

11. Классификация и диагностика почв СССР. – М.: Колос, 1977. – 223 с.
 12. Трофимов И.Т., Иванов А.Н., Ступина Л.А. Серые лесные почвы Обь-Чумышского междуречья и повышение их плодородия: монография. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2005. – 135 с.
 13. Почвы Алтайского края. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 380 с.

References

1. Karavaeva N.A., Zharikov S.N., Nefedova T.G., i dr. Antropogennaya transformatsiya pochv // Prirodnaya sreda Evropeiskoi chasti SSSR (opyt regional'nogo analiza). – М.: Izd-vo AN SSSR, 1989. – S. 80-153.
 2. Akhtyrtshev B.P. Vliyanie sel'skokhozyaistvennogo osvoeniya na serye lesnye pochvy zapadnoi chasti TsChO // Pochvovedenie i agrokimiya. Vyp. 2. – Voronezh: Izd-vo Voronezh. un-ta, 1970. – S. 31-48.
 3. Chendev Yu.G. Evolyutsiya lesostepnykh pochv Srednerusskoi vozvysheynosti v golotsene. – М.: GEOS, 2008. – 212 s.
 4. Alifanov V.M. Izmenenie serykh lesnykh pochv pri sel'skokhozyaistvennom ispol'zovanii // Pochvovedenie. – 1979. – № 1. – S. 37-47.
 5. Il'ina L.V., Ivanitskaya E.I., Potapova L.V. Izmenenie nekotorykh svoystv serykh lesnykh pochv v protsesse kul'turnogo pochvo-obrazovaniya // Izmenenie pochvennykh

protsessov i faktorov plodorodiya pri zemledel'cheskom ispol'zovanii pochv. – Gor'kii, 1986. – S. 71-73.
 6. Reynolds J.F., Grainger A., Stafford Smith D.M., et. al. Scientific conception for an integrated analysis of desertification // Land Degradation and Development. – 2011. – Vol. 22 (2). – P. 166-183.
 7. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii / pod red. G.V. Dobrovolskogo. – Smolensk: Oikumena, 2004. – 342 s.
 8. Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/1DB.html>.
 9. Agrokhimicheskaya kharakteristika pochv SSSR (raiony Tsentral'noi chernozemnoi polosy i Moldavskii SSR). – М., 1963. – S. 15-26.
 10. Pochvy Moskovskoi oblasti i povysheynie ikh plodorodiya. – М., 1974. – S. 194-210.
 11. Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR. – М.: Kolos, 1977. – 223 s.
 12. Trofimov I.T., Ivanov A.N., Stupina L.A. Serye lesnye pochvy Ob'-Chumyshskogo mezhdurech'ya i povysheynie ikh plodorodiya: monografiya. – Barnaul: Izd-vo АГАУ, 2005. – 135 s.
 13. Pochvy Altaiskogo kraja. – М.: Izd-vo AN SSSR, 1959. – 380 s.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ НК № 14-04-98010/14.



УДК 631.6.02

А.В. Тиньгаев
 A.V. Tingayev

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАПАСОВ ГУМУСА В ПОЧВЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

MATHEMATICAL MODELING OF SOIL HUMUS RESERVES WHEN APPLYING ORGANIC WASTES

Ключевые слова: гумус, запасы гумуса, органические отходы, осадки сточных вод, математическая модель.

Существующие модели прогнозирования запасов гумуса в почве не в достаточной степени отражают процессы формирования и гумусонакопления в системе «органические отходы – почва – растение». Разработана модель, в которой наряду с процессами гумификации внесенного органического вещества учитывается накопление органического вещества, которое на данный момент времени не подверглось гумификации. Это важно, так как позволяет обосновывать периодичность и нормы внесения отходов, не допуская ухудшения свойств почв и загрязнения подземных вод. Адекватность модели проверялась на данных

АФ НИИССВ «Прогресс» по воздействию на лугово-черноземные почвы Рубцовского района внесения осадка сточных вод ежегодной нормой 20 т/га. Осадок сточных вод г. Рубцовска характеризовался содержанием органического вещества 51,7%, азота общего – 0,92, фосфора общего – 0,43, калия общего – 0,84%. Почвы средне-мощные слабогумусированные среднесуглинистые. Прогноз по запасу гумуса в почве Рубцовского района при использовании осадка сточных вод в качестве удобрений первые 4 года показал увеличение гумуса до 7 лет, затем наблюдается его снижение. В течение 4 лет в почве накапливаются негумифицированные отходы и происходит загрязнение почвы. Отклонение фактических данных от прогнозных не более 5%. С целью соблюдения экологических требований был выполнен

