

ECOLOGY AND NOOSPHEROLOGY

ISSN 1726-1112 (Print)
ISSN 2310-4309 (Online)
Ecol. Noospher., 29(1), 13–25
doi: 10.15421/031803

Prediction of the different genesis soils nitrogen systems status

V. L. Samokhvalova*, A. O. Khristenko*, L. O. Shedei*,
P. A. Samokhvalova**, O. V. Karatsuba*

*National Scientific Centre «O. N. Sokolovsky Institute for Soil Science
and Agrochemistry», Kharkiv, Ukraine

**V. N. Karazin Kharkov National University, Kharkov, Ukraine

Article info

Received 18.11.2017

Received in revised form
27.11.2017

Accepted 05.12.2017

National Scientific Centre
«O. N. Sokolovsky Institute
for Soil Science and
Agrochemistry»,
Chaikovska str., 4, Kharkiv,
61024, Ukraine.
Tel.: +38-067-687-90-63
E-mail:
v.samokhvalova.com@gmail.com

V. N. Karazin Kharkov
National University,
Svobody square, 4, Kharkov,
61022, Ukraine.

Samokhvalova, V. L., Khristenko, A. O., Shedei, L. O., Samokhvalova, P. A., & Karatsuba, O. V. (2018). Prediction of the different genesis soils nitrogen systems status. Ecology and Noospherology, 29(1), 13–25. doi:10.15421/031803

The method for predicting the levels of the easily hydrolysable nitrogen content in soils of various types of Polesie, Forest-steppe and Steppe climatic zones of Ukraine for the assessment of soil quality due to the background conditions, the influence of technological load (for the application of organo-mineral, organic and mineral fertilizer systems), and risk or influence of technogenic pollution by heavy metals (HM) is grounded. In the elaborated methodical approach is obtained a regression equation by the determination of new correlations of soil energy intensity indices (the calorific value of humus, soil energy reserves in a layer up to 20 cm) in conjunction with the humus state and the use of mathematical and statistical analysis for determining the value of easily hydrolysable nitrogen with the ability to predict the quality of soils of various genesis, with the further extension of the method algorithm for different soil types, climatic zones due to technogenic HM pollution and technological load. The technical result of the elaborated method: by improving the determination of the levels of the easily hydrolysable nitrogen content in soils of different genesis for the evaluation of their quality by identifying the most correlated, diagnostically applicable integral basic indicators of soil properties, which allow the informativeness to make managerial decisions and to predict the quality of soils of different genesis in the content of easily hydrolysable nitrogen, as a biogenic element, due to the background conditions and anthropogenic loads with increased accuracy, speed and informativeness. Elaborated method can find application in the ecological standardization of the content of biogenic macroelements, the normalization of loads (technogenic, technological) on the soil system, agroecology for solving the problems of organic agriculture, bioenergy and energy of soil formation; diagnostics, evaluation, forecasting of the soils nitrogen systems state; the quality of humus and macroelement status of soils on indicators of ecological and energy status; effective ecological management of soils due to the background conditions, as well as for various anthropogenic influences and in scientific research for the investigating of biogeochemistry and biogenic macroelements of soil cover. Separate provisions of the elaborated method became an integral part of the proposals on adaptation to the Nitrate Council Directive 91/676 / EEC of 12.12.1991 on the protection of water from pollution caused by nitrates from agricultural sources, as amended by Regulation (EC) № 1882/2003 *Cross Nitrogen Balances Handbook*. Prospective directions of research in the field of diagnostics, assessment, forecasting of the state of soils nitrogen systems and the normalization of the elemental composition quality, in particular, the content of nutrient nitrogen are determined. In order to overcome the biogenic pollution (excessive accumulation of nitrogen compounds) in the environment (plants, waters), the normalization of nitrogen content in soils of different genesis should include: a) determination of the maximum permissible levels of mobile mineral forms of nitrate nitrogen by the elaboration of environmental requirements for nitrates contamination with plant products; b) normalization of the content of labile easily hydrolysable nitrogen and / or a dose of nitrogen fertilizers in conditions of sufficient and excessive moistening, considering the rapid processes of transformation of nitrogen compounds in soils; c) normalization of the soil nitrogen mineral compounds content in conditions of insufficient moistening and slowing down the processes of circulation of nitrogen compounds of soils. Distinctive features and advantages of the proposed elaboration in comparison with known methods and approaches are: 1) the express obtain of the accurate projected levels of easily hydrolysable nitrogen as a nutrient in the soil with the improving the accuracy of soil diagnosis by the use of the basic integrated indicators;

2) providing opportunity for greater efficiency of forecasting data on the functioning of the nitrogen systems of different genesis soils, quality, environmental and energy state of soils due to the background conditions and anthropogenic loads while minimizing the cost of material resources; 3) empowerment of the user in determination of the easily hydrolysable nitrogen content in the soil without extensive chemical analysis by the choice of regression equations, based on the use of baseline soil properties of a particular type and subtype according to the available information; 4) versatility of the method by the suitability of detected dependencies of the proposed method for all soil types and subtypes, climatic zones and contaminants.

Keywords: soil; ecological condition of soils; macroelements; labile easily hydrolysable nitrogen; energy intensity; calorific value of humus; energy reserves in the layer up to 20 cm; technogenic pollution; technological load; method; forecasting

Прогнозування стану азотних систем ґрунтів різного генезису

В. Л. Самохвалова*, А.О. Христенко*, Л. О. Шедей*,
П. А. Самохвалова**, О. В. Карацюба*

**Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О. Н. Соколовського», Харків, Україна*

***Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
Харків, Україна*

Обґрунтовано спосіб прогнозування рівнів вмісту лабільного легкогідролізованого біогенного макроелементу азоту в ґрунтах різних типів природно-кліматичних зон Полісся, Лісостепу і Степу України для оцінювання якості ґрунтів за фонових умов, впливу технологічного навантаження (за застосування органо-мінеральної, органічної та мінеральної систем удобрення ґрунтів) та ризику і наявності техногенного забруднення важкими металами (ВМ). У розробленому методичному підході встановленням нових взаємозв'язків показників енергоємності ґрунтів (теплотворна здатність гумусу, запаси енергії ґрунту в шарі до 20 см) у спряженні з гумусовим станом та використанням математико-статистичного аналізу отримують регресійне рівняння визначення величини легкогідролізованого азоту з можливістю прогнозування якості ґрунтів різного генезису, з поширенням алгоритму способу на ґрунти різних типів певної природно-кліматичної зони за умов техногенного забруднення і технологічного навантаження. Технічний результат розробленого способу: за рахунок удосконалення визначення рівнів вмісту легкогідролізованого азоту у ґрунтах різного генезису для оцінювання їх якості шляхом визначення найбільш кореляційно пов'язаних, діагностично придатних інтегральних базових показників ґрунтових властивостей, які дозволять своєчасно, з підвищеною точністю, експресністю та інформативністю приймати управлінські рішення та прогнозувати якість ґрунтів різного генезису за вмістом легкогідролізованого азоту як біогенного елементу, за фонових умов та антропогенних навантажень. Спосіб може знайти застосування в екологічному нормуванні вмісту біогенних макроелементів, нормуванні навантажень (техногенних, технологічних) на ґрунтову систему, агроєкології за вирішення питань органічного землеробства, біоенергетики і енергетики ґрунтоутворення; діагностики, оцінювання, прогнозування стану азотних систем ґрунтів; якості гумусу та макроелементного статусу ґрунтів за показниками еколого-енергетичного стану; ефективного екологічного менеджменту ґрунтів як за фонових умов, так і за різних антропогенних впливів та в науково-дослідній практиці за дослідження біогеохімії та біогенних макроелементів ґрунтового покриву. Окремі положення розробленого способу стали складовою пропозицій з адаптації до Нітратної Директиви Ради ЄС 91/676/ЄЕС від 12.12.1991 р. про захист вод від забруднення, спричиненого нітратами з сільськогосподарських джерел, із змінами і доповненнями, внесеними Регламентом ЄС №1882/2003 *Cross Nitrogen Balances Handbook*. Визначено перспективні напрями з досліджень за тематикою діагностування, оцінювання, прогнозування стану азотних систем ґрунтів та нормування якості за елементним складом, зокрема вмістом біогенного азоту.

Ключові слова: ґрунт; екологічний стан; мікроелементи; лабільний легкогідролізований азот; енергоємність; теплотворна здатність гумусу; запаси енергії в шарі до 20 см; техногенне забруднення; технологічне навантаження; спосіб, прогнозування

Вступ

Відомо, що ґрунтовий покрив містить на один-півтора порядки більше азоту в порівнянні з біомасою суші (Kovda, 1985). Азот ґрунту представлений такими формами: 1) газоподібний азот у ґрунтового повітрі та ґрунтового розчині; 2) амоній, фіксований у глинистих мінералах; 3) азот органічних речовин; 4) мінеральний азот у ґрунтового розчині та в обмінному стані; 5) азот рослинних решток (Orlov, 2005).

