

УДК 631.147:631.416.9:631.81.095.337

## Система оценки качества техногенно загрязненных почв по содержанию тяжелых металлов

А.И. Фатеев\*, Е.Б. Смирнова\*

ННЦ «Институт почвоведения и агрохимии имени А.Н. Соколовского», Харьков, Украина,

ИНФОРМАЦИЯ	АННОТАЦИЯ
<p>Получена 26.04.2018 Получена после доработки 07.07.2018 Утверждена в печать 06.08.2018 <u>Доступна онлайн 01.10.2018</u></p> <p><i>Ключевые слова:</i></p> <p><i>тяжелые металлы;</i> <i>микроэлементы;</i> <i>качество почвы;</i> <i>здоровье почвы;</i> <i>бонитировка почв;</i> <i>загрязнение почв;</i> <i>продовольственная безопасность;</i> <i>тест-растение.</i></p>	<p>Целью обзорной статьи является представление нового концептуального подхода к бонитировке почв по содержанию тяжелых металлов в разрезе современных представлений о качестве и здоровье почвы. В статье освещены основные проблемы оценивания техногенно загрязненных почв в Украине и предложены оптимальные, с точки зрения авторов, способы их решения. Новая система оценивания предлагает разработку серии модификационных критериев для общих и частных бонитетов почв с учетом буферности почв, полиэлементного загрязнения, синергизма, антагонизма и биологической доступности тяжелых металлов, толерантности сельскохозяйственных культур и возможности смешивания и разбавления растительной продукции с избыточным и дефицитным содержанием микроэлементов. Авторами предложено использовать в алгоритмах расчетов баллов бонитетов критерии качества получаемого урожая по эколого-токсикологическим показателям. В отличие от почвенной диагностики, тестирование растений позволяет точно определить ареал распространения фитотоксичных выбросов промышленных предприятий и выделить почвенные участки, на которых сложно либо невозможно получить полноценный санитарно чистый урожай.</p>

\*E-mail: [fateev.ohrana@gmail.com](mailto:fateev.ohrana@gmail.com); [k\\_smirnova@meta.ua](mailto:k_smirnova@meta.ua)

### 1. Факторы, определяющие актуальность учета загрязнения почв в бонитировочных работах

В Украине по нашим расчетам наличествует около 1606 тыс. га сельхозугодий с опасным и чрезвычайно опасным уровнем загрязнения почв тяжелыми металлами. Помимо этого, более 25 тыс. га техногенно загрязненных земель, используемых для выращивания сельскохозяйственной продукции, расположены вдоль автомобильных магистралей страны. Превышение величин нормативных показателей по содержанию тяжелых металлов в почве отмечается в локальных очагах загрязнения вблизи крупных промышленных центров, где активно пересекается промышленная и сельскохозяйственная деятельность человека. Также на территории страны существуют отдельные биогеохимические провинции с аномально высоким фоновым содержанием тяжелых металлов, в которых довольно сложно получить гигиенически чистую растительную продукцию [1].

При проведении бонитировочных работ в Украине не принято учитывать содержание токсикантов в почвах, их влияние на урожайность с.-х. культур, санитарно-гигиенические характеристики выращиваемой продукции, влияние на здоровье людей, с.-х. животных и другие подобные аспекты продовольственной безопасности. Вследствие этого загрязненные почвы, как правило, оцениваются на одном уровне с незагрязненными участками, и получают аналогичные баллы качественной оценки. Даже последние научные разработки в области бонитировки почв ограничиваются всего лишь приблизительными экспертными оценками, к тому же, только для частных бонитетов по овощным культурам и, исключительно, на почвах легкого гранулометрического состава [2].

Отсутствие в Украине необходимых наработок по бонитировке техногенно загрязненных почв связано не только с аспектами, требующими достаточного теоретического и экспериментального обоснования (различная реакция культур на действие тяжелых металлов, синергизм и антагонизм различных загрязнителей и т.д.). Основной причиной является банальная нехватка достаточного количества лабораторных и полевых экспериментальных данных, полученных на основе современных методов анализа почв [3]. Речь идет о методах, изложенных в последних национальных стандартах (ДСТУ) и национальных стандартах, гармонизированных с международными стандартами (ДСТУ ISO).

## 2. Современные модели оценки качества почв

Известно, что в оценке сельскохозяйственных земель развитых стран широко распространена тенденция синонимизировать понятия «качество почвы» («*soil quality*») и «здоровье почвы» («*soil health*») [4, 5, 6]. Термин «качество почвы» определяют как "пригодность для использования" и "способность почвы функционировать", то есть характеризовать способность почвы выполнять свои основные функции по назначению.

Поскольку почва является живой экосистемой, фактически домом для миллиардов бактерий, грибов и других микроорганизмов, обеспечивает растения питательными веществами, абсорбирует и удерживает воду для растений, служит фильтром и буфером для потенциальных загрязнителей и средой для живого биоразнообразия, в отношении нее (как и других живых организмов) применяется термин «здоровье» [7]. Поэтому «здоровье почвы» воспринимается, как непрерывная способность почвы функционировать в виде важной живой экосистемы в границах экосистемы и землепользования, способствовать качеству воздушной и водной среды, поддерживать биологическую продуктивность, состояние растений, животных и здоровье человека [8].

