

**Н. Х. Сергалиев, А. Т. Жиенгалиев, А. Ж. Турбаев,
С. Х. Абишева**

Западно-Казахстанский аграрно-технический университет
им. Жангир-хана,
г. Уральск, Казахстан

ИЗМЕРЕНИЕ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ ПОЧВЫ С РАЗНОЙ ПАСТБИЩНОЙ НАГРУЗКОЙ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы биогенного цикла углерода, в частности, эмиссия диоксида углерода с темно-каштановых и светло-каштановых почв в степных экосистемах. Представлены данные по влиянию выпаса на эмиссию диоксида углерода из почвы на степных участках аридной территории Западного Казахстана. Определены количественные оценки потоков диоксида углерода с поверхности без учета дыхания растений. Получены данные о влиянии влажности почвы на скорость эмиссии. На эмиссию диоксида углерода могут влиять как биотические, так и антропогенные факторы. В частности, в условиях достаточного увлажнения и оптимальных для мезофильных микроорганизмов температур пастбищная нагрузка оказывает негативное влияние на дыхание почвы. При недостатке влаги не прослеживается статистически значимое снижение эмиссии по сравнению с фоновым участком.

Ключевые слова: диоксид углерода, степные экосистемы, эмиссия, темно-каштановая почва, фитомасса.



Түйіндеме. Мақалада көміртектің биогендік айналымының сұрақтары, соның ішінде далалық экожүйелердегі қара қоңыр және ашық қоңыр топырақтардан көміртек диоксидінің эмиссиясы қаралған. Батыс Қазақстанның аридтік аймағының далалық телімдер топырағынан көміртек диоксидінің эмиссиясына жайылымдардың әсері бойынша мәліметтер көрсетілген. Өсімдіктердің демалуын есепке алмай, жер бетінен көміртек диок-

Финансирование научных исследований осуществлялось за счет гранта Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан по теме № 4662/ГФ4 "Эмиссия и баланс диоксида углерода степных экосистем аридных территорий".

сидінің ағымының сандық бағалауы анықталды. Эмиссияның жылдамдығына топырақ ылғалдығының әсері бойынша мәліметтер алынды. Көміртек диоксидінің эмиссиясына биотикалық және антропогендік факторлар әсер ету мүмкін. Соның ішінде, мезофилді микроағзаларға қолайлы температурада және жеткілікті ылғал жағдайында жайылымдардың жүктемесі топырақтың демалуына жағымсыз әсер көрсетеді. Ылғалдың жетіспеуі жағдайында фондық тәліммен салыстырғанда эмиссияның статистикалық айтарлықтай төмендеуі байқалмайды.

Түйінді сөздер: көміртек диоксиді, далалық экожүйелер, эмиссия, қарақоңыр топырақ, фитосалмақ.



Abstract. The article discusses the issues of biogenic carbon cycle, in particular the emission of carbon dioxide with the dark-brown and light-brown soils in the steppe ecosystems. It has been presented the data on the influence of grazing on the emission of carbon dioxide from the soil of steppe areas of the West Kazakhstan. The quantitative assessments of carbon dioxide flows from the surface without the plants respiration have been determined and obtained the data of influence of soil moisture for the speed of emission. The emission of carbon dioxide can be influenced as biotic factors as anthropogenetic factors. In particular, in the conditions of adequate moisture and optimal temperatures for mesophilic microorganisms grazing load has a negative effect on soil respiration. In the context of lack of moisture, can not be observed a statistically significant reduction of emissions compared to the background portion.

Key words: carbon dioxide, steppe ecosystems, emission, dark-brown soil, phytomass.

Введение. Дыхание почвы – один из основных компонентов цикла углерода наземных экосистем – интегрально характеризует интенсивность как продукционных (дыхание автотрофов), так и деструкционных (дыхание гетеротрофов) процессов [1,2]. Точные оценки интенсивности эмиссии CO_2 с поверхности почвы необходимы для более надежного моделирования глобального цикла углерода и, как следствие, учет пространственных и временных факторов изменчивости почвенной эмиссии CO_2 [3]. В силу своей комплексной природы почвенное дыхание зависит от множества абиотических (температура и влажность почвы и др.), биотических (разнообразие и продуктивность) факторов среды [4].

