

УДК 631.417:004.942

## ОЦЕНКА ДЫХАНИЯ АГРОСЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Суховеева О. Э.<sup>1</sup>, Курганова И. Н.<sup>2</sup>, Лопес де Гереню В. О.<sup>2</sup>, Сапронов Д. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино,  
Российская Федерация

E-mail: olgasukhoveeva@gmail.com

Представлены результаты оценки дыхания серой лесной почвы агроценоза на основе корреляционно-регрессионного анализа и имитационной биогеохимической модели DNDC на примере неудобряемого зернопарового севооборота ИФХиБПП. Рассчитано, что интенсивность эмиссии CO<sub>2</sub> в среднем составляет 46,3 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup>. Отмечены корреляции дыхания почвы с температурными условиями среды на уровне 0,47–0,60. Получены регрессионные уравнения зависимости суточной эмиссии CO<sub>2</sub> в севообороте и в посевах пшеницы от значений температуры и влажности почвы, характеризующих 31–41 % дисперсии дыхания. Соотношение корневого и микробного дыхания, оцененное DNDC, составляет 33,2 % и 66,8 %. Доказано, что эмиссия CO<sub>2</sub> под покровом культур лучше описывается регрессионной зависимостью, тогда как дыхание парующей почвы корректнее оценивается моделью.

**Ключевые слова:** эмиссия CO<sub>2</sub>, моделирование дыхания почвы, Luvic Phaeozems

### ВВЕДЕНИЕ

Почвенное дыхание – процесс выделения углекислого газа (CO<sub>2</sub>) из почвы, формируемый дыханием корней, микробным разложением растительных остатков и органического вещества почвы [1]. Понятия «дыхание почвы» и «эмиссия почвой углекислого газа» часто отождествляют.

Эмиссия CO<sub>2</sub> из почв характеризуется высокой неоднородностью и в пределах одной экосистемы ее величина в значительной степени определяется температурой и влажностью почвы [2; 3]. CO<sub>2</sub> является одним из основных парниковых газов, поэтому учет его поступления в атмосферу из почв необходим для количественной оценки баланса углерода в системе почва–растения–атмосфера. При этом одним из важнейших источников эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу являются пахотные почвы [4].

Количественная оценка дыхания почв проводится не только экспериментальным путем [5], но и на основе использования математико-статистических методов (корреляционно-регрессионные зависимости) или с помощью имитационных моделей биогеохимического цикла углерода, что позволяет предсказать ожидаемый уровень эмиссии CO<sub>2</sub> в условиях изменяющегося климата и разработать способы его возможного снижения [6].

Цель настоящего исследования состояла в численной оценке эмиссии CO<sub>2</sub> из серой лесной почвы агроценоза с помощью имитационного моделирования и построения регрессионных уравнений на основе данных многолетних полевых наблюдений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Многолетний мониторинг эмиссии  $\text{CO}_2$  из почвы проводили на неудобряемом варианте зернопарового севооборота Опытной-полевой станции ИФХиБПП в окрестностях г. Пушкино Московской области.

Измерения интенсивности выделения  $\text{CO}_2$  проводились с поверхности почвы методом закрытых камер [7] и осуществлялись круглогодично, с ноября 1997 по октябрь 2009 года с периодичностью один раз в 7–10 дней в 3–5-кратной повторности. Анализ газовых проб проводили в день отбора с использованием газовых хроматографов [8]. Данные о температуре воздуха и количестве осадков за весь период наблюдений были предоставлены Станцией комплексного фоновоего мониторинга Государственного Приокско-Тerrasного природного биосферного заповедника (Данки, Московская область).

Почва участка – агросерая лесная (Luvic Phaeozems) среднесуглинистая на покровном суглинке. Характеристики пулов органического вещества исследуемой почвы были взяты из работы Ларионовой А. А. [9].

Для моделирования дыхания почвы использовалась процессно-ориентированная имитационная модель DNDC (DeNitrification-DeComposition) [10], разработанная для оценки параметров биогеохимических циклов азота и углерода в агроэкосистемах.