Молекули азоту є стійкими газовими сполуками, що перетворюються в аміак, окисли азоту, азотисту та азотну кислоти, солі за енергетичних витрат. Мінеральні сполуки азоту ґрунту, що вкрай необхідні для рослин, є термодинамічно нестійкими. Амонійний азот здатний обмінно та необмінно сорбуватися ґрунтом, нітратний азот ґрунту – не сорбується ґрунтами, швидко мігрує до суміжних з ґрунтом середовищ, що призводить до втрат

азоту внаслідок міграції у профілі ґрунту в процесах ерозії (з поверхневим стоком, через дефляцію) та вилугування в нижні горизонти. З продуктами ерозії виносяться до 960 тис. т азоту, що значно більше, ніж вноситься з добривами. В Україні площа сільськогосподарських угідь, які зазнають згубного впливу вітрової ерозії, становить 6 млн. га, у роки з катастрофічними пиловими бурями – 20 млн. га (проект Загальнодержавної програми використання та охорони земель). Також шляхами втрат азоту ґрунту є денітрифікація та втрати в газоподібному стані внаслідок випаровування, споживання рослинами, закріплення кристалічною граткою мінералів і в плазмі мікроорганізмів ґрунту. Одночасно збільшуються екологічні ризики забруднення довкілля сполуками азоту внаслідок недосконалого управління балансом азоту та використання енергії в системі ґрунт – добриво – рослина – вода (Smil, 1985; Schepers, Raun, 2008), біогенного (зокрема, евтрофікація та зміна біоценозів) та біотичного

(витіснення аборигенних видів) забруднення довкілля (Mockler, Deakin, Archbold, 2016) за використання відходів промисловості, тваринництва, застосування їх стоків і рідкого гною в підвищених дозах як добрива; нераціонального застосування органічних і мінеральних добрив.

У сучасних умовах в агросфері країни спостерігається недотримання науково обгрунтованих систем удобрення та заходів з хімічної і водної меліорації ґрунтів, заміна традиційних систем землеробства інтенсивними спеціалізованими технологіями; обмеження площ, зайнятих травами; відсутність захисних зон навколо полів, що сприяє посиленню мінералізації органічної речовини ґрунту, трансформації сполук азоту, призводить до інтенсифікації процесів вимивання нітратів у підґрунтові води і посилення міграції азоту з поверхневим стоком. Окрім того, введення в сівозміни чистих парів також сприяє інтенсивному накопиченню нітратів у ґрунті, які можуть втрачатися при випаданні опадів.

В країнах ЄС застосовується від 150 кг/га діючої речовини азотних добрив (Франція) до 500 кг/га (Голландія). В Україні найбільша кількість внесеного у ґрунт азоту в 1986–1990 рр. становила 105 кг/га (65 кг/га з мінеральними туками і 40 кг/га – з органічними добривами); в сучасних умовах – близько 65 кг/га азоту. Однак виробництво і застосування азотних добрив у країні постійно зростає, що викликає необхідність уже зараз вживати термінові заходи щодо запобігання забруднення довкілля нітратами в майбутньому. До того ж живлення рослин незбалансоване (частка азотних добрив становить близько 65 %).

Різноманітність ґрунтово-кліматичних умов України (умови перезволоження Полісся з ґрунтами легкого гранулометричного складу, недостатнього і нестійкого зволоження Степу з ґрунтами важкого гранулометричного складу) впливає на кругообіг сполук азоту. Гідроморфні ґрунти Полісся та чорноземи Лісостепу і Степу України характеризуються високим природним умістом органічної речовини. Тому за її мінералізації роль природного ґрунтового азоту в забрудненні вод нітратами і в накопиченні його рослинами більш значна, ніж в країнах ЄС.

Надходження азоту до ґрунтів проходить за рахунок несимбіотичної та симбіотичної фіксації (трансформація елементарного азоту в органічні сполуки); надходження з опадами; внесення добрив. Процеси біологічної фіксації та міграції визначають рівні надходження азоту в біосферу (Mishustin, 1979). Проте землеробство та промисловість хімічних туків значно змінили природний біогеохімічний цикл азоту, спрямувавши його не до атмосфери, а до ґрунту (Kovda, 1985).

Формами органічних сполук азоту ґрунту є гумусові кислоти (у складі гумінових кислот до 15–20 % від вмісту загального азоту; у складі фульвокислот – до 6–14 %), амінокислоти, білки, ферменти тощо (Yurko, 1979). Органічні сполуки азоту ґрунту розділяють на легко-, важко- та негідролізовані фракції. Безпосереднім резервом доступного для рослин азоту є лабільний легкогідролізований азот, уміст якого в чорноземних ґрунтах України складає до 10 % від вмісту загального азоту та з глибиною вміст лабільного легкогідролізованого азоту в ґрунтах зменшується (Nosko, 2013).

Для характеристики азотного режиму ґрунтів важливо враховувати різну рухомість азотовмісних сполук у ґрунтах України. Внаслідок різниці в інтенсивності процесів мінералізації, гумусоутворення, величин запасів і типів гумусу ґрунтів найбільш рухомі азотовмісні сполуки у ґрунтах Полісся (крім торф'яних ґрунтів), менш рухомі – в ґрунтах Степу та найменш рухомі – у ґрунтах Лісостепу (Nosko, 2013).

Внаслідок важливої ролі азоту у процесах новоутворення гумусових речовин ґрунту, що тісно пов'язані з трансформацією речовин та енергії (Orlov, 1990), доцільно використовувати структурні взаємозв'язки

показників азотного, гумусового та енергетичного стану для прогнозування екологічного стану ґрунтів за елементним (макро- та мікроелементним) статусом (Samokhvalova, Skrylnyk et al., 2016; Pat. na vynakhid 115014 UA, 2017; Pat. na korysnu model 120082 UA, 2017).

Для вирішення практичних задач із оптимізації екологічного стану ґрунтів, проведення їх комплексної оцінки та визначення напрямів еволюції доведено перспективність енергетичного підходу, що включає енергетичне оцінювання родючості ґрунтів за оцінювання властивостей, процесів та режимів. Базовими складовими енергетичного оцінювання ґрунтів є оцінювання мінеральної частини ґрунтів, мінералогічного їх складу, гумусового стану та мікробіологічної активності, ґрунтово-поглинального комплексу, водно-фізичних властивостей, теплових властивостей та впливу на генезис і родючість ґрунтів геофізичних полів Землі (Savich et al, 2007). Таким чином, енергетичне оцінювання ґрунтів різного генезису потребує комплексного урахування всіх «носіїв» енергії. Однак методичні труднощі визначення енергетичних характеристик ґрунту значно обмежують їх використання як інструментів оцінювання та прогнозування екологічного стану ґрунтів за екологічними та продукційними функціями.

Відсутність точного прогнозування екологічного стану ґрунтів на рівні типу і підтипу актуалізує необхідність подальшого пошуку та залучення нових додаткових інтегральних показників ґрунтових властивостей та, насамперед, енергетичних показників і продуктивної функції (родючості) ґрунтів, зокрема для прогнозування стану азотних систем ґрунтів різного генезису за встановлення рівнів вмісту різних форм біогенного макроелементу. Отже, необхідним є проведення додаткових поглиблених інформаційно-аналітичних досліджень особливостей біогеохімії ґрунтового покриву певних регіонів та систематизація даних для визначення діагностичних критеріїв оцінювання якості ґрунту за вмістом азоту. До того ж на сьогодні не існує універсального методу визначення фракційного складу азоту для всіх типів ґрунтів за використання єдиного екстрагенту, що значно ускладнює узагальнення даних щодо статусу біогенного елементу азоту в ґрунтах та знижує їх точність.

Мета дослідження – розробити спосіб прогнозування стану азотних систем ґрунтів різного генезису для оцінювання їх якості за рахунок встановлення нових закономірних зв'язків інтегральних базових показників енергетичного у спрощенні з гумусовим станом та азотного статусу ґрунтів, визначення найбільш кореляційно пов'язаних, діагностично придатних з них, що підвищують інформативність, точність і експресність прогнозування якості ґрунтів за вмістом азоту, як біогенного елементу, за фонових умов та антропогенних навантажень з виявленням відмінностей екологічного стану ґрунтів для прогнозу і нормування їх якості.

Розробку способу спрямовано на таке: 1) експресність отримання точних прогнозованих рівнів вмісту, зокрема, легкогідролізованого азоту як біогенного елементу у ґрунті з підвищенням точності ґрунтової діагностики за рахунок використання базових інтегральних показників; 2) забезпечення можливості отримання більшої результативності прогнозованих даних щодо функціонування азотних систем ґрунтів різного генезису, якості та еколого-енергетичного стану ґрунтів, за фонових умов та антропогенних навантажень з одночасною мінімізацією витрат матеріальних ресурсів; 3) розширення можливостей користувача у визначенні вмісту легкогідролізованого азоту у ґрунті без тривалих хіміко-аналітичних досліджень за рахунок вибору регресійних рівнянь, отриманих на основі використання базових показників фізичних та хімічних властивостей ґрунтів певного типу та підтипу, згідно з наявною інформацією; 4) універсальність способу завдяки придатності встановлених залежностей запропонованого способу для

ґрунтів всіх типів і підтипів та природно-кліматичних зон і забруднювачів.

Матеріали та методи досліджень

Розроблення способу включало:

1) проведення патентного пошуку (DSTU 3574, DSTU 3575) за опрацювання патентної документації, формулювання робочої гіпотези (ідеї). Об'єкти патентного пошуку – об'єкти авторського права, які запатентовано в Україні та країнах пострадянського простору, ЄС в площині поставленої мети. Предмет пошуку – спосіб у цілому; окремі операції (етапи) способу, що є самостійним патентоспроможним об'єктом; способи їх одержання і галузь застосування; обладнання, що використовують при здійсненні способу; методичні підходи щодо прогнозування елементного статусу ґрунтів різних типів, у тому числі і за техногенного забруднення ВМ і технологічного навантаження, за використання методів математичного моделювання для прогнозу стану ґрунтів як компонентів довкілля; методи екстраполяції та експертних оцінок. Методи досліджень – методи теоретичного аналізу, системний підхід;

2) польовий етап – ґрунтово-геохімічні дослідження, у тому числі за умов технологічного навантаження на ґрунти різних типів та за умов сталого впливу джерел атмтехногенних емісій забруднення неорганічної природи Харківської області і промислових об'єктів Донецької області та проведення серії стаціонарних мікропольових дослідів. Об'єкти дослідження – ґрунти Полісся, Лісостепової і Степової природно-кліматичних зон України за впливу забруднення ВМ та за його відсутності. Методи досліджень – універсальні загальнонаукові методи, екосистемний та ландшафтно-геохімічні підходи.