Основными абиотическими факторами, влияющими на интенсивность почвенного дыхания, являются температура и влаж-

ность почвы [5, 6]. При этом автотрофная и гетеротрофная составляющие эмиссии CO_2 из почвы могут по-разному реагировать на изменение температуры [7]. Динамика интенсивности дыхания почвы обычно хорошо описывается моделями, в которых основными предикторами служат температура и влажность почвы. Однако в соответствии с законом лимитирующего фактора ведущее действие какого-либо фактора может нивелироваться действием лимитирующих условий. Из биотических факторов обычно выделяют продуктивность (биомассу) и разнообразие растительности [8-11].

В Казахстане аридные районы обладают меньшей межгодовой вариабельной продуктивностью, чем полуаридные. В работах [12, 13] установлено, что чистая первичная продукция в Казахстане достигает максимума в июне. Продуктивность зависит от температуры, количества фотосинтетически активной радиации и количества осадков. Весенние температуры и летние осадки являются основными факторами, определяющими продуктивность в августе – октябре. Авторы [14] обнаружили заметное влияние типа землепользования на сезонные колебания выброса CO_2 и температурную чувствительность дыхания почвы в Казахстане.

Выпас оказывает значительное влияние на многие количественные и качественные характеристики степных экосистем. Это, в свою очередь, существенно воздействует на цикл углерода степных биомов, в том числе и на дыхание почвы. Основное действие объясняется выеданием надземной фитомассы, что влечет уменьшение продуктивности, которое приводит и к уменьшению эмиссии CO_2 . Навоз и мочевина увеличивают поступление органического углерода в почву, вызывая стимуляцию почвенной биоты и соответственно усиление дыхания почвы. Вытаптывание увеличивает количество почвенных бактерий и грибов, ускоряя тем самым потери углерода. Следовательно, выедание и вытаптывание – ключевые факторы, ускоряющие цикл углерода при пастбищных нагрузках [15].

Таким образом, несмотря на достаточно большое количество работ, посвященных влиянию пастбищной нагрузки на раз-

личные компоненты функционирования степных экосистем, необходимо отметить, что подавляющая их часть выполнена для различных степных регионов Китая. Работы, оценивающие влияние выпаса на эмиссию углекислого газа из почвы, как одного из ключевых компонентов цикла углерода наземных экосистем, для Казахстана отсутствуют.

Методы исследования. Скорость потока CO_2 с поверхности почвы измеряли по стандартному варианту закрытого динамического камерного метода (Closed dynamic chamber method (CDC)) с использованием полевого респирометра Li-8100A (Li-Cor biosciences, США). Для этого стальные кольца диаметром 10,5 см и высотой 5 см устанавливали в почву на глубину 3 см, предварительно срезав все растения. Затем на кольцо устанавливали измерительную камеру, чтобы воздух циркулировал внутри замкнутой системы, состоящей из камеры, насоса и инфракрасного газоанализатора. При этом растет концентрация CO_2 , что позволяет по коэффициенту наклона рассчитать скорость эмиссии газа из почвы. Время измерения – 1 мин.

Температуру почвы измеряли почвенным термометром, входящим в комплект респирометра, с точностью 0,1 °С, объемную влажность почвы – датчиком ThetaProbe ML2 (Delta-T devices, Великобритания), соединенным с блоком управления респирометра, с точностью 0,1 %. Измерения влажности и температуры проводили в точке измерения дыхания на глубине 5 см.