Регрессионный анализ проводили как для севооборота в целом, так и отдельно для озимой пшеницы и чистого пара. В качестве независимых переменных использовали температуру воздуха, температуру почвы и влажность почвы. Значимость коэффициентов корреляции  $r$  оценивалась при уровне вероятности  $p < 0,05$ .

Для проверки эффективности моделирования использовали коэффициенты Нэша – Сатклиффа [11] и Тейла [12], которые позволяют сопоставить между собой измеренные и рассчитанные величины. Значения первого коэффициента лежат в диапазоне  $(-\infty; 1]$ , и, соответственно, чем он ближе к 1, тем точнее воспроизводится реальный процесс. При оценке с помощью второго коэффициента моделирование тем точнее, чем ближе он к нулю.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно данным многолетних полевых измерений, интенсивность эмиссии  $\text{CO}_2$  в зернопаровом севообороте в среднем составляет  $46,3 \text{ мг С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$  и может как быть близкой к нулевым значениям в зимний период, так и превышать  $250 \text{ мг С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$  – летом.

Наиболее тесные корреляции ( $r = 0,47\text{--}0,60$ ;  $p < 0,0001$ ) были выявлены между интенсивностью выделения  $\text{CO}_2$  и температурой почвы и воздуха (табл. 1), что говорит об их преимущественном влиянии на динамику выделения  $\text{CO}_2$  на серых лесных почвах в посевах пшеницы и в севообороте в целом. Для парующих участков отмечается лишь слабая корреляция между интенсивностью выделения

СО<sub>2</sub> и температурой почвы. Влияние влажности почвы на ее дыхание проявлялось только в годы возделывания пшеницы и отличалось слабыми отрицательными связями. В работе [8] была выявлена аналогичная значимая слабая положительная зависимость (R=0,40) эмиссии СО<sub>2</sub> от температуры почвы и от влажности почвы в летнее время (R = 0,74). Это говорит о том, что в летний период влажность почвы является лимитирующим фактором для эмиссии СО<sub>2</sub>.

Таблица 1.

Коэффициенты корреляции Пирсона ( $r > 0.20$ ,  $p < 0.05$ ) между эмиссией СО<sub>2</sub> и гидротермическими характеристиками почвы (слой 0–5 см)

Переменные	Агроценоз	Пар	Пшеница
Температура воздуха	$r = 0,465$ $p = 0,000$	незначим	$r = 0,540$ $p = 0,000$
Температура почвы	$r = 0,507$ $p = 0,000$	$r = 0,239$ $p = 0,010$	$r = 0,595$ $p = 0,000$
Влажность почвы	не значим	не значим	$r = -0,203$ $p = 0,000$

В настоящем исследовании были получены регрессионные уравнения зависимости суточной эмиссии СО<sub>2</sub> от среднесуточных значений температуры (Тп) и влажности (Вп) почвы в севообороте (R=0.56) и в посевах пшеницы (R=0.64):

- Агроценоз:  $Y = 4,16T_{п} + 1,25B_{п} - 20,23$  ( $R^2=0,313$ )
- Пшеница:  $Y = 4,89T_{п} + 1,44B_{п} - 26,42$  ( $R^2=0,411$ )

Значения коэффициента детерминации позволяют сделать вывод, что эти метеофакторы объясняют 31–41 % дисперсии дыхания агросерых почв. Для почв под паром построенная регрессионная зависимость не значима. Аналогичные эмпирические двухфакторные регрессионные модели (R=0,67) были получены для месячных потоков СО<sub>2</sub> из серых лесных почв агроценоза и среднемесячных температур воздуха, почвы и количества осадков [13].

На рис. 1 представлено сравнение измеренных величин эмиссии СО<sub>2</sub> из почвы агроценоза и рассчитанных на основе полученных регрессионных уравнений. Наилучшим образом регрессионная модель проявляет себя в среднем диапазоне значений дыхания почв: примерно от 0 до 100 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup>. Пики эмиссии СО<sub>2</sub> в летний период регрессионная модель не предсказывает, значительно их занижая.