Дослідження закономірних зв'язків макроелементного, гумусового і енергетичного стану ґрунтів різного генезису та відповідно показників ґрунтових властивостей було проведено із відбором зразків з орного (до 20 см) шару.

Ґрунтово-геохімічні дослідження щодо техногенного навантаження ВМ на ґрунт проводили за умов сталого та періодичного впливу джерел поліелементного забруднення Зміївської ТЕС ПАТ «Центренерго» НАК «Енергетична компанія України» Харківської області, ВАТ «Укрцинка» і ВАТ «Авдіївський коксохімічний завод» Донецької області. Також для підтвердження ідеї за розробки нового технічного рішення було використано цифрові матеріали щодо вмісту ВМ у ґрунтах з Екологічних атласів Харківської (2005), Донецької (2007) областей.

Польові стаціонарні дослідження щодо технологічного навантаження проводили в Харківській області з вивчення ефективності впливу органо-мінеральної, органічної та мінеральної систем удобрення у встановленій ефективній кількості співвідношення комбінації ґрунтополіпшувачів із відбором ґрунтових зразків та встановленням закономірностей змін вмісту сполук азоту ґрунту на чорноземі типовому важкосуглинковому. Досліди закладено в 1969 р. на Слобожанському дослідному полі ННЦ ІГА Харківського району Харківської області. Протягом 1969–1983 рр. триразовим внесенням високих доз мінеральних добрив (200, 400 і 600 кг/га д.р.) було створено чотири рівні (природний, середній, підвищений, високий) азотних, фосфорних, калійних і азотно-фосфорно-калійних агрохімічних фонів. На створених фонах було закладено дрібноділянкові досліді, повторність їх варіантів – триразова.

Також було використано створену інформаційну базу даних відділу агрохімії ННЦ ІГА, що містить дані літературних джерел, які характеризують родючість основних типів ґрунтів України відповідно до природно-кліматичних зон Полісся, Лісостепу і Степу.

Енергоємність чорноземних ґрунтів різного гранулометричного складу за впливу систем удобрення

визначено в довгострокових польових дослідженнях у Київській (Миронівська ДС), Харківській (ДП Граково), Полтавській (Полтавська ДС) та Луганській (Луганська ДС) областях. Застосовували мінеральну, органічну та органо-мінеральну системи удобрення, які було збалансовано за внесенням основних елементів живлення, а внесення органічних і мінеральних добрив оптимальними дозами проводили за використання чинних методичних рекомендацій (Vlasiuk, Dmytrenko, 1962), відповідно до типу ґрунту і природно-кліматичних умов певної зони (Dobryva ta yikh vykorystannia, 2010);

3) аналітичний етап – у зразках ґрунтів різних типів (дерново-підзолисті, світло-сірі, сірі, темно-сірі; чорноземи опідзолені, типові, звичайні та південні, каштанові ґрунти тощо) за лабораторно-аналітичних досліджень згідно з чинними ДСТУ та методичною базою визначили: а) загальний вміст органічної речовини – за методом Тюріна (DSTU 4289); б) груповий (за модифікованим методом М. М. Конової та Н. П. Бельчикової згідно з DSTU 7855) та фракційний склад гумусу ґрунту (модифікований метод В. В. Пономарьової та Т. А. Плотнікової згідно з DSTU 7828); в) здійснили препаративне виділення гумусових речовин ґрунту (DSTU 7606); г) питому енергоємність ґрунтів і препаратів ГК – за допомогою калориметричної установки *B - 08 МА ПУ 1.470.000* за показником питомої теплоти згорання зразків (DSTU 7866); д) показники щільності будови ґрунтів за фонових умов, впливу техногенного та технологічного навантаження (DSTU ISO 11272-2001); е) вміст легкогідролізованого азоту – за методом Корнфілда (DSTU 7863) для проведення зіставлення отриманих даних;

4) камеральний етап – прогнозування стану азотних систем ґрунтів різних типів за експертного оцінювання нормативно-довідкової документації, розрахунок показника загальних запасів енергії гумусу ґрунту, статистична обробка отриманих даних щодо азотного, гумусового, енергетичного стану ґрунтів, у тому числі і за впливу технологічного навантаження, техногенного забруднення ВМ за методом побудови математичних моделей.

Розрахунок показника загальних запасів енергії, що акумульовані гумусом ґрунту, як індикатора енергетичного стану ґрунту, проводили за відомою формулою Д. С. Орлова – Л. А. Гришиної (Orlov, Grishina, 1981; Orlov et al., 2004) у модифікації О. Л. Орлова (Orlov, 2002), що враховує якісний склад гумусу і теплоємність основних його фракцій:

$$Q = (19,96 \text{ ГК} + 9,16 \text{ ФК} + 17,86 \text{ ГЗ}) \times N \times d \times 10 / 100, \quad (1)$$

де Q – запаси енергії, акумульовані гумусом ґрунту, 10^6 кДж /га (або 10^3 МДж /га); 19,96 – теплота згорання гумінових кислот, кДж/г; 9,16 – теплота згорання фульвокислот, кДж /г; 17,86 – теплота згорання гуміну, кДж /г; ГК – вміст гумінових кислот, %; ФК – вміст фульвокислот, %; ГЗ – вміст гуміну, %; N – шар ґрунту, м; d – щільність будови ґрунту, г/см³; 10 – коефіцієнт переведення в 10^6 кДж /га; 100 – перерахування одиниць виміру показників вмісту ГК, ФК та ГЗ у відсотках.

Аналітичні числові дані щодо акумулятивної енергетичної функції гумусових речовин ґрунту – показників питомої внутрішньої енергії або теплотворної здатності гумусу; запасів енергії, що акумульовані гумусом ґрунту, макроелементного статусу (за показниками вмісту легкогідролізованого азоту ґрунту) та гумусового стану статистично обробляли із використанням модулів кореляційного, дисперсійного, регресійного аналізів у рамках пакета *Statistica 10.0*, включаючи розрахунки за рівняннями лінійної, ступеневої і логарифмічної регресії.

Результати та їх обговорення

Розробкою науково-методичного забезпечення дослідження вмісту різних груп сполук азоту ґрунтів різних типів встановлено, що для вичерпної його характеристики необхідним є визначення загального та легкогідролізованого азоту, нітрифікаційної здатності ґрунтів, нітратів або суми нітратів і обмінного амонію. Але для діагностування та прогнозування азотного стану ґрунту показник умісту лабільного легкогідролізованого азоту, поряд із загальним азотом, є найбільш вагомим за рахунок:

1) його численних взаємозв'язків з іншими формами азоту ґрунту (валовою, мінеральними – NO_3^- , NH_4^+ тощо) та показниками мікробіологічної трансформації сполук азоту ґрунту (амоніфікаційна, нітрифікаційна здатність, симбіотична та несимбіотична азотфікація, денітрифікація тощо);

2) його значного вмісту у ґрунтах різних типів у порівнянні з умістом рухомих мінеральних форм азоту. Вміст легкогідролізованого азоту у ґрунтах Полісся складає 14–18 %, у ґрунтах Лісостепу – 6–10 % та Степу – 16–19 % у порівнянні з умістом мінеральних форм азоту – 1,5–2,8 % та 1–2 % відповідно у ґрунтах Полісся та Лісостепу і Степу України (Nosko, 2013);

3) встановленого закономірного зв'язку (коефіцієнти кореляції становили 0,82–0,96) вмісту легкогідролізованого азоту ґрунту з виносом та вмістом азоту у зерні і вегетативній масі рослин, зокрема пшениці (*Triticum durum*), кукурудзи (*Zea mays L.*) та соняшнику (*Helianthus annuus*), що важливо для якісного та своєчасного проведення ґрунтової діагностики азотного живлення рослин і точного визначення та коригування доз застосування азотних добрив та подальшого диференційованого внесення азоту до сівби та в підживлення посівів у весняно-літній період вегетації певної культури по кожному полю;

4) придатності показника для діагностування як азотного стану ґрунту, так і забезпеченості рослин азотом протягом періоду їх вегетації, у порівнянні з мінеральними формами азоту ґрунту, кількісний уміст яких коливається в залежності від зволоження ґрунту та протягом вегетаційного періоду рослин (коливання складають від 10 до 400 кг/га у шарі ґрунту до 1 м), та характеризують забезпеченість рослин азотом ґрунту на період його визначення, що значно ускладнює оцінювання та нормування якості ґрунтів за його вмістом;

5) точності чинних методів визначення легкогідролізованого азоту в ґрунтах (10–15 %) як індикатора інтенсивності та спрямованості ґрунтових процесів.

Таким чином, за результатами проведених досліджень щодо використання показника легкогідролізованого азоту ґрунту підвищується ефективність його діагностування з одночасним забезпеченням більш точного визначення родючості ґрунту. Показник умісту лабільного легкогідролізованого азоту ґрунту відображає найближчий його резерв для рослин, що здатний трансформуватись мікроорганізмами у мінеральні форми азоту, доступного рослинам, який складає 3–8 % від загального вмісту азоту у ґрунтах України (Yurko, 1979).