Работы выполнены 15-16 июля 2015 г. на 4-х участках степи, расположенных на светло- и темно-каштановой нормальных среднемоощных тяжелосуглинистых почвах, на различных почвообразующих породах, испытывающих пастбищную нагрузку, и без нее. На каждом участке заложили по 3 пробные площади площадью 5x5 м² (всего 12 площадей); на каждой пробной площади – 5 микроплощадок 1x1 м². На каждой микроплощадке провели по 5 измерений методом конверта. Всего выполнено 300 измерений (рис. 1).

Для статистической обработки использовали корреляционный анализ, дисперсионный анализ, а также разложение дисперсии на компоненты; множественные сравнения выполнены по критерию Тьюки.

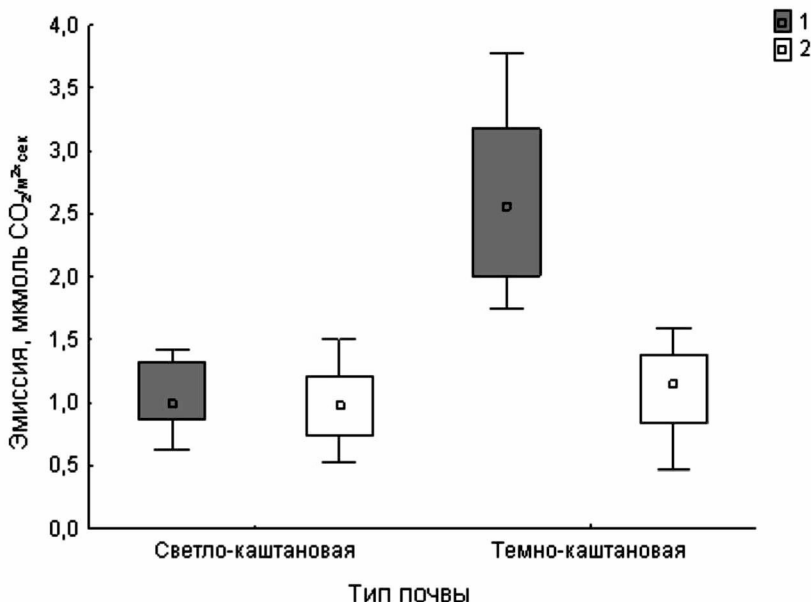


Рис. 1. Эмиссия CO_2 на каштановых почвах с разной пастбищной нагрузкой: 1 – фоновые участки; 2 – пастбищные участки). Показано: медиана, квартили (25-75 %), минимальное/максимальное значение. Учетная единица – микроплощадка, $n=15$

Результаты исследования. Эмиссия CO_2 находилась в диапазоне 0,46-3,77 мкмоль $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{с}$, что соответствует данным Уайли (0-4,73 мкмоль $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{с}$) (Wylie et al., 2004) и данным работы Таката, в которой показано, что дыхание почв в Северном Казахстане достигает 1,92 мкмоль/ $\text{м}^2\cdot\text{с}$. Коэффициент вариации составил 22,8-34,8 %. При этом на фоновых участках он был меньше (22,5 и 24,8 % в пос. Булдуфта и пос. Железнов соответственно), чем на пастбищных (30,0 и 34,8 % в пос. Булдуфта и пос. Железнов соответственно).

Исследуемые участки характеризовались высокой температурой и низкой влажностью почвы (табл. 1).

Таблица 1

**Температура и объемная влажность почвы на участках
во время измерений (среднее ± ошибка).
Учетная единица – микроплощадка, n=15**

| Участок | Температура почвы, °C | Влажность почвы, % |
|--------------------------|-----------------------|--------------------|
| пос. Булдурта (фон) | 41,7±0,5 | 11,9±0,3 |
| пос. Булдурта (пастбище) | 40,3±0,3 | 15,2±0,5 |
| пос. Железнов (фон) | 27,5±0,2 | 24,0±0,3 |
| пос. Железнов (пастбище) | 31,4±0,2 | 27,0±0,5 |

По результатам двухфакторного дисперсионного анализа выявлено значимое влияние факторов "тип почвы" и "пастбищная нагрузка" и их взаимодействия на скорость эмиссии CO₂ и температуру почвы (табл. 2).

