primary productivity and above-ground biomass for mapping of spatial biomass distribution in Kazakhstan (Doctoral dissertation, Technische Universität Dresden).
- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications*, 10(2), 423-436.
- Kerven, C., Robinson, S., & Behnke, R. (2021). Pastoralism at scale on the Kazakh rangelands: From clans to workers to ranchers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 590401.
- Lal, R. (2018). Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global change biology*, 24(8), 3285-3301.
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., ... & Jotzo, F. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report: A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Meier, I. C., & Leuschner, C. (2008). Belowground drought response of European beech: fine root biomass and carbon partitioning in 14 mature stands across a precipitation gradient. *Global Change Biology*, 14(9), 2081-2095.
- Mirzabaev, A. (2023). Climate change science and policy in Central Asia: current situation and future perspectives. *Climate Change in Central Asia: Decarbonization, Energy Transition and Climate Policy*, 23-32.
- Niu, S., Wu, M., Han, Y., Xia, J., Li, L., & Wan, S. (2008). Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. *New Phytologist*, 177(1), 209-219.
- Pausch, J., & Kuzyakov, Y. (2018). Carbon input by roots into the soil: quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. *Global change biology*, 24(1), 1-12.
- Parton, W. J., Scurlock, J. M. O., Ojima, D. S., Gilmanov, T. G., Scholes, R. J., Schimel, D. S., ... & Kinyamario, J. I. (1993). Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global biogeochemical cycles*, 7(4), 785-809.
- Piao, S., Wang, X., Park, T., Chen, C., Lian, X. U., He, Y., ... & Myneni, R. B. (2020). Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(1), 14-27.
- Scurlock, J. M. O., & Hall, D. O. (1998). The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biology*, 4(2), 229-233.
- Smith, P. (2014). Do grasslands act as a perpetual sink for carbon?. *Global change biology*, 20(9), 2708-2711.
- Soussana, J. F., Tallec, T., & Blanfort, V. (2010). Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *animal*, 4(3), 334-350.
- Squires, V., & Qi, L. *Sustainable Land Management in Greater Central Asia*. Taylor & Francis.
- Vitkovskaya, I., Bатырбайева, М., Меирбеков, М., & Момбекова, Д. (2026). Methodology for the study of the spatio-temporal dynamics of vegetation cover in the Northern regions of Kazakhstan (2000–2023). *Theoretical and Applied Climatology*, 157(5), 299.
- Waheed, A., Qiao, X., Muhammad, M., Yiremaikebayi, Y., Yingying, X., Xu, H., ... & Wahab, A. (2025). Plant root-mediated carbon sequestration and nutrient cycling in grassland ecosystems under land use and climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 393, 109865.
- WANG, X., LI, Y., ZHAO, X., MAO, W., CUI, D., QU, H., ... & LUO, Y. (2012). Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas. *Acta Ecologica Sinica*, 32(15), 4890-4901.
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., ... & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149-162.
- Zhu, S., Chen, X., Zhang, C., Fang, X., & Cao, L. (2022). Carbon variation of dry grasslands in Central Asia in response to climate controls and grazing appropriation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(21), 32205-32219.

Сведения об авторах:

Мендыбаев Ерболат Хамзинович – кандидат биологических наук, профессор, профессор кафедры управления и инжиниринга в сфере охраны окружающей среды, факультет естественных наук, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва (Астана, Казахстан, e-mail: beskureke@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0193-8781).

Зуфаров Султанбек Уткирович – магистрант 2-курса образовательной программы 7M05206 – «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва (Астана, Казахстан, e-mail: sultanzufarov777@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-0822-121X).

Гатаулина Гульзира Адыльхановна – докторант 1-курса образовательной программы 8D05208 – «Экология и природопользование», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва (Астана, Казахстан, ORCID ID: 0009-0000-2181-8272).

Шарипова Молдир Жакыпжановна – PhD, Международный университет Астана (Астана, Казахстан, ORCID ID: 0000-0002-9467-1483).

Information about the authors:

Mendybayev Yerbolat Khamzinovich – PhD (Biology), Professor, Dept. of Management and Engineering in Environmental Protection, Faculty of Natural Sciences, L.N. Gumilyov ENU (Astana, Kazakhstan, e-mail: beskureke@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0193-8781).

Zufarov Sultanbek Utkirovich – 2nd-year Master’s student, educational program 7M05206 – “Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources”, L.N. Gumilyov ENU (Astana, Kazakhstan, e-mail: sultanzufarov777@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-0822-121X).

Gataulina Gulzira Adylkhanovna – 1st-year Doctoral student, educational program 8D05208 – “Ecology and Nature Management”, L.N. Gumilyov ENU (Astana, Kazakhstan, ORCID ID: 0009-0000-2181-8272).

Sharipova Moldir Zhakypzhanovna – PhD, Associate Professor, Astana International University (Astana, Kazakhstan, ORCID ID: 0000-0002-9467-1483).

Авторлар туралы мәлімет:

Мендыбаев Ерболат Хамзинович – биология ғылымдарының кандидаты, профессор, қоршаған ортаны қорғау саласындағы басқару және инженерия кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана, Қазақстан, e-mail: beskureke@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0193-8781).

Зуфаров Султанбек Уткирович 7M05206 – «Қоршаған ортаны қорғау және табиғат ресурстарын ұтымды пайдалану» білім беру бағдарламасының 2-курс магистранты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана, Қазақстан, e-mail: sultanzufarov777@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-0822-121X).

Гатаулина Гульзира Адильхановна 8D05208 – «Экология және табиғатты пайдалану» білім беру бағдарламасының 1-курс докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана, Қазақстан, ORCID ID: 0009-0000-2181-8272).

Шарипова Молдир Жакыпжановна – PhD, қауымдастырылған профессор Астана халықаралық университеті (Астана, Қазақстан, ORCID ID: 0000-0002-9467-1483).

Поступило 26 января 2026 года

Принято 15 июня 2026 года