## ОЦЕНКА ДЫХАНИЯ АГРОСЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

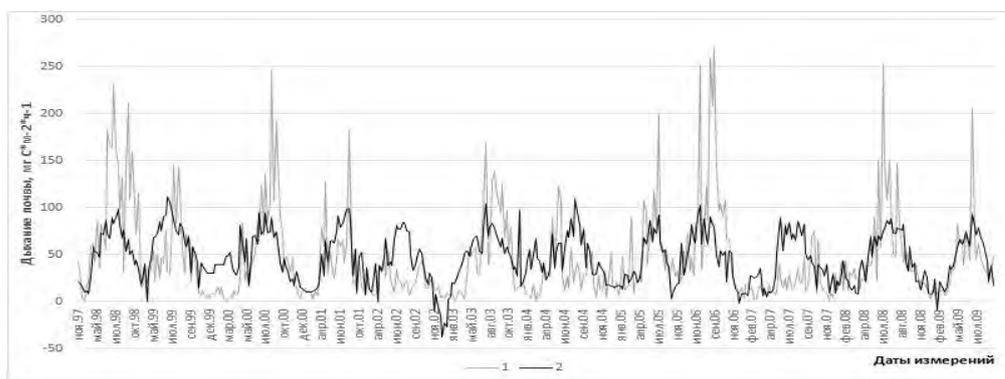


Рис. 1. Соотношение измеренных и рассчитанных на основе регрессионных уравнений значений эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв агроценоза: 1 – измеренные значения, 2 – значения, смоделированные на основе регрессии

Модель DNDC позволяет разделить общий поток  $\text{CO}_2$  из почв на составляющие. Так, на долю гетеротрофного дыхания приходится в среднем 66,8 %, на долю дыхания корней – 33,2 %, что совпадает с оценкой, проведенной на этих же данных [14; 15], согласно которой доля корневого дыхания в агроценозах составляет 34 (медиана) – 38 (средняя) %. Доля дыхания корней озимой пшеницы варьирует от 10 % до 58 % и в среднем оценивается в 33 % [16].

Рассчитанное с помощью DNDC общее дыхание почвы (сумма корневого и микробного дыхания) лежит в том же диапазоне значений, что и измеренные величины (рис. 2). Но в летний сезон модель иногда прогнозирует отсутствие его роста, прежде всего за счет некоторого снижения дыхания корней, с последующим увеличением осенью. Хотя это не противоречит выводам, полученным на данном эксперименте ранее [13; 17], и объясняется, с одной стороны, пересыханием почвы в мае–июле, а с другой – наибольшим поступлением растительных остатков в почву в конце лета после уборки урожая.

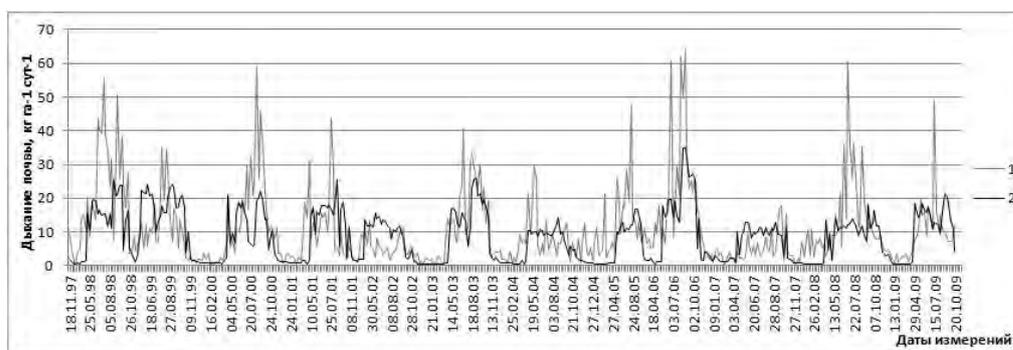


Рис. 2. Соотношение измеренных и смоделированных DNDC значений эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв агроценоза: 1 – измеренные значения, 2 – значения, смоделированные с

помощью DNDC.