Визначенням закономірних зв'язків між показниками макроелементного та енергетичного статусу ґрунтів реалізується можливість оперативного переходу від одних інформативних показників до інших із одночасним більш точним кількісним діагностуванням і оцінюванням інтенсивності ґрунтових процесів та можливістю прогнозувати стан макроелементних систем ґрунту певного типу за базовими показниками властивостей, що визначають генетичну приналежність ґрунту.

Використання показників енергоємності ґрунтів різного генезису у спрощенні з гумусовим станом для визначення

макроелементного статусу ґрунтів обумовлено їх високою інформативністю та прогностичністю внаслідок тісного взаємозв'язку біогеохімії вуглецю та азоту у ґрунтах різного генезису (Kovda, 1985; Bashkin, 2008), можливістю об'єднання різних показників інтенсивності біологічних процесів ґрунту (мікробіологічна і біохімічна активність; розкладання, синтез органічних сполук тощо) у єдиних узагальнених показниках його енергетичного стану для коректного визначення спрямованості перетворень речовин і енергії в ґрунтах різного генезису.

Відомо, що функціонування азотних систем ґрунтів є біологічно обумовленим, у зв'язку з чим важко піддається діагностуванню (Bashkin, 1987; Truskavec'kij, 2003). Основним механізмом азотного режиму ґрунту є спряжене функціонування ґрунтового мікробіоценозу, кореневої системи рослин як живої фази ґрунту і колоїдного комплексу ґрунту. Отже, для діагностування азотного стану ґрунтів доцільно використовувати співвідношення процесів мобілізації – іммобілізації форм азоту ґрунту.

Узагальненням проведених багаторічних польових досліджень та аналізуванням отриманих даних щодо вмісту азоту в ґрунтах різного генезису різних природно-кліматичних зон України (Nosko, Yunakova, 1993; Nosko, Merkulova, Babych, 2000; Nosko, 2013; Khrystenko, Hladkikh, Yunakova, 2013) було встановлено пряму залежність між умістом у ґрунтах України загального азоту і легкогідролізованого азоту (представленого більшою частиною органічними формами), визначеного за методом Корнфілда ($r=0,86$).

За результатами досліджень було встановлено порушення співвідношення хімічних елементів у ґрунті за прояву явищ геохімічного синергізму (N-NH_4 і Cd, Pb, Ni, Cr; N-NO_3 і Cr) та антагонізму йонів (N-NH_4 і Cr; N-NO_3 і Cd, Pb, Ni, Cr), підвищення вмісту лабільного легкогідролізованого азоту, що значно ускладнює визначення рівнів умісту азоту забрудненого ґрунту та знижує точність отриманих даних (Fateev, Samokhvalova, 1999; Samokhvalova, Fateev, 2001). Спосіб, що пропонується, дає можливість отримати коректні дані азотного стану ґрунту за будь-яких умов: фонових, техногенного забруднення та технологічного навантаження.

Показник умісту лабільного легкогідролізованого азоту ґрунту, визначений за енергетичними показниками ґрунтів як інформативний критерій, дає можливість його використання для прогнозування стану азотних систем ґрунтів різного генезису, оцінювання якості та еколого-енергетичного статусу ґрунту, чим забезпечується технічний результат способу – підвищення точності та експресності визначення лабільного легкогідролізованого азоту як біогенного елементу ґрунтів різних типів, у тому числі під впливом антропогенних навантажень.

За результатами проведених нами досліджень щодо селективного використання показників стану азотних, вуглецевих та енергетичних систем ґрунтів встановлено підвищення ефективності прогнозування екологічного стану ґрунтів використанням показника вмісту лабільного легкогідролізованого азоту ґрунту, що відображає родючість ґрунту на рівні типу, екологічні та продукційні функції та характеризує забезпеченість відповідно до градації вмісту в ґрунті.

Узагальненням отриманих результатів патентних досліджень встановлено існуючі технічні рішення щодо прогнозування екологічних та продукційних функцій ґрунтів за використання показників умісту макроелементів. Зокрема, відомо спосіб потенціометричного вимірювання фізико-хімічних показників ґрунту (Pat. на korysnu model' 29958 UA), який здійснюють за допомогою йон-селективних електродів, що розміщують у ґрунті певним чином та по різниці їх потенціалів, які співвідносяться з відповідними фізико-хімічними показниками ґрунту, роблять висновки про ці показники. Спосіб дозволяє точно визначити вміст мінеральних форм азоту *in situ* в натурних умовах польових досліджень. Однак для одержання точних

та відтворюваних результатів виконання способу необхідним є збереження однакових умов експериментів на межі електрод/досліджуваній розчин шляхом вибору оптимальних умов експерименту на всіх стадіях аналізу від пробопідготовки до обробки одержаних даних, що є досить складним у реалізації внаслідок об'єктивних труднощів пошуку ізопотенціальної точки при роботі із іон-селективними електродами (яка знаходиться за межами калібрувального графіку), або різнобічний зсув потенціалів електроду порівняння та індикаторного електроду зі зміною температури розчину; заниження або завищення результатів аналізу за рахунок впливу йонів OH^- та H^+ тощо. Недоліком методу є припущення, що склад аналізованого розчину після градування електроду залишається постійним. Як результат, збільшується похибка, пов'язана із корекцією електродної функції. Величини похибок визначення концентрації методом прямої потенціометрії для одно-, два- та тризарядних іонів становлять $\pm 12\%$.

Наступний відомий спосіб визначення стану азотних систем ґрунту передбачає визначення його азот-буферних властивостей (Truskavets'kij, 2003). Спосіб включає систему лабораторних досліджень процесів мобілізації та іммобілізації (депонування) мінеральних форм азоту ґрунту і добрив із охопленням діапазону їх можливих перетворень за серії компостувань неудобреного ґрунту та внесення доз азотнокислого амонію, з подальшим визначенням іонів нітратів і амонію та їх активностей – pNO_3 , pNH_4 . За результатами аналізу розраховують кількість іммобілізованого (депонуваного) ґрунтом азоту. Відношення величин внесеного азоту добрив та вмісту його рухомих форм (мінерального азоту) в ґрунтового розчину характеризує іммобілізаційну азот-буферну здатність ґрунту, що діагностується шляхом визначення потенційно можливого накопичення мінеральних форм азоту за рахунок багаторазового циклічного компостування одного і того ж зразку ґрунту до максимальної втрати ним здатності утворювати ці форми за рахунок мінералізаційних процесів (визначається за відсутністю подальшого накопичення нітратів). Відношення величин вилучених із ґрунту мінеральних форм азоту та їх зменшення після кожного циклу лабораторного компостування приймається за показник азот-буферної здатності в мобілізаційному (негативному) крилі буферності. Проте недоліками способу слід вважати: 1) його трудомісткість та часовитратність, що унеможливує використання для масових аналізів; 2) зниження функціональних можливостей його реалізації і відповідно ефективності його застосування внаслідок низького рівня адекватності поведінці азоту в натурних (польових) умовах використання ґрунтів.

Відомо інший спосіб прогнозування вмісту мікроелементів у ґрунтах (Pat. на *korysnu model 107854 UA*), що за встановленням закономірних зв'язків МЕ та ВМ з показниками енергоємності ґрунту (питома внутрішня енергія гумусу або теплотворна здатність гумусу; загальні запаси енергії у шарі до 20 см) дає можливість отримати дані щодо якості ґрунтів певного типу. Однак отриманий у спосіб закономірний зв'язок показників якості ґрунтів не дає можливості точного визначення і параметризації взаємозв'язку показників без урахування: 1) дії на нього основних макроелементів ґрунту, що значно впливають на рухомість та транслокацію МЕ/ВМ у суміжні з ґрунтом середовища, МЕ статус ґрунтів в цілому; 2) наявності тісного зв'язку між вмістом макроелементів у ґрунтах, а саме того, що 70–90 % азоту ґрунту (основна частина біогенного елементу) входить до складу специфічних гумусових речовин; 10–30 % – до складу «неспецифічних» органічних речовин; близько 1 % загального вмісту азоту – знаходиться у складі мінеральних солей у ґрунті (Tyurin, 1965), середній вміст азоту складає 1/20 частину вмісту гумусу ґрунту

(Gamzikov, 1981). Отже, не існує точного прогнозування якості ґрунтів з урахуванням базових показників родючості та основних показників вмісту макро- та МЕ ґрунту.

Найбільш близьким за механізмом реалізації і результатом, що досягається, є спосіб прогнозування відтворення родючості ґрунту (Avtor. sv. SU 1481681), заснований на встановленні енергопотенціалу ґрунту та біомаси рослин методом калориметрії, що передбачає розрахунок за формулою показника відтворення родючості ґрунту (γ) з урахуванням енергопотенціалу ґрунтів, що вкриті рослинами та без них, за весь період вегетації рослин. За величиною запропонованого показника прогнозують розширене ($\gamma > 1$), просте ($\gamma = 1$) відтворення родючості ґрунту або його деградацію ($\gamma < 1$). Проте недоліками способу є такі: 1) визначення інтенсивності накопичення та витрат енергії необхідно проводити в ґрунтах за вегетаційний період вирощування різних видів рослин для отримання відповідних показників, що значно збільшує трудомісткість і часовитратність реалізації способу; 2) згідно із способом прогноз розширеного відтворення родючості ґрунту є можливим за умови надходження в ґрунт всієї біомаси рослин, що практично є нездійсненним та потребує урахування її відчуження, що збільшує похибку способу; 3) спосіб дозволяє прогнозування родючості лише для ґрунтів, приріст енергопотенціалу яких за вегетаційний період буде не менше 1 % вихідної величини, що звужує можливості його застосування; 4) обмеженість або неможливість використання способу внаслідок мінімуму інформації у користувача щодо енергопотенціалу ґрунтів та можливостей її отримання, що потребує значних витрат матеріальних ресурсів та часу за обов'язкового урахування всіх «носіїв» енергії ґрунту.