Таблица 2

**Результат двухфакторного дисперсионного анализа различий
между участками с разными типами почв и пастбищной нагрузкой
(df₁=1)**

| Фактор | Дыхание почвы | | Температура почвы | | Влажность почвы | |
|---------------------------------|---------------|-------|-------------------|--------|-----------------|--------|
| | F | p | F | p | F | p |
| Тип почвы | 14.81 | 0.005 | 579.73 | <0.001 | 418.07 | <0.001 |
| Пастбищная нагрузка | 14.58 | 0.005 | 6.95 | 0.030 | 29.71 | <0.001 |
| Тип почвы x пастбищная нагрузка | 11.69 | 0.009 | 31.29 | <0.001 | 0.019 | 0.839 |

Примечание: F – критерий Фишера; p – достигнутый уровень значимости; df₁ – число степеней свободы для фактора. Учетная единица – пробная площадь.

Близкие значения F-критерия для дыхания почвы свидетельствуют о равнозначности действующих факторов. Это подтверждается их близкими вкладами в дисперсию: 33,1 и 32,5 % для "типа почвы" и "пастбищной нагрузки" соответственно.

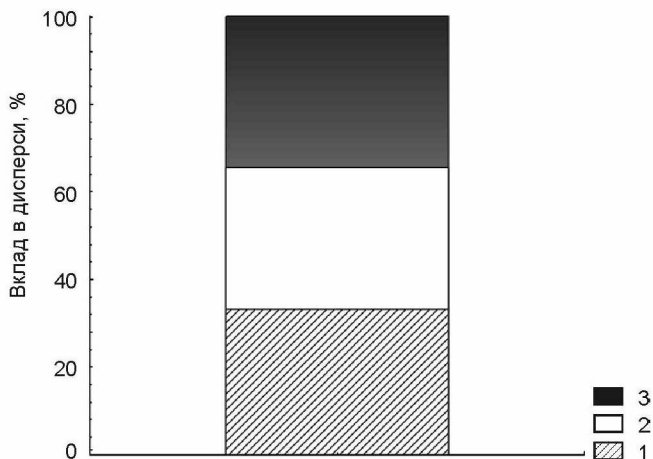


Рис. 2. Компоненты дисперсии (%) почвенного дыхания. Дисперсия, обусловленная различиями между: 1 – типами почвы; 2 – градациями пастбищной нагрузки; 3 – остаточная дисперсия. Учетная единица – пробная площадь

Результаты множественных сравнений показали значимое отличие интенсивности дыхания почвы на контрольном участке в районе пос. Железнов от всех остальных участков ($p < 0,05$); между собой остальные участки значимо не различались.

Множественные сравнения показателей надземной фитомассы не выявили значимых различий на разных участках ($p = 0,33-1,0$). Дисперсионный анализ также не определил значимого влияния типа почвы и наличия пастбищной нагрузки на этот показатель. Однако выявлены значимые положительные корреляции между показателями дыхания почвы и надземной биомассы. Коэффициенты корреляции Спирмена составили 0,46 ($p < 0,05$) и 0,51 ($p < 0,01$) для светло-каштановой (пос.Булдурта) и темно-каштановой почв (пос. Железнов) соответственно.

При рассмотрении зависимости скорости эмиссии CO_2 от величины надземной фитомассы отдельно для каждого участка установлено, что дыхание почвы на контрольных участках меньше зависит от биомассы, чем на пастбищных участках.