Количественные значения коэффициентов эффективности моделирования (табл. 2) – сильные корреляции, положительные критерии Нэша – Сатклиффа и низкие значения коэффициентов Тэйла – позволяют судить о том, что в условиях агросерой почвы уравнения регрессии лучше предсказывают величину эмиссии с участков, занятых посевами пшеницы, тогда как DNDC больше подходит для оценки потока CO<sub>2</sub> из парующей почвы.

Таблица 2  
Оценка эффективности моделирования (соотношение между измеренными и расчетными величинами)

Экосистема	Метод	Коэффициент корреляции	Коэффициент Нэша – Сатклиффа	Коэффициент Тэйла
Агроценоз	регрессия	0,36 (p<0,001)	0,313	0,331
	DNDC	0,58 (p<0,001)	0,290	0,352
Пшеница	регрессия	0,41 (p<0,001)	0,411	0,292
	DNDC	0,55 (p<0,001)	0,197	0,374
Пар	регрессия	0,23 (p=0,010)	0,057	0,434
	DNDC	0,72 (p<0,001)	0,520	0,287

## ВЫВОДЫ

Дыхание почвы в зернопаровом севообороте, а также в посевах озимой пшеницы в значительной степени зависит от температуры и влажности почвы, которые объясняют 31–41 % его дисперсии. Эмиссия CO<sub>2</sub> под паром определяется главным образом температурными условиями. Двухфакторные регрессионные модели позволяют наиболее адекватно оценить суммарное дыхание в посевах культур.

Модель DNDC адекватно отражает ход сезонной динамики дыхания почвы и позволяет отдельно оценить его корневую и микробную составляющие. Она может быть также использована для численной оценки эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы, не занятой растениями. Пики дыхания почвы в летнее время потенциально не могут быть предсказаны ни с помощью регрессионной зависимости, ни через имитационное моделирование.

*Работа выполнялась при поддержке РФФИ (проект 15–04–05156а) и программы Президиума РАН № 51 (ИФХиБПП РАН), а также в рамках темы ФНИ № 01201352499 (0148–2014–0005) «Решение фундаментальных проблем анализа и прогноза состояния климатической системы Земли» и программы Президиума РАН «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» (ИГ РАН).*

## ОЦЕНКА ДЫХАНИЯ АГРОСЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### Список литературы

1. Luo Y., Zhou X. Soil respiration and the environment. Burlington: Academ. Press, 2006. 316 p.
2. Наумов А. В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Томск: Ин-т почвоведения и агрохимии СО РАН, 2004. 37 с.
3. Davidson E. A., Janssens I. A., Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond  $Q_{10}$  // *Global Change Biology*. 2006. № 12. P. 154–164.
4. Ларионова А. А., Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Золотарева Б. Н., Евдокимов И. В., Кудяров В. Н. Эмиссия диоксида углерода из агросерых почв при изменении климата // *Почвоведение*. 2010. № 2. С. 186–195.
5. Ларионова А. А., Иванникова Л. А., Демкина Т. С. Методы определения эмиссии  $CO_2$  из почвы // *Дыхание почвы*. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1993. С. 11–26.
6. Moyano F. E., Manzoni S., Chenu C. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: an exploration of processes and models // *Soil Biology & Biochemistry* 2013. № 59. P. 72–85.
7. Макаров Б. Н. Методы изучения газового режима почв // *Методы стационарного изучения почв*. М.: Наука, 1977. С. 55–87.
8. Лопес де Гереню В. О., Курганова И. Н., Розанова Л. Н., Кудяров В. Н. Годовые потоки диоксида углерода из некоторых почв южно-таежной зоны России // *Почвоведение*. 2001. № 9. С. 1045–1059.
9. Ларионова А. А., Золотарева Б. Н., Евдокимов И. В., Быховец С. С., Кузяков Я. В., Бюггер Ф. Идентификация лабильного и устойчивого пулов органического вещества в агросерой почве // *Почвоведение*. 2011. № 6. С. 685–698.
10. Li C., Frolking S., Frolking T. A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity // *Journal of geophysical research*. 1992. Vol. 97. No. D 9. P. 9759–9776.
11. Nash J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles // *Journal of hydrology*. 1970. Vol. 10. № 3. P. 282–290.
12. Тэйл Г. Экономические прогнозы и принятие решений. М.: Статистика, 1977. 282 с.
13. Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Мякшина Т. Н., Сапронов Д. В., Кудяров В. Н. Эмиссия  $CO_2$  из почв различных экосистем южно-таежной зоны: анализ данных непрерывных 12-летних круглогодичных наблюдений // *Доклады Академии Наук*. 2011. Т. 436. № 6. С. 843–846.
14. Курганова И. Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: Ин-т физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, 2010. 48 с.
15. Kudeyarov V. N., Kurganova I. N. Respiration of Russian soils: database analysis, long-term monitoring, and general estimates // *Eurasian Soil Science*. 2005. Vol. 38. № 9. P. 983–992.
16. Ларионова А. А., Евдокимов И. В., Курганова И. Н., Сапронов Д. В., Кузнецова Л. Г., Лопес Де Гереню В. О. Дыхание корней и его вклад в эмиссию  $CO_2$  из почвы // *Почвоведение*. 2003. № 2. С. 183–194.
17. Сапронов Д. В., Кузяков Я. В. Разделение корневого и микробного дыхания: сравнение трех методов // *Почвоведение*. 2007. № 7. С. 862–872.