Для підвищення точності прогнозування родючості ґрунтів різного генезису необхідно додаткове встановлення закономірних зв'язків показників якості ґрунтів за показниками вуглецевого (гумусового) стану, енергетичного та азотного стану.

Розроблений алгоритм нами запропонованого методичного підходу включає: відбір зразків із орного (до 20 см) шару ґрунтів різного генезису, зокрема акумулятивного ряду, лабораторно-аналітичні дослідження згідно з чинними нормативними документами та методичною базою з визначення таких показників: 1) загальний вміст гумусу; 2) груповий та фракційний склад гумусу ґрунту; 3) препаративне виділення гумусових речовин ґрунту та визначення питомої енергоємності ґрунтів і препаратів ГК (гумінових кислот) – за показником питомої теплоти згорання зразків за використанням калориметричної установки; 4) вміст легкогідролізованого азоту для проведення зіставлення отриманих даних. Всі отримані результати та відомі довідкові дані показників властивостей ґрунту певного типу вносимо в табл. 1.

Далі розраховують показник загальних запасів енергії, що акумульовані гумусом ґрунту, як індикатора його енергетичного стану, за відомою формулою Орлова. Отримані результати розрахунку показника енергоємності ґрунту за формулою також вносимо в табл. 1 та використовуємо як базову для подальших розрахунків залежностей вмісту легкогідролізованого азоту, показників гумусового стану та енергоємності ґрунтів (теплотворна здатність гумусу, запаси енергії ґрунту у шарі до 20 см) за фонових умов, технологічного навантаження і техногенного забруднення ВМ з одержанням відповідних регресійних рівнянь залежностей після статистичної обробки (кореляційний, дисперсійний, регресійний аналіз) даних за подальшої візуалізації результатів на діаграмах (рис. 1, а–б). На основі отриманих регресійних рівнянь, зокрема для акумулятивного ряду ґрунтів, визначаємо прогнозовані значення вмісту лабільного легкогідролізованого азоту у ґрунтах різного генезису:

$$C_{N \text{ легкогідролізований}} = 7,4746 - 47,1896 \cdot x + 25,0859 \cdot y \quad (1)$$

$$C_{N \text{ легкогідролізований чорнозем типовий}} = 7,4746 - 47,1896 \cdot 0,91 + 25,0859 \cdot 2,25 = 20,97$$

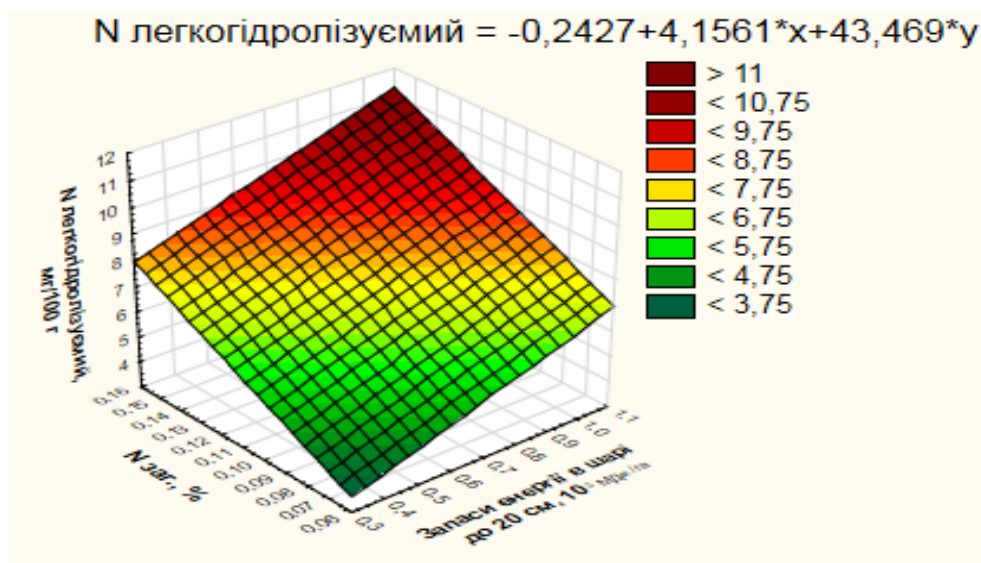
$$C_{N \text{ легкогідролізований фактичний}} = 20,90,$$

$$\text{та } C_{N \text{ легкогідролізований чорнозем звичайний}} = 7,4746 - 47,1896 \cdot 0,79 + 25,0859 \cdot 1,74 = 13,84$$

$$C_{N \text{ легкогідролізований фактичний}} = 13,80$$

розрахунку стандартної похибки оцінки, яка для показника $C_{N \text{ легкогідролізований}}$ – 1,30; це підтверджує високу точність розрахункових значень умісту азоту в чорноземних ґрунтах.

Окрім того, для підтвердження достовірності отриманих розрахункових даних було додатково на тих самих ґрунтах проведено визначення фактичного вмісту



a



б

Рис. 1. Візуалізовані моделі встановлених залежностей показників енергетичного стану ґрунту та рівнів умісту легкогідролізованого азоту

лабільного легкогідролізованого азоту за Корнфілдом згідно з чинними нормативно-методичними документами (точність методу $\pm 15\%$). Результати зіставлення отриманих розрахункових даних із даними фактичного вмісту азоту в ґрунтах свідчать про високу їх відповідність та точність (табл. 2).

Результатами проведення досліджень щодо визначення показника вмісту легкогідролізованого азоту в

де $C_{N \text{ легкогідролізований}}$ – розрахунковий уміст легкогідролізованого азоту ґрунту, мг/100 г ґрунту;

x – теплотворна здатність гумусу ґрунту, МДж / кг;

y – запаси енергії в шарі до 20 см ґрунту певного типу, 10^3 МДж / га

з одночасним визначенням точності отриманих числових значень прогнозованого вмісту азоту в ґрунті за

найбільш поширених в Україні ґрунтах різних типів та підтипів (табл. 2) було підтверджено універсальність запропонованого алгоритму способу та його ефективність для точного прогнозування стану азотних систем ґрунтів різного генезису, що об'єднані в ряди за ознакою переважання ґрунтового процесу, наприклад ґрунти опідзоленого ряду (процес опідзолення) – дерново-підзолисті, ясно-сірі, сірі опідзолені та темно-сірі тощо; акумулятивного ряду (дерновий процес) – чорноземи типові, звичайні і південні тощо. Зокрема, розрахункові величини вмісту легкогідролізованого азоту в чорноземних ґрунтах за фонових умов становили 13,8–20,9 мг/100 г ґрунту; за техногенного забруднення ВМ – 13,2–13,6 мг/100 г ґрунту; за технологічного навантаження – 12,4 мг/100 г ґрунту. Таким чином, отримуємо дані щодо стану азотних систем ґрунтів різного генезису з урахуванням рівнів їхньої енергоємності.

Таблиця 1

Вихідні дані гумусового, азотного та енергетичного стану ґрунтів, щільності їх будови за фонових умов та впливу антропогенних навантажень

Тип ґрунту	C _{зат} , %	C _{гк} , %	C _{фк} , %	ГЗ, %	d, г/см ³	Фактичний уміст легкогідролізованого азоту, мг/100 г ґрунту	Енергоємність ґрунту	
							Теплотворна здатність гумусу, МДж /кг	Q, запаси енергії в шарі до 20 см, 10 ³ МДж/га
1. За відсутності навантажень (фонові умови)								
Дерново-підзолистий	0,9	0,17	0,2	0,53	1,5	4,5	0,106	0,44
Ясно-сірий	1,2	0,27	0,3	0,63	1,5	8,0	0,250	0,58
Темно-сірий	3,1	1,1	0,54	1,46	1,3	10,6	0,840	1,40
Чорнозем опідзолений	2,44	1,0	0,31	1,13	1,2	12,3	0,820	1,03
Чорнозем звичайний	3,9	1,25	0,7	1,95	1,1	13,8	0,900	1,46
Чорнозем типовий	4,8	1,75	0,6	2,45	1,2	20,9	1,200	2,02
2. За впливу техногенного навантаження (забруднення ВМ)								
Дерново-підзолистий забруднений	0,79	0,1	0,2	0,49	1,52	5,2	0,090	0,38
Чорнозем опідзолений забруднений	1,9	0,2	0,4	1,3	1,21	13,1	0,650	0,74
Чорнозем звичайний забруднений	2,08	0,38	0,5	1,2	1,22	14,2	0,790	0,82
3. За впливу технологічного навантаження (застосування систем удобрення)								
Чорнозем опідзолений (мінеральна система удобрення)	2,38	0,93	0,29	1,16	1,2	12,5	0,800	1,00
Темно-сірий (мінеральна система удобрення)	3,09	1,09	0,44	1,56	1,3	11,1	0,840	1,4
Чорнозем опідзолений (органомінеральна система удобрення)	2,46	0,99	0,30	1,17	1,2	13,2	0,980	1,04
Темно-сірий (органомінеральна система)	3,15	1,19	0,50	1,46	1,3	12,2	0,870	1,42
Чорнозем опідзолений (органічна система удобрення)	2,45	0,94	0,34	1,17	1,2	13,0	0,930	1,03
Темно-сірий (органічна система удобрення)	3,15	1,17	0,52	1,46	1,3	12,08	0,871	1,41