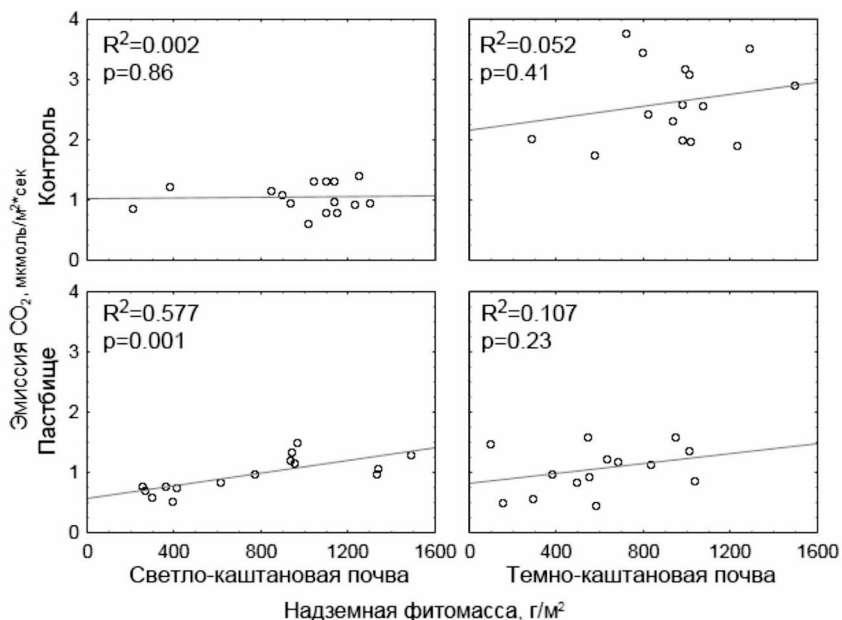


Рис. 3. Зависимость скорости дыхания почвы от надземной фитомассы на участках с разной почвой при разной пастбищной нагрузке. Учетная единица - микроплощадка

Влияние общей, надземной или подземной фитомассы на интенсивность эмиссии CO₂, как правило, оказывается положительным. При этом может обнаруживаться как корреляция с надземной и подземной фитомассой [16-19], так и только с отдельными компонентами общей фитомассы: надземной [20-22] или подземной [23,24].

Обсуждение результатов. Обобщая выше представленные результаты, можно сделать следующее заключение. Основным нарушением почвы при пастбищной нагрузке считается увеличение плотности почвы [25, 26]. Однако в нашем случае на разных типах почвы имеет место разное соотношение действия факторов. На светло-каштановой почве лимитирующим факто-

ром является влажность почвы. Именно поэтому, несмотря на благоприятную температуру почвы, соответствующую мезофильным условиям, и практически не различающиеся показатели подземной и надземной фитомассы, дыхание почвы и на контрольном, и на пастбищном участке оказалось в 2 раза ниже, чем на контрольном участке с темно-каштановой почвой. Это соответствует результатам, полученным для степей и полупустынных лугов Монголии и Китая [27]. Увеличение плотности и уменьшение надземной фитомассы на пастбищном участке в пос. Булдурта уже не могли значительно ухудшить и без того пессимальные условия, поэтому разница между пастбищем и контрольным вариантом на этом типе почвы не проявилась.

Влажность 24-27 об. % на участках с темно-каштановой почвой в районе пос. Железнов уже не является экстремальной и считается обычной даже для более северных регионов [28]. Поэтому скорость дыхания почвы контрольного участка находится в верхней части диапазона, характерного для Северного Казахстана [29]. Пастбищная же нагрузка в виде сочетанного действия увеличения плотности почвы, о котором можно косвенно судить по увеличению объемной влажности (фактор "пастбищная нагрузка" влияет значимо (см. табл. 2), и уменьшению подземной и надземной фитомассы (значимом по критерию Манна-Уитни, $p < 0,05$) привела к значимому уменьшению скорости эмиссии CO_2 из почвы до значений, характерных для полупустынных условий участков в пос. Булдурта.