### THE EVALUATION OF AGROGREY FOREST SOIL RESPIRATION BY STATISTICAL AND SIMULATION MODELLING APPROACHES

*Sukhoveeva O.E.<sup>1</sup>, Kurganova I.N.<sup>2</sup>, Lopes de Gerenyu O.V.<sup>2</sup>, Saproinov D.V.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Institute of geography RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of physical-chemical and biological problem of soil science RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: olgasukhoveeva@gmail.com*

The results of soil respiration modelling of the arable Luvic Phaeozems under unfertilized crop rotation (cereals–fallow) were presented in this article. The goal of the research was to evaluate the possibilities and quality of the different modelling approaches for indirect evaluation of CO<sub>2</sub> fluxes.

The object of the study was the arable clay grey forest soil in Moscow region, 54°49'N, 37°34'E; measurements were done by closed chamber method from 1997 till 2009. Soil respiration was analyzed for crop rotation, as well as for wheat and fallow. The correlation-regression method and simulation biogeochemical model DNDC (DeNitrification-DeComposition) were used in this research. The quality of modelling was evaluated by using Nash and Thail coefficients, ANOVA.

In Moscow region measured mean of soil CO<sub>2</sub> emission was equal to  $0,038 \pm 0,046$  and  $0,050 \pm 0,048$  g C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> for fallow and winter wheat. Whereas modelled ones were equal to  $0,040 \pm 0,033$  and  $0,035 \pm 0,031$  g C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, respectively. Average CO<sub>2</sub> emission in cereal-fallow rotation is equal to  $0,046 \pm 0,048$  mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

Correlations of soil respiration were calculated; predominantly they are marked for temperature conditions of environment and equal to 0.47-0.60. The regression equations for daily CO<sub>2</sub> emission dependence on soil temperature and moisture in crop rotation and wheat area were obtained; dispersion of the soil respiration is characterized by meteorofactors at 31-41%.

Proportion between root and heterotrophic microbial soil respiration was estimated by the model DNDC; they are equal to 33.2% and 66.8%, respectively. It was proved that the soil respiration under crop cover was described well by regression dependence on soil temperature and humidity. The simulation modelling is more effective for fallow than for wheat: Nash coefficients were higher than 0,50.

It was noted that peaks of soil respiration in summer can't be predicted both regression dependence and simulation model.

**Key words:** CO<sub>2</sub> emission from soil, correlation-regression methods, DNDC model, cereals–fallow rotation, Luvic Phaeozems.