Таблиця 2
Розраховані (прогнозовані) та фактичні параметри макроелементного статусу ґрунтів різних типів за фонових умов та впливу антропогенних навантажень

Груповий склад сполук азоту ґрунту	Розрахунковий/ фактичний* уміст форм азоту в ґрунті						
	ґрунти опідзоленого ряду			ґрунти опідзоленого ряду		ґрунти опідзоленого ряду	
	Ясно-сірий	Темно-сірий	Чорнозем типовий	Чорнозем звичайний	Темно-сірий опідзолений	Дерново-підзолистий	Чорнозем типовий
	За відсутності навантажень на ґрунт (фонові умови)			13,8 / 13,8*	За впливу систем удобрення (технологічне навантаження)		Чорнозем звичайний
	8,1 / 8,0*	11,0 / 10,6*	20,9 / 20,9*		11,5 / 11,7*	12,4 / 12,9*	
C _N легкогідролізованний, мг /100 г ґрунту				13,8 / 13,8*	11,5 / 11,7*	12,4 / 12,9*	13,6 / 13,2*
						5,6 / 5,2*	13,2 / 14,2*

* Фактичний уміст C_N легкогідролізованного в ґрунті.

Таблиця 3
Результати порівняльного аналізу використання алгоритму розробленого методичного підходу та відомого способу

Запропонований спосіб визначення N легкогідролізованого у ґрунті					Існуючий спосіб визначення легкогідролізованого азоту в ґрунті			
Типи ґрунтів					Без урахування типів ґрунтів			
Уміст легкогідролізованого азоту в ґрунті, мг/100 г ґрунту		Градация вмісту легкогідролізованого азоту (оцінка)	Потреба рослин у N-добри-вах (оцінка)	Необхідна кількість внесення добрив, кг/га діючої речовини	Уміст N легкогідролізованого в ґрунті, мг/100 г ґрунту	Градация вмісту за існуючою методикою	Потреба рослин у N-добривах (оцінка)	Необхідна кількість внесення добрив, кг/га діючої речовини
Поліся. Дерново-підзолистий	<4,5	Дуже низька	Дуже висока	75–90	< 10,0	Низька	Дуже висока	60–90
Лісостеп. Ясно-сірий	4,5– 8,5	Низька	Висока	60–75	10,1–15,0	Середня	Висока	45–60
Лісостеп. Темно-сірий	8,6–12,6	Середня	Середня	45–60	10,1–15,0	Середня	Середня	30–45
Степ. Чорнозем південний	9,0–12,9	Середня	Середня	30–45	15,1–20,0	Підвищена	Середня	30–45
Степ. Чорнозем звичайний	13,0–16,9	Середня	Середня	15–30	15,1–20,0	Підвищена	Середня	30–45
Лісостеп. Чорнозем типовий	17,0–22,0	Висока	Відсутня	0	> 20,0	Висока	Низька	20–30

Одночасно забезпечується можливість оцінювання еколого-енергетичного стану ґрунтів за вирішення зворотної задачі розрахунку кількісних параметрів одного показника на підставі кореляційно пов'язаних з ним відомих інших (рис.1, а–б). Тобто запропоноване рішення розширює та полегшує можливості користувача у визначенні вмісту лабільного легкогідролізованого азоту в ґрунті без тривалих хіміко-аналітичних досліджень за рахунок вибору відповідних математичних рівнянь, отриманих на основі наявних даних.

Для оптимізації режиму макроелементного живлення рослин, за рахунок поживних речовин ґрунту та застосування різних форм і способів внесення органіко-мінеральних добрив, необхідно враховувати вплив на цей процес різних чинників, а саме: рівень забезпеченості ґрунту поживними речовинами, зокрема азотом; біологічні особливості рослин, асиміляцію азоту з повітря тощо, які ускладнюють розрахунки норм мінеральних добрив під прогнозовану врожайність рослин, що призводять до розбіжностей у рекомендаціях розрахункових норм азотних добрив для внесення, та підвищення витрат матеріальних ресурсів та, відповідно, ціни на кінцеву рослинну продукцію, а також збільшує ризики забруднення азотними сполуками системи ґрунт – рослина та суміжних середовищ. Також запропонований спосіб забезпечує ефективне проведення ґрунтової діагностики азотного живлення рослин і нормування вмісту азоту в ґрунтах шляхом дозування внесення добрив з одночасним урахуванням їх генетичних особливостей. Одночасно реалізується можливість точного визначення та коригування доз застосування азотних добрив для подальшого диференційованого внесення азоту у ґрунт.

Спосіб дозволяє оцінити якість ґрунтів різного генезису за вмістом азоту за умов активізації або зниження інтенсивності малого біологічного кругообігу сполук елементів і енергії ґрунту (зволоженість ґрунту, антропогенні навантаження) для подальшого розроблення екологічних вимог до забруднення рослин як критеріїв для обґрунтування нормативних показників умісту біогенних елементів, зокрема азоту та вуглецю, максимально допустимого вмісту рухомих сполук азоту в системі ґрунт – добриво – рослина – вода.

Висновки

Розроблено методичний підхід щодо прогнозування стану азотних систем ґрунтів на прикладі визначення вмісту біогенного легкогідролізованого азоту в ґрунтах різних типів за фонових умов, впливу технологічного навантаження та ризику і наявності техногенного забруднення ВМ, який захищено охоронним документом (Pat. на korysnu model 122345 UA, 2018 р.). За рахунок встановлення нових взаємозв'язків показників енергоємності ґрунтів (теплотворна здатність гумусу, запаси енергії ґрунту в шарі до 20 см) у спряженні з гумусовим станом та використанням математико-статистичного аналізу отримують регресійне рівняння визначення величини легкогідролізованого азоту з можливістю прогнозування якості ґрунтів різного генезису, з поширенням алгоритму способу на ґрунти різних типів певної природно-кліматичної зони за умов техногенного забруднення і технологічного навантаження.

Технічний результат способу: за рахунок удосконалення визначення рівнів умісту легкогідролізованого азоту в ґрунтах різного генезису для оцінювання їх якості шляхом визначення найбільш кореляційно пов'язаних, діагностично придатних інтегральних базових показників ґрунтових властивостей, які дозволяють своєчасно, з підвищеною точністю, експресністю та інформативністю приймати управлінські рішення, та прогнозувати якість ґрунтів різного генезису за

вмістом легкогідролізованого азоту як біогенного елементу за фонових умов та антропогенних навантажень.

Відмінними рисами та перевагами запропонованого методичного підходу, у порівнянні з відомими способами та підходами, є такі: 1) експресність отримання точних прогнозованих рівнів умісту легкогідролізованого азоту як біогенного елементу у ґрунті з підвищенням точності ґрунтової діагностики за рахунок використання базових інтегральних показників; 2) забезпечення можливості отримання більшої результативності прогнозованих даних щодо функціонування азотних систем ґрунтів різного генезису, якості та еколого-енергетичного стану ґрунтів, за фонових умов та антропогенних навантажень з одночасною мінімізацією витрат матеріальних ресурсів; 3) розширення можливостей користувача у визначенні вмісту легкогідролізованого азоту в ґрунті без тривалих хіміко-аналітичних досліджень за рахунок вибору регресійних рівнянь, отриманих на основі використання базових показників властивостей ґрунтів певного типу та підтипу, згідно з наявною інформацією; 4) універсальність способу завдяки придатності встановлених залежностей запропонованого способу для ґрунтів всіх типів і підтипів та природно-кліматичних зон і забруднювачів.

Новий методичний підхід може знайти застосування в оцінюванні та екологічному нормуванні якості ґрунтів за вмістом МЕ, нормуванні навантажень (техногенних, технологічних) на ґрунтову систему, агроєкології з вирішення питань моніторингу родючості ґрунтів, паспортизації земель різного призначення та використання; органічного землеробства, біоенергетики і енергетики ґрунтоутворення; діагностики, оцінювання, визначення якості гумусу і статусу МЕ, небезпеки надлишкового накопичення ВМ у ґрунтах за показниками елементного, гумусового та/або енергетичного стану; екологічного менеджменту ґрунтів як за фонових умов, так і за різних антропогенних впливів, та в науково-дослідній практиці з дослідження біогеохімії і біогенних макроелементів ґрунтів.

Окремі положення розробленого способу стали складовою пропозицій, поданих у 2017 р. до Міністерства екології та природних ресурсів України, де опрацьовувались матеріали з адаптації до Нітратної Директиви Ради ЄС 91/676/ЄЕС від 12.12.1991 р. про захист вод від забруднення, спричиненого нітратами з сільськогосподарських джерел, із змінами і доповненнями, внесеними Регламентом ЄС №1882/2003 *Cross Nitrogen Balances Handbook* (лист № 575/1-04 від 23.06.2017).

Подані пропозиції, що наведені нижче, пропонується розглядати як перспективні напрями подальших досліджень за тематикою діагностування, оцінювання, прогнозування стану азотних систем ґрунтів та нормування якості за елементним складом, зокрема вмістом біогенного азоту.