прогноз изменения запасов гумуса при периодическом внесении осадка один раз в четыре года нормой 20 т/га. Результаты расчета показали, что внесение осадка сточных вод один раз в четыре года не приведет к накоплению неразложившегося осадка сточных вод в лугово-черноземной почве Рубцовского района.

Keywords: *humus, humus reserves, organic wastes, sewage sludge, mathematical model.*

The existing models that forecast soil humus reserves do not adequately reflect the processes of humus formation and accumulation in the "organic wastes-soil-plant" system. We have developed a model which, along with the humification of previously applied organic matter, takes into account the accumulation of the organic matter which has not undergone humification yet. This seems a very important point, since the model enables substantiating the frequency and waste application rates, preventing the deterioration of soil properties and groundwater contamination. The model adequacy was verified by the data provided by the Altai Branch of the NIISV "Progress" (Research Institute for Agricultural

Use of Wastewater); the data dealt with the effect of sewage sludge application (annual application rate of 20 t ha) on the meadow-chnozems of the Rubtsovsk District of the Altai Region. The sewage sludge of the city of Rubtsovsk was characterized by the following: organic matter content – 51.7%, total nitrogen – 0.92%, total phosphorus – 0.43%, and total potassium – 0.84%. The soils in question were low-humus and medium loamy. The forecast on humus reserve in the soil of the Rubtsovsk District when using sewage sludge as fertilizer during the first 4 years showed increasing humus content up to the 7th year, and then the decrease was forecasted. During 4 years the soil accumulates non-humified wastes and soil contamination occurs. The deviation of the factual data from the forecasted data was less than 5%. In order to comply with environmental requirements, the forecast on humus reserve change was made at a regular sewage sludge application once in four years at a rate of 20 t ha. The calculation shows that the application of sewage sludge once in four years does not cause the accumulation of undecomposed sewage sludge in the meadow chernozem of the Rubtsovsk district.

Тингаев Анатолий Владимирович, д.т.н., доцент, зав. каф. информационных технологий, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-84-05. E-mail: it@asau.ru.

Tingayev Anatoly Vladimirovich, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Information Technologies, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-84-05. E-mail: it@asau.ru.

Введение

В настоящее время на территории России накоплены миллионы кубометров твердых органических отходов и 45,5 км³ сточных вод ежегодно сбрасываются в водные объекты, что вызывает загрязнение природной среды [1]. В Алтайском крае ежегодно формируется свыше 40 тыс. т в сухом веществе осадков сточных вод с очистных сооружений девяти крупнейших городов. Сроки хранения осадков в местах их обезвоживания (на иловых площадках) и складирования составляют от 1 до 30 лет в зависимости от объемов их поступления с очистных сооружений. За год в водные объекты Алтайского края сбрасывается более 191 млн м³ загрязненных сточных вод.

При ограниченных ресурсах удобрений возрастает необходимость более широкого использования различных органических отходов в качестве нетрадиционных удобрений.

К таким удобрениям можно отнести осадки сточных вод (ОСВ), сточные воды с различных сельскохозяйственных предприятий, городские сточные воды и другие органические отходы. Органические отходы обогащают почву элементами питания растений в доступных формах, увеличивают содержание органического вещества почвы, определяющее как эффективное, так и потенциальное ее плодородие.

Цель исследований – изучить воздействие органических отходов на содержание запасов гумуса в почве с использованием математического моделирования.

Объекты, условия и методы исследования

Моделированием запасов гумуса и его динамики в почве занимались многие российские и зарубежные ученые [2-8].

Существующие модели прогнозирования запасов гумуса в почве не в достаточной степени отражают процессы формирования и гумусонакопления в системе «органические отходы – почва – растение». Мною усовершенствована модель А.И. Голованова, в которой, наряду с процессами гумификации внесенного органического вещества, учитывается накопление органического вещества, на данный момент времени не подвергавшегося гумификации. Это важно, так как позволяет обосновывать периодичность и нормы внесения отходов, не допуская ухудшения свойств почв и загрязнения подземных вод.