#### References

1. Luo Y., Zhou X. Soil respiration and the environment. Burlington: Academ. Press (Publ.), 2006. 316 p. (in English).
2. Naumov A. V. Dyhanie pochvy: sostavljajushhie, jekologicheskie funkicii, geograficheskie zakonomernosti (Soil respiration: constituents, ecological functions, geographical patterns): Doc. thesis. Tomsk: ISSA SO RAN (Publ.), 2004, 37 p. (in Russian).
3. Davidson E. A., Janssens I. A., Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q<sub>10</sub> // Global Change Biology. 2006, no. 12, pp. 154–164. (in English).
4. Larionova A. A., Kurganova I. N., de Gerenyu V. O. L., Zolotareva B. N., Yevdokimov I. V., Kudryarov V. N. Carbon dioxide emissions from agrogray soils under climate changes. Eurasian Soil Science, 2010, vol. 43, no. 2, pp. 168–176. (in English).

## ОЦЕНКА ДЫХАНИЯ АГРОСЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

---

5. Larionova A. A., Ivannikova L. A., Demkina T. S. Metody opredelenija jemissii CO<sub>2</sub> iz pochvy (Methods for determining CO<sub>2</sub> emission from soil) // Dyhanie pochvy (Soil respiration). Pushhino: ONTI PNC RAN (Publ.), 1993, pp. 11–26. (in Russian).
6. Moyano F. E., Manzoni S., Chenu C. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: an exploration of processes and models // Soil Biology & Biochemistry. 2013, no. 59, pp. 72–85. (in English).
7. Makarov B. N. Metody izuchenija gazovogo rezhima pochv (Methods for studying soils gas regime) // Metody stacionarnogo izuchenija pochv (Methods of stationary study of soils). Moscow: Nauka (Publ.), 1977, pp. 55–87. (in Russian).
8. Lopes de Gerenju V. O., Kurganova I. N., Rozanova L. N., Kudejarov V. N. Godovye potoki dioksida ugleroda iz nekotoryh pochv juzhno-taizhnoj zony Rossii (Annual fluxes of carbon dioxide from some soils of south-taiga zone of Russia). Pochvovedenie, 2001, no. 9, pp. 1045–1059. (in Russian).
9. Larionova A. A., Zolotareva B. N., Yevdokimov I. V., Bykhovets S. S., Kuzyakov Y. V., Buegger F. Identification of labile and stable pools of organic matter in an agrogray soil. Eurasian Soil Science. 2011, vol. 44, no 6, pp. 628–640. (in Russian).
10. Li C., Frolking S., Frolking T. A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity // Journal of geophysical research. 1992, Vol. 97, no. D9, pp. 9759–9776. (in English).
11. Nash J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles // Journal of hydrology. 1970, Vol. 10, no. 3. pp. 282–290. (in English).
12. Thail G. Jekonomicheskie prognozy i prinjatje reshenij (Economical forecasts and decisionmaking). Moscow: Statistika (Publ.), 1977, 282 p. (in Russian).
13. Kurganova I. N., Lopes de Gerenyu V. O., Myakshina T. N., Sapronov D. V., Kudejarov V. N. CO<sub>2</sub> emission from soils of various ecosystems of the Southern Taiga Zone: Data analysis of continuous 12-year monitoring. Doklady Biological Sciences, 2011, vol. 436, no. 1, pp. 56–58. (in Russian).
14. Kurganova I. N. Jemissija i balans dioksida ugleroda v nazemnyh jekosistemah Rossii (Emission and balance of carbon dioxide in terrestrial ecosystems of Russia): Doc. thesis. Moscow: IPCaBPSS (Publ.), 2010. 48 p. (in Russian).
15. Kudejarov V. N., Kurganova I. N. Respiration of Russian soils: database analysis, long-term monitoring, and general estimates // Eurasian Soil Science. 2005, Vol. 38, no. 9, pp. 983–992. (in English).
16. Larionova A. A., Yevdokimov I. V., Kurganova I. N., Sapronov D. V., Lopes de Gerenju V. O., Kuznetsova L. G. Root respiration and its contribution to the CO<sub>2</sub> emission from soil. Eurasian Soil Science, 2003, vol. 36, no. 2, pp. 173–184. (in Russian).
17. Sapronov D. V., Kuzyakov Ya. V. Separation of root and microbial respiration: Comparison of three methods. Eurasian Soil Science, 2007, vol. 40, no. 7, pp. 775–784. (in Russian).