1. Розробкою науково-методичного забезпечення дослідження вмісту різних груп сполук та фракцій азоту ґрунтів різних типів встановлено, що для вичерпної його характеристики необхідним є визначення загального та легкогідролізованого азоту, нітрифікаційної здатності ґрунтів, нітратів або суми нітратів і обмінного амонію. Для більш ефективного діагностування та прогнозування азотного стану ґрунту показник умісту лабільного легкогідролізованого азоту, поряд із загальним азотом, є найбільш вагомим за рахунок:

а) його численних взаємозв'язків з іншими формами азоту ґрунту (валовою, мінеральними – NO_3^- , NH_4^+ тощо) та показниками мікробіологічної трансформації сполук азоту ґрунту (амоніфікаційна, нітрифікаційна здатність, симбіотична та несимбіотична азотфіксація, денітрифікація тощо);

б) його значного вмісту в ґрунтах різних типів у порівнянні з вмістом рухомих мінеральних форм азоту;

в) встановленого закономірного зв'язку вмісту легкогідролізованого азоту ґрунту з виносом та вмістом азоту у зерні і вегетативній масі рослин, що важливо для якісного та своєчасного проведення ґрунтової діагностики азотного живлення рослин і точного визначення та коригування доз застосування азотних добрив та подальшого диференційованого внесення азоту до сівби та в підживлення посівів у весняно-літній період вегетації певної культури по кожному полю;

г) придатності показника для діагностування як азотного стану ґрунту, так і забезпеченості рослин азотом протягом періоду їх вегетації, у порівнянні з мінеральними формами азоту ґрунту, кількісний уміст яких коливається залежно від зволоження ґрунту та протягом вегетаційного періоду рослин, та характеризують забезпеченість рослин азотом ґрунту на період його визначення, що значно ускладнює оцінювання та нормування якості ґрунтів за його вмістом;

д) точності чинних методів визначення легкогідролізованого азоту в ґрунтах (10–15 %) як індикатора інтенсивності та спрямованості ґрунтових процесів.

2. Урахування інтегрального показника енергоємності ґрунтів – теплотворної здатності гумусу та запасів енергії до 20 см ґрунту. Енергоємність ґрунту є показником потенційної продуктивності ґрунту, що тісно пов'язана з властивостями ґрунтів, які визначають рухомість та рівень умісту біогенних макроелементів (N, C, P) та ME /BM у ґрунтах різних типів за фонових (природних) умов, техногенного забруднення та технологічного навантаження. Використання узагальнюючих енергетичних характеристик функціонування ґрунтової системи дозволяє отримати точні прогнозні дані щодо якості ґрунту певного типу (елементний статус, якість гумусу як акумулятора і джерела енергії, енергетичний стан) для оцінювання їх екологічних та продукційних функцій, екологічного нормування якості ґрунтів різних типів; здійснювати управління відтворенням енергетичного потенціалу їх органічної речовини та якістю.

3. Урахування основного механізму функціонування азотного режиму ґрунтів різного генезису – спряженого функціонування колоїдного комплексу ґрунту, ґрунтового мікробіоценозу та кореневої системи рослин як живої фази ґрунту та біологічної обумовленості функціонування азотних систем ґрунтів.

4. Використання співвідношення процесів мобілізації – іммобілізації форм азоту ґрунту в системі ґрунт – мікроорганізми та ферменти – ризосфера рослин.

5. Для діагностування азотного режиму ґрунтів доцільно використовувати вплив макро- та мікроелементного складу ґрунтів на біохімічні властивості мікроорганізмів азотного циклу ґрунту та біологічну активність ґрунту, що пов'язана з розкладанням органічних речовин ґрунту з утворенням аміаку (амоніфікації), процесами нітрифікації та азотфіксації (симбіотичної та несимбіотичної). Недостатня увага до мікробіологічного фактору трансформації азоту в ґрунті сучасних агроценозів є однією із причин незбалансованого забезпечення рослин азотом, надмірного накопичення нітратів у рослинній продукції, низької ефективності використання азотних мінеральних добрив, забруднення біосфери сполуками азоту з порушенням біогеохімічного циклу азоту (масоване виділення в атмосферу закису азоту N₂O; міграція нітратів з добрив та органічної речовини ґрунту за її дегуміфікації в ґрунтові води). Вивчення динаміки зміни азотного фонду та мікробіологічних процесів трансформації азоту необхідно для розробки практичних заходів, спрямованих на оптимізацію азотного режиму в агроекосистемах, що підвищить біопродуктивність ґрунтів та забезпечить збереження довкілля.

6. Розроблення Технічного регламенту (нормативно-правовий акт) щодо екологобезпечного використання

азотовмісних добрив в землеробстві, який регламентуватиме технологічні прийоми використання азотовмісних добрив, що дозволяють звести до мінімуму евтрофікацію поверхневих вод, з урахуванням умов основних природних зон України і біологічних особливостей культур; строки, дози і способи екологічно безпечного внесення мінеральних і органічних добрив залежно від рельєфу поля, близькості водоймищ, гранулометричного складу ґрунтів; співвідношення в сівозмінах багаторічних трав і просапних культур; заходи, спрямовані на захист ґрунтів від ерозії; використання інгібіторів нітрифікації, використання азотовмісних добрив на меліорованих землях, зокрема зрошуваних, методи вимірювання тощо.

7. З метою подолання біогенного забруднення, зокрема надмірного накопичення сполук азоту у довкіллі (рослинах, водах), нормування вмісту азоту в ґрунтах різного генезису має передбачати: а) визначення максимально допустимих рівнів умісту рухомих мінеральних форм нітратного азоту за розробки екологічних вимог до забруднення нітратами рослинної продукції; б) нормування вмісту лабільного легкогідролізованого азоту та/або дози азотних добрив за умов достатнього та надмірного зволоження, урахуваючи швидкі процеси трансформації сполук азоту в ґрунтах; в) нормування вмісту мінеральних сполук азоту ґрунту за умов недостатнього зволоження та уповільнення процесів кругообігу азотних сполук ґрунту.

Автори висловлюють щире подяку патентному повіреному ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» науковому співробітнику В. М. Горякіній за ефективне сприяння та дієву допомогу в підготовці документації щодо розроблення нового технічного рішення та його інформаційно-аналітичного супроводження; співробітникам лабораторії агрохімії ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» – науковому співробітнику Т. А. Юнаковій за консультативну допомогу щодо методів визначення сполук азоту ґрунтів, провідному інженеру Корецькій Л. К. за допомогу в аналізуванні зразків ґрунтів, забруднених важкими металами.

References

- Avtor. sv. SU 1481681 (1989). Sposob prognozirovaniya vosproizvodstva plodorodiya pochvy [The method for predicting of soil fertility reproduction]. V. M. Volodin, A. E. Fedorchenko, L. I. Biryukova, R. F. Eremina, №1481681; appl. 12.02.1987; publ. 23.05.1989, Byul. 19 (in Russian).
- Bashkin, V. N. (1987). Agrogeohimiya azota [Agrogeochemistry of nitrogen]. ONTI NCBI, Pushchino. (in Russian).
- Bashkin, V. N. (2008). Biogeohimiya [Biogeochemistry: scientific edition]. Vysshaya. Shkola, Moscow (in Russian).
- Dobryva ta yikh vykorystannya (2010). [Fertilizers and their use: A Handbook]. Aristey, Kyiv (in Ukrainian).
- Fateev, A. I., Samokhvalova, V. L. (1999). Supply of nitrogen in agricultural cultures in condition of polyelement pollution of soil by the heavy metals. Collection of Papers by Ukrainian Members of ESSC, Kharkiv, 42–46.
- Gamzikov, G. P. (1981). Azot v zemledelii Zapadnoj Sibiri [Nitrogen in the Agriculture of Western Siberia]. Nauka, Moscow (in Russian).
- Khrystenko, A. O., Hladkikh, Ye. Yu., Yunakova, T. A. (2013). Otsinka azotnoho stanu gruntiv i rivnya zabezpechenosti roslin azotom khimichnymy metodamy [Assessment of the nitrogen state of soils and the level of plant nutrition by nitrogen chemical methods]. Visnyk ahraryoi nauky, 12, 17–20 (in Ukrainian).
- Kovda, V. A. (1985). Biogeohimiya pochvennogo pokrova [Biogeochemistry of soil cover]. Nauka, Moscow (in Russian).
- Mishustin, E. N. (1979). Krugovorot i balans azota v sisteme pochva – udobrenie – rastenie – voda [Rotation and