Первое дифференциальное уравнение модели характеризует изменение запаса гумуса за счет гумификации органических отходов и растительных остатков, а также учитывает потери гумуса. Второе и третье уравнения, соответственно, учитывают изменение содержания в почве органического вещества, органических отходов и растительных остатков, не подвергшихся разложению:

$$\begin{cases} \frac{dG}{dt} = k_{\text{гумо}}G_{\text{орг}} + k_{\text{гумр}}G_{\text{раст}} - G_{\text{физ}} - (V_{\text{мин}} + V_{\text{эр}})G \\ \frac{dG_{\text{орг}}}{dt} = P - (k_{\text{гумо}} + k_{\text{мино}})G_{\text{орг}} \\ \frac{dG_{\text{раст}}}{dt} = R - (k_{\text{гумр}} + k_{\text{минр}})G_{\text{раст}} \end{cases}, \quad (1)$$

где G – запас гумуса в почве, т/га;

$G_{\text{орг}}$ – содержание в почве органического вещества органических удобрений, не подвергшихся разложению, т/га;

$G_{\text{раст}}$ – содержание в почве органического вещества растительных остатков, не подвергшихся разложению, т/га;

$k_{\text{гумо}}$ – изогумусовый коэффициент органических отходов, год⁻¹ [9];

$k_{\text{мино}}$ – коэффициент минерализации органических отходов, год⁻¹ [9];

P – норма внесения органических отходов, т/га за год;

$k_{\text{гумр}}$ – коэффициент гумификации растительных отходов, год⁻¹ [10];

$k_{\text{минр}}$ – коэффициент минерализации растительных отходов, год⁻¹ [10];

R – выход органического вещества растительных остатков, т/га за год;

$V_{\text{мин}}$ – коэффициент минерализации гумуса, за период;

$V_{\text{эр}}$ – коэффициент потери при эрозии, за период;

$G_{\text{физ}}$ – физические потери гумуса за год, т/га [6].

$G_{\text{физ}}$ можно оценить, зная его содержание в почвенном растворе, куда переходит наиболее подвижная часть гумуса в виде фульвокислот [6]:

$$G_{\text{физ}} = 0,01gC_r, \quad \text{т}/(\text{га}\cdot\text{год}), \quad (2)$$

где g – ежегодная промываемость почвы, мм;

C_r – растворимость гумуса, кг/м³.

Коэффициент « V » учитывает разложение или минерализацию гумуса ($V_{\text{мин}}$), а также его потери при эрозии ($V_{\text{эр}}$) [6]:

$$V = V_{\text{мин}} + V_{\text{эр}}, \quad \text{год}^{-1}. \quad (3)$$

Коэффициент минерализации гумуса на сельскохозяйственных угодьях зависит от типа почвы.

Коэффициент $V_{\text{эр}}$ связан с интенсивностью эрозии [6]:

$$V_{\text{эр}} = 0,0001W_{\text{эр}}/(\gamma h), \quad (4)$$

где W – масса удаленной почвы, т/га в год;

γ – плотность почвы, т/м³;

h – слой удаленной почвы, м.

По данным А.И. Голованова, коэффициент $V_{\text{эр}}$ для слабо эродируемых почв равен 0,00125 год⁻¹, для средне эродируемых – 0,00417 год⁻¹, сильно эродируемых – 0,00833 год⁻¹.

Для прогнозирования запасов накопления гумуса в почве при использовании органических отходов в качестве удобрений было разработано программное обеспечение. Адекватность модели проверялась на данных АФ НИИССВ «Прогресс» по воздействию на лугово-черноземные почвы Рубцовского района внесения осадка сточных вод ежегодной нормой 20 т/га. Почвы среднесуглинистые слабогумусированные среднесуглинистые. Плотность сложения пахотного горизонта составляла 1,17 г/см³. Пористость верхних горизонтов более 50%, максимальная гигроскопичность изменяется в пределах 5,2-7,2%, а наименьшая влагоемкость – 19,8-24,2%. Валовое содержание азота, фосфора и калия в пахотном горизонте составляло, соответственно, 0,28; 0,15 и 2,24%. Содержание подвижных форм азота, фосфора и калия – 21,1; 168,4 и 403 мг/кг. Емкость поглощения – 27,8-28,4 мг-экв/100 г. Степень насыщенности основаниями высокая.