Выводы. Таким образом, установлено, что в зависимости от условий внешней среды основное влияние могут оказывать как биотические, так и антропогенные факторы. В середине июля на степных участках с темно-каштановой почвой в районе пос. Железнов в условиях достаточного увлажнения и оптимальных для мезофильных микроорганизмов температур пастбищная нагрузка оказывает негативное влияние на дыхание почвы. Это влияние вызвано, очевидно, увеличением плотности почвы и значительным (в 1,42-1,56 раза) уменьшением надземной и подземной фитомассы. На засушливых участках со светло-каштановой почвой около пос. Булдурта основным лимитирующим дыхание по-

чвы фактором была влажность почвы. В таких условиях уплотнение почвы уже не вызывало статистически значимого снижения дыхания почвы, а на фоновом участке пос. Булдурта эмиссия CO₂ была в 2,5 раза ниже, чем на фоновом участке в районе пос. Железнов даже, несмотря на одинаковую общую фитомассу.

Список литературы

1 *Luo Y., Zhou X.* Soil respiration and the environment. Burlington: Acad. Press, 2006. – 316 p.

2 *Kruse J., Simon J., Rennenberg H.* Soil respiration and soil organic matter decomposition in response to climate change // *Developments in Environmental Science.* – 2013. – V. 13. – P. 131-149.

3 *Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолодчиков Д.Г., Гитарский М.Л.* Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ из почв южнотаежного ельника на Валдае // *Лесоведение.* – 2014. – № 4. – P. 56-66.

4 *Ryan M.G., Law B.E.* Interpreting, measuring, and modeling soil respiration // *Biogeochemistry.* – 2005. – V. 73, № 1. – P. 3-27.

5 *Chen Q., Wang Q., Han X., Wan S.* et al. Temporal and spatial variability and controls of soil respiration in a temperate steppe in northern China // *Global Biogeochemical Cycles.* – 2010. – V. 24, № 2. – P. GB2010.

6 *Niinisto S.M., Kellomaki S., Silvola J.* Seasonality in a boreal forest ecosystem affects the use of soil temperature and moisture as predictors of soil CO₂ efflux // *Biogeosciences.* – 2011. – V. 8, № 11. – P. 3169-3186.

7 *Wei W., Weile C., Shaopeng W.* Forest soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components: Global patterns and responses to temperature and precipitation // *Soil Biology and Biochemistry.* – 2010. – V. 42, № 8. – P. 1236-1244.

8 *Raich J., Ewel J., Olivera M.* Soil-CO₂ efflux in simple and diverse ecosystems on a volcanic soil in Costa Rica // *Turrialba.* – 1985. – V. 35. № 1. – P. 33-42.

9 Stocker R., Korner C., Schmid B., Niklaus P.A. et al. A field study of the effects of elevated CO₂ and plant species diversity on ecosystem-level gas exchange in a planted calcareous grassland // *Global Change Biology*. – 1999. – V. 5, № 1. – P. 95-105.

10 Wardle D.A., Bonner K.I., Barker G.M., Yeates G.W. et al. Plant removals in perennial grassland: Vegetation dynamics, decomposers, soil biodiversity, and ecosystem properties // *Ecological Monographs*. – 1999. – V. 69, № 4. – P. 535-568.

11 Craine J.M., Wedin D.A. Determinants of growing season soil CO₂ flux in a Minnesota grassland // *Biogeochemistry*. – 2002. – V. 59, № 3. – P. 303-313.

12 Eisfelder C., Klein I., Huth J., Niklaus M. et al. Spatio-temporal patterns and dynamics of net primary productivity for Kazakhstan // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2014. – № 17.

13 Eisfelder C., Klein I., Niklaus M., Kuenzer C. Net primary productivity in Kazakhstan, its spatio-temporal patterns and relation to meteorological variables // *Journal of Arid Environments*. – 2014b. – V. 103. – P. 17-30.

14 Takata Y., Funakawa S., Akshalov K., Ishida N. et al. Influence of land use on the dynamics of soil organic carbon in northern Kazakhstan: Original article // *Soil Science and Plant Nutrition*. – 2007. – V. 53, № 2. – P. 162-172.

15 Liu N., Kan H.M., Yang G.W., Zhang Y.J. Changes in plant, soil, and microbes in a typical steppe from simulated grazing: Explaining potential change in soil C // *Ecological Monographs*. – 2015. – V. 85, № 2. – P. 269-286.