Соответственно, оценка здоровья почвы («*soil health assessment*») является оценкой того, насколько хорошо почва выполняет свои функции в настоящее время, и как эти функции сохраняются для будущего использования. Списки индикаторов оценки качества почв и алгоритмы расчетов определяются целью и задачами осуществления *soil health assessment* или *soil quality assessment* (украинский аналог - «бонитировка почв»). Вместе с тем, несмотря на восприятие почвы как сложной комплексной живой системы, эти списки весьма развернуты и включают широкий перечень физических, физико-химических и биологических свойств почвы, а также климатических факторов и производственно-технологических особенностей.

В связи с этим, большинство современных западных моделей оценки качества почв являются сложными многокомпонентными системами, в которых все критерии оцениваются с использованием нечетких функций членства с помощью весовых коэффициентов [9]. Характеристикам, которые точно соответствуют определенным классам, присваивают членство, остальные получают членство значения в зависимости от степени их близости к определенному классу. Выбор весовых коэффициентов, получаемых на основе экспертных знаний и данных местных советов, экспериментальных данных, предыдущих методов оценки земли и др., имеет решающее значение.

В методиках бонитировки почв, разрабатываемых в странах бывшего Советского Союза и Восточной Европы [3, 10, 11], традиционно используют несколько модифицированные алгоритмы. Их основное отличие заключается в избирательном учете дополнительных почвенных характеристик, которые имеют локальный характер проявления и не оказывают существенного влияния на качество почв большей части оцениваемой территории. Речь идет о таких негативных почвенных явлениях, как засоление, солончатость, эродированность, дефляция, гидроморфность, повышенная кислотность, загрязнение и др. При наличии признаков проявления подобных процессов в оцениваемой почве алгоритм расчета баллов бонитета предусматривает привлечение соответствующих корректирующих (поправочных) коэффициентов. Величины поправочных коэффициентов определяются по данным экспериментальных исследований (собственных и литературных источников) как разница между уровнем урожая сельскохозяйственных культур на контрольных и опытных вариантах [12, 13].

## 3. Методика исследований

На протяжении последних лет в отделе охраны почв ННЦ «ИПА имени А.Н. Соколовского» был собран и проанализирован значительный объем экспериментальных данных, на основе которых создана новая ГИС «Микроэлементы в почвах Украины». Полевые исследования пространственного распределения в почвах подвижных форм микроэлементов (МЭ) и тяжелых металлов (ТМ), а также границ его колебания, проводились по нерегулярной сетке с географическим позиционированием с помощью GPS-навигатора. Также использовались данные базовых разрезов, заложенных сотрудниками «ННЦ ИПА имени А.Н. Соколовского» и других организаций (сеть областных филиалов ГУ «Институт охраны почв Украины»). Изучали различные почвы сопряженных геохимических ландшафтов, находящихся в различных климатических условиях. В общей сложности были обследованы и проанализированы образцы из почти 3000 точек отбора во всех административных областях Украины.

С помощью серии модельных и микрополевых опытов в течении нескольких лет были исследованы такие факторы: 1) подвижность микроэлементов в почвах различных

почвенно-климатических зон Украины, в т. ч. под влиянием различных сельхозкультур; 2) влияние длительного применения минеральных и органических удобрений в стационарных опытах на загрязнение почвы (Ерастовская, Красноградская, Розовская, Измаильская опытные станции, опытные хозяйства ИЗХ УААН, Запорожской ГСХОС и др.); 3) явления синергизма и антагонизма между ТМ в почве (влияние различных уровней загрязнения на содержание в почве тяжелых металлов); 4) влияние ТМ на изменение агрохимических и биологических показателей почвы, количество и качество урожая зональных сельхозкультур.

Для достижения единства между результатами измерений и минимизации систематической составляющей погрешностей содержания в почве подвижных форм МЭ/ТМ (в экспедиционных и стационарных исследованиях) определяли на одном приборе - атомно-абсорбционном спектрофотометре "Сатурн-4". Полученную в 3-кратной повторности аналитическую информацию статистически обрабатывали с использованием модулей корреляционного, регрессионного и дисперсионного анализов в рамках пакета Statistica 10.0 с подтверждением достоверности.

Для построения картосхем на основе ГИС использовали геостатистический метод исследования – кригинг (статистическая версия интерполяции). В качестве картографической основы использовали карту почв Украины масштаба 1 : 2500000 (под редакцией Н.К. Крупского), региональные карты масштаба 1 : 200000 (под редакцией Н.К. Крупского) и карту «Почвенно-экологическое районирование Украины» 1:6000000, под редакцией Н.И. Полупана, В.Б. Соловья, В.А. Величко. Для уточнения границ административных районов, населенных пунктов и сети дорог, использовали топографические карты масштаба 1:200000. Классификация пространственных данных осуществлялась группированием цифровых значений одного атрибута (содержания МЭ и ТМ).

Полученные результаты исследований были использованы для разработки научно обоснованной системы оценки качества техногенно загрязненных почв по содержанию тяжелых металлов.