Осадок сточных вод г. Рубцовска характеризовался содержанием органического вещества 51,7%, азота общего – 0,92, фосфора общего – 0,43, калия общего – 0,84%. По содержанию тяжелых металлов (хрома, свинца, меди, марганца) подсушенный ОСВ относится к 1-й группе в соответствии с ГОСТ Р17.4.3.07-2001 – использование без ограничений; по содержанию цинка – ко 2-й группе и по содержанию никеля – к 3-й группе [11].

Результаты исследований

Сравнение расчетных запасов гумуса в почве с фактическими результатами агрохимических исследований показало, что коэффициент несходимости Тейла не превышает 25% для каждого из вариантов, что свидетельствует о достаточной адекватности разработанной модели.

Выполненный по модели прогноз запаса гумуса в почве с использованием разработанной информационной технологии при внесении осадка сточных вод ежегодно в течение первых 4 лет показал увеличение гумуса до 7 лет, затем наблюдается его снижение (рис. 1). В течение 4 лет в почве накапливаются негумифицированные отходы и происходит загрязнение почвы.

С целью соблюдения экологических требований был выполнен прогноз изменения запасов гумуса при периодическом внесении осадка один раз в четыре года нормой 20 т/га (рис. 2).

Расчеты показали, что в этом варианте не произойдет накопление негумифицированного осадка сточных вод в почве и её загрязнение.

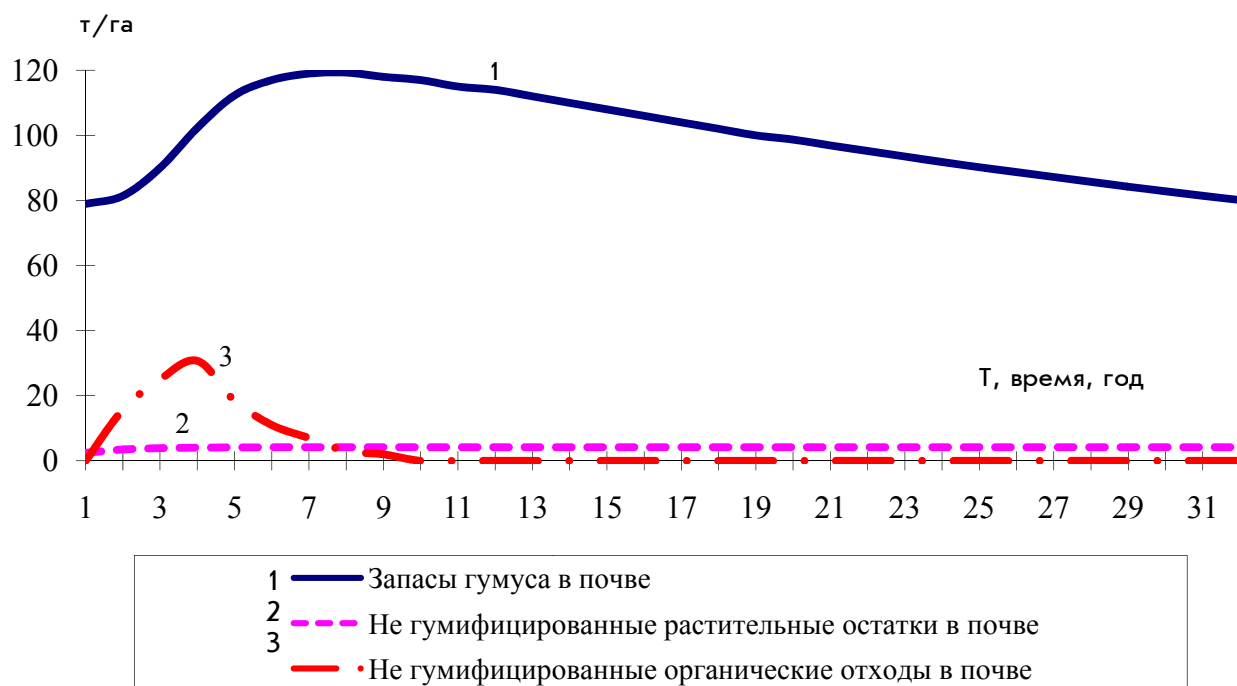


Рис. 1. Прогноз по запасу гумуса в почве Рубцовского района при использовании осадка сточных вод в качестве удобрений первые 4 года

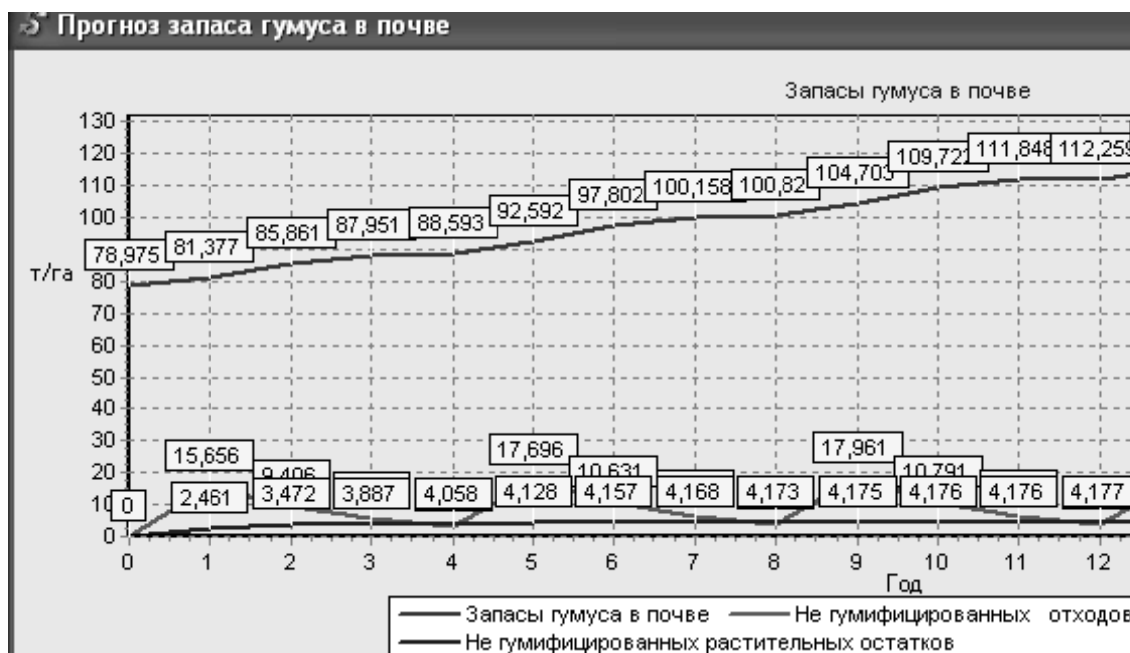


Рис. 2. Прогноз запаса гумуса при использовании в качестве удобрений осадка сточных вод периодичностью раз в четыре года по разработанной информационной технологии

Выводы

Усовершенствована математическая модель прогноза динамики запаса гумуса в почве. Отличительной особенностью модели является то, что наряду с процессами гумификации органических отходов и растительных остатков учитывается их накопление в почве. С помощью данной модели обосновываются норма и периодичность внесения отходов для недопущения ухудшения свойств почв и за-

грязнения подземных вод. Адекватность модели проверена на результатах многолетних исследований по использованию осадка сточных вод в Рубцовском районе, отклонение фактических данных от расчетных не более 5%. Результаты расчета показали, что внесение осадка сточных вод один раз в четыре года не приведет к накоплению неразложившегося осадка сточных вод в лугово-черноземной почве Рубцовского района.

Библиографический список

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды российской федерации в 2012 году» // Министерство природных ресурсов и экологии РФ. – 2014. – Официальный сайт: <http://mnr.gov.ru/upload/iblock/cef/gosdokladza2012god.pdf>.
2. Балаев А.Д., Петренко Л.Р. Концептуальні моделі гумусного стану чорноземів [Математические модели запасов гумуса в целинных черноземах. (Украина)] // Вісник аграрної науки. – 1999. – № 4. – С. 10-14.
3. Manzoni S., Pineiro G., Jackson R.B., et al. Analytical models of soil and litter decomposition: solutions for mass loss and time-dependent decay rates // Soil Biology and Biochemistry. – 2012. – Vol. 50. – P. 66-76.
4. Sierra C.A., Muller M., Trumbore S.E. Models of soil organic matter decomposition: the SoilR package, version 1.0 // Geoscientific Model Development. – 2012. – Vol. 5. – P. 1045-1060. <http://www.geosci-model-dev.net/5/1045/2012/gmd-5-1045-2012.pdf>.
5. Гайдаш Н.И. Алгоритм расчета баланса гумуса в полевом севообороте // Вестник РАСХН. – 2001. – № 4. – С. 86-87.
6. Голованов А.И. Природообустройство. – М.: КолосС, 2007. – 551 с.
7. Малкина-Пых И.Г., Пых Ю.А. POLMOD. HUM – модель динамики гумуса в естественных экосистемах, при сельскохозяйственном использовании почв и глобальных изменениях климата. – М.: Изд-во Рос. АН. Центр междунар. сотрудничества по пробл. окружающей среды ИНЭНКО, 1994. – 84 с.
8. Сухановский Ю.П., Санжарова С.И., Прущик А.В. Моделирование динамики гумуса в эродированном черноземе. – Курск, 2010 // Геосеть ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова: http://www.geo-set.ru/data/files/suhanovskiy_rus.pdf.
9. Лозе Ж., Матье К. Толковый словарь по почвоведению. – М.: Мир, 1998. – 398 с.
10. Васильев В.А. Органические удобрения в интенсивном земледелии. – М.: Колос, 1984. – 303 с.
11. ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. «Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений».

References

1. Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy rossiiskoi federatsii v 2012 godu» // Ministerstvo prirodnikh resursov i ekologii RF. – 2014. – Official'nyi sait: <http://mnr.gov.ru/upload/iblock/cef/gosdokladza2012god.pdf>.
2. Balaev A.D., Petrenko L.R. Konceptual'ni modeli gumusnogo stanu chornozemiv [Matematicheskie modeli zapasov gumusa v tselinnykh chernozemakh. (Ukraina)] // Visnyk agrarnoi' nauky. – 1999. – № 4. – S. 10-14.
3. Manzoni S., Pineiro G., Jackson R.B., et al. Analytical models of soil and litter decomposition: solutions for mass loss and time-dependent decay rates // Soil Biology and Biochemistry. – 2012. – Vol. 50. – P. 66-76.
4. Sierra C.A., Muller M., Trumbore S.E. Models of soil organic matter decomposition: the SoilR package, version 1.0 // Geoscientific Model Development. – 2012. – Vol. 5. – P. 1045-1060. <http://www.geosci-model-dev.net/5/1045/2012/gmd-5-1045-2012.pdf>.
5. Gaidash N.I. Algoritm rascheta balansa gumusa v polevom sevooborote // Vestnik RASKhN. – 2001. – № 4. – S. 86-87.
6. Golovanov A.I. Prirodoobustroistvo. – M.: KolosS, 2007. – 551 s.
7. Malkina-Pykh I.G., Pykh Yu.A. POLMOD. HUM – model' dinamiki gumusa v estestvennykh ekosistemakh, pri sel'skokhozyaistvennom ispol'zovanii pochv i global'nykh izmeneniyakh klimata. – Prepr. – M.: Izd-vo Ros. AN. Tsentri mezhdunar. sotrudnichestva po probl. okruzhayushchei sredy INENKO, 1994. – 84 s.
8. Sukhanovskii Yu.P., Sanzharova S.I., Prushchik A.V. Modelirovanie dinamiki gumusa v erodiruемом chernozeme. – Kursk, 2010. // Geoset' VNIi agrokhimii im. D.N. Pryanishnikova: http://www.geo-set.ru/data/files/suhanovskiy_rus.pdf.
9. Loze Zh., Mat'e K. Tolkovyi slovar' po pochvovedeniyu. – M.: Mir, 1998. – 398 s.
10. Vasil'ev V.A. Organicheskie udobreniya v intensivnom zemledelii. – M.: Kolos, 1984. – 303 s.
11. GOST R 17.4.3.07-2001. «Okhrana prirody. Pochvy. Trebovaniya k svoistvam osadkov stochnykh vod pri ispol'zovanii ikh v kachestve udobrenii».