- balance of nitrogen in the soil – fertilizer – plant – water system]. Nauka, Moscow (in Russian).
- Mockler, E. M., Deakin, J., Archbold, M., Daly, D., Bruen, M. (2016). Nutrient load apportionment to support the identification of appropriate water framework directive measures. *Biology and Environment – Proceedings of the Royal Irish Academy*, 3, 245–263.
- Nosko, B. S. (2013). Azotnyy rezhym gruntiv i yoho transformatsiya v ahroekosystemakh [The Nitrogen Regime and its transformation in the Agroecosystems]. Mis'kdruk, Kharkiv (in Ukrainian).
- Nosko, B. S., Merkulova, E. L., Babych, E. V. (2000). Vynos elementov pytannya ozymoy pshenytyey yz chernozema typychnoho v zavysymosti ot systemy udobrenny [Carrying out of trophic elements by a winter wheat from chernozem typical depending on system of fertilizers]. *Ahrokhymyia*, 2, 45–53 (in Russian).
- Nosko, B. S., Yunakova, T. A. (1993). Ahrokhymycheskaya y ahroekolohycheskaya otsenka efektyvnosti udobrenny na chernozeme typychnom [Agrochemical and agroecological assessment of the fertilizers effectiveness on chernozem typical]. *Ahrokhymyia*, 3, 61–67 (in Russian).
- Orlov, D. S. (1990). Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii [Soils humus acids and general theory of humification]. MGU, Moscow (in Russian).
- Orlov, D. S. (2005). Himiya pochv [Soil chemistry]. Nauka, Moscow (in Russian).
- Orlov, D. S., Birjukova, O. N., Rozanova, M. S. (2004). Dopolnitelnye pokazateli gumusnogo sostojaniya pochv i ih geneticheskikh gorizontov [Additional indicators of the humus status of soils and their genetic horizons]. *Eurasian Soil Science*, 8, 918–926 (in Russian).
- Orlov, D. S., Grishina, L. A. (1981). Praktikum po himii gumusa [Workshop on humus chemistry]. MGU, Moscow (in Russian).
- Orlov, O. L. (2002). Enerhoiemnist yak kryteriy humusovoho stanu gruntiv [Energy intensity as a criterion of soil humus]. *Bulletin of Lviv NU. Biology Series*, 31, 111–115 (in Ukrainian).
- Pat. na korysnu model' 107854 UA (2016). Sposib prohnozuvannya rivniv vmistu mikroelementiv i vazhkykh metaliv gruntiv riznoho henezysu dlya otsynyuvannya yikh ekolohichnykh ta produktsiynykh funktsiy [The method of prognosis the levels of microelements and heavy metals content in soils of different genesis for the estimation of them ecological and productional functions]. V. L. Samokhvalova, Ye. V. Skryl'nyk, L. M. Shedey, V. I. Lopushnyak, N. V. Oliynyk, P. A. Samokhvalova, O. V. Mandryka, № u201512399; appl. 15.12.2015; publ. 24.06.2016, Byul. 12 (in Ukrainian).
- Pat. na korysnu model' 120082 UA (2017). Sposib prohnozuvannya rodyuchosti gruntiv za yikh makroelementnym stanom [The method of soil fertility forecasting by their macroelement state]. V. L. Samokhvalova, A. O. Khrystenko, L. O. Shedey, P. A. Samokhvalova, O. V. Karatsyuba, № u201703324; publ. 25.10.2017; Byul. 20 (in Ukrainian).
- Pat. na korysnu model' 122345 UA (2018). Sposib viznachennya vmistu legkogidrolizuemogo azotu u gruntah riznogo genezis dlya otsynyuvannya yakosti gruntiv [The method of determination of easily hydrolysable nitrogen content in soils of different genesis for the estimation of soils quality]. V. L. Samokhvalova, A. O. Khrystenko, L. O. Shedey, P. A. Samokhvalova, O. V. Karatsyuba, № u201707167; publ. 10.01.2018; Byul. 1 (in Ukrainian).
- Pat. na korysnu model' 29958 UA (2008). Sposib potentsiometrychnoho vymiryuvannya fizyko-khimichnykh pokaznykiv gruntiv [The method of the potentiometer measuring of soils physical and chemical indexes]. N. F. Cheshko, Yu. L. Tsapko, V. M. Kalinichenko, № u200702858; publ. 11.02.2008, Byul. 3 (in Ukrainian).
- Pat. na vynakhid 115014 UA (2017). Sposib vyznachennya vmistu svyntsyyu u gruntakh riznoho henezysu dlya otsynyuvannya yikh ekoloho-enerhetychnoho stanu [The method of determination of lead content in soils of different genesis for the estimate of their ecology and energy state]. V. L. Samokhvalova, V. P. Filatov, V. M. Horyakina, № 201612732; publ. 28.08.2017, Byul. 16 (in Ukrainian).
- Patentni doslidzhennya. Osnovni polozhennya ta porjadok provedennya [Patent researches are the Substantive provisions and order of realization]. DSTU 3575-97. [Chynnyy vid 1998.01.01.]. Kyiv: Derzhstandart Ukrayiny, 1998. 16 s. (Nacionalnyy standart Ukrayiny) (in Ukrainian).
- Patentnyy formulyar. Osnovni polozhennya. Poryadok skladannya ta oformlennya [Patent formular. Substantive provisions. Order of stowage and registration]. DSTU3574-97. [Chynnyy vid 1998.01.01.]. Kyiv: Derzhstandart Ukrayiny, 1998. 14 s. (Nacionalnyy standart Ukrayiny) (in Ukrainian).
- Samokhvalova, V. L., Fateev, A. I. (2001). Vozdeystvie poliehlementnogo zagryazneniya pochvy tyazhelyimi metallami na balans azota v sisteme udobrenie – pochva – rastenie [The effect of polyelement contamination of soil by heavy metals on the nitrogen balance in the fertilizer – soil – plant system]. Kn. 3, Minsk, 164–166 (in Russian).
- Samokhvalova, V. L., Skryl'nyk, Y. V., Lopushniak, V. I., Shedey, L. O., Samokhvalova, P. A. (2016). Prediction the levels of chemical elements content in soils of different genesis for the assessment of their eco-energy status. *Gruntoznavstvo*, 17 (3–4), 23–42.
- Samokhvalova, V. L., Skryl'nyk, Ye. V., Shedey, L. M., Lopushniak, V. I., Samokhvalova, P. A. (2016). Prohnozuvannya rivniv vmistu mikroelementiv i vazhkykh metaliv u gruntakh riznoho henezysu dlya otsynyuvannya yikh ekolohichnykh ta produktsiynykh funktsiy [Prognosis of the levels of microelements and heavy metals content in soils of different genesis for the evaluation of them ecological and productional functions]. *Ekology and Noospherology*, 27(1–2), 72–87 (in Ukrainian).
- Savich, V. I., Syichev, V. G., Nikolskiy, Yu. V., Zamaraev, A. G., Syunyaev, N. K. (2007). Energeticheskaya otsenka plodorodiy pochv [Energy assessment of soil fertility]. VNIIA, Moscow (in Russian).
- Schepers, J. S., Raun, W. R. (2008). Nitrogen of Agricultural Systems. *Agronomy Monograph* 49. USA. 947 p.
- Smil, V. (1985). Carbon-nitrogen-sulfur (Modern perspectives in energy): Human Interference in Grand Biospheric Cycles. USA, Plenum press, New York. 412 p.
- Truskavec'kij, R. S. (2003). Buferna zdatsnist' gruntiv ta yh osnovni funktsiy [Soil buffer capacity and their main functions]. *Nove slovo*, Kharkiv (in Ukrainian).
- Tyurin, I. V. (1965). Organicheskoe veshchestvo pochvy i ego rol v plodorodii [Organic matter of the soil and its role in fertility]. Nauka, Moscow (in Russian).
- Vlasyuk, P. A. (1962). Dovidnyk ahronoma po udobrennyu [Handbook of Fertilizer Agronomist]. Derzhsil'hospvydav, Kyiv (in Ukrainian).
- Yakist' gruntu. Preparatyvne vydilennya humusovykh rehovyn gruntu [The soil quality. Preparation of soil humus substances]. DSTU 7606:2014. [Chynnyy vid 2015-07-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 2014. 13 s. (Natsional'nyy standart Ukrayiny) (in Ukrainian).
- Yakist' gruntu. Vyznachennya vmistu legkogidroliznogo azotu za metodom Kornfilda [The soil quality. Determination of maintenance of easily hydrolysable nitrogen by Kornfeld method]. DSTU 7863:2015. [Chynnyy vid 2016-07-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 2015. 14 s. (Natsional'nyy standart Ukrayiny) (in Ukrainian).
- Yakist' gruntu. Vyznachennya enerhetychnoho potentsialu gruntu kalorymetrychnym metodom [The soil quality. Determination of the energy potential of soil by calorimetric method]. DSTU 7866:2015. [Chynnyy vid

- 2016-07-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 2015. 13 s. (Natsional'nyy standart Ukrayiny) (in Ukrainian).
- Yakist' gruntu. Vyznachennya hrupovoho skladu humusu za metodom Tyurina v modyfikatsiyi Kononovoyi ta Byel'chykovoyi [The soil quality. Determination of humus group composition by Tyurin method in modification of Kononova and Belchikova]. DSTU 7855:2015. [Chynnyy vid 2016-07-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 2015. 13 s. (Natsional'nyy standart Ukrayiny) (in Ukrainian).
- Yakist' gruntu. Vyznachennya hrupovoho ta fraktsiynoho skladu humusu za metodom Tyurina u modyfikatsiyi Ponomar'ovoyi ta Plotnykovoyi [The soil quality. Determination of the group and fractional composition of humus by the Tyurin method in the modification of Ponomarevoj and Plotnikovej]. DSTU 7828:2015. [Chynnyy vid 2016-07-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 2015. 13 s. (Natsional'nyy standart Ukrayiny) (in Ukrainian).
- Yakist' gruntu. Vyznachennya shchil'nosti skladennya na sukhu masu [The soil quality. Determination of drying density on dry weight]. DSTU ISO 11272-2001. [Chynnyy vid 2003-07-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 2003. 12 s. (Natsional'nyy standart Ukrayiny) (in Ukrainian).
- Yakist' gruntu. Metody vyznachennya orhanichnoyi rechovyny [The soil quality. Methods for determination of organic matter]. DSTU 4289:2004. [Chynnyy vid 2005-07-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 2005. 14 s. (Natsional'nyy standart Ukrayiny) (in Ukrainian).
- Yurko, E.P. (1979). Formy azotsoderzhaschih soedineniy v pochvah Ukrainyi [Forms of the nitrogenated compounds in soils of Ukraine]. Krugovorot i balans azota v sisteme pochva – udobrenie – rastenie – voda. Nauka, Moscow, 152–156 (in Russian)