16 Сарула Чэнь Х., Хоу С., Убуғунов Л.Л. et al. Запасы углерода в типичной степи при различном управлении выпасом // *Почвоведение*. – 2014. – № 11. – P. 1365-1374.

17 Litton C.M., Ryan M.G., Knight D.H., Stahl P.D. Soil-surface carbon dioxide efflux and microbial biomass in relation to tree density 13 years after a stand replacing fire in a lodgepole pine ecosystem // *Global Change Biology*. – 2003. – V. 9, № 5. – P. 680-696.

18 Wang C., Yang J., Zhang Q. Soil respiration in six temperate forests in China // *Global Change Biology*. – 2006. – V. 12, № 11. – P. 2103-2114.

19 Han G., Xing Q., Luo Y., Rafique R. et al. Vegetation Types Alter Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity at the Field Scale in an Estuary Wetland // PLoS ONE. – 2014. – V. 9, № 3. – 11 p.

20 Li L.H., Han X.G., Wang Q.B., Chen Q.S. et al. Correlations between plant biomass and soil respiration in a *Leymus chinensis* community in the Xilin River basin of Inner Mongolia // Acta Botanica Sinica. – 2002. – V. 44, № 5. – P. 593-597.

21 Flanagan L.B., Johnson B.G. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland // Agricultural and Forest Meteorology. – 2005. – V. 130, № 3-4. – P. 237-253.

22 Jiang J., Shi P., Zong N., Fu G. et al. Climatic patterns modulate ecosystem and soil respiration responses to fertilization in an alpine meadow on the Tibetan Plateau, China // Ecological Research, 2014. – P. 1-11.

23 Chang J.G., Liu S.R., Shi Z.M., Chen B.Y. et al. Soil respiration and its components partitioning in the typical forest ecosystems at the transitional area from the northern subtropics to warm temperate, China // Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica. – 2007. – V. 27, № 5. – P. 1791-1802.

24 Fu X., Shao M., Wei X., Wang H. Soil respiration as affected by vegetation types in a semiarid region of China // Soil Science and Plant Nutrition. – 2013. – V. 59, № 5. – P. 715-726.

25 Лебедева Н.В., Ильина Л.П., Пономарёв А.В., Савицкий Р.М. Влияние пастбищной нагрузки на трансформацию сухостепных экосистем в долине Маныча // Аридные экосистемы. – 2011. – V. 17, № 4. – С. 83-94.

26 Русанов А.М. Современный этап восстановления черноземов пастбищных экосистем степной зоны // Почвоведение. – 2015. – № 6. – С. 761-768.

27 Jia B., Zhou G., Wang F., Wang Y. A comparative study on soil respiration between grazing and fenced typical *Leymus chinensis* steppe, Inner Mongolia // Chinese Journal of Applied Ecology. – 2004. – V. 15, № 9. – P. 1611-1615.

28 Сморкалов И.А., Воробейчик Е.Л. Влияние условий крупного промышленного города на почвенное дыхание лесных экосистем // Почвоведение. – 2015. – № 1. – С. 118-126.

29 Wylie B.K., Gilmanov T.G., Johnson D.A., Saliendra N.Z. et al. Intra-seasonal mapping of CO₂ flux in rangelands of northern Kazakhstan at one-kilometer resolution // Environmental Management. – 2004. – V. 33, № SUPPL. 1. – P. S482-S491.

Сергалиев Нурлан Хабибуллович, ректор. кандидат биологических наук, ассоциированный профессор, e-mail: nurlan-sergaliev@yandex.ru

Жиенгалиев Артур Токтамысович, докторант, магистр сельскохозяйственных наук, e-mail: zhiengaliev_a@mail.ru,

Турбаев Акылбек Жыксынгалиевич, соискатель, магистр сельскохозяйственных наук, e-mail: hello_akl1988@mail.ru

Абишева Сауле Хоснеденовна, руководитель испытательного центра НИИ БиП, магистр сельскохозяйственных наук, e-mail: sabisheva@mail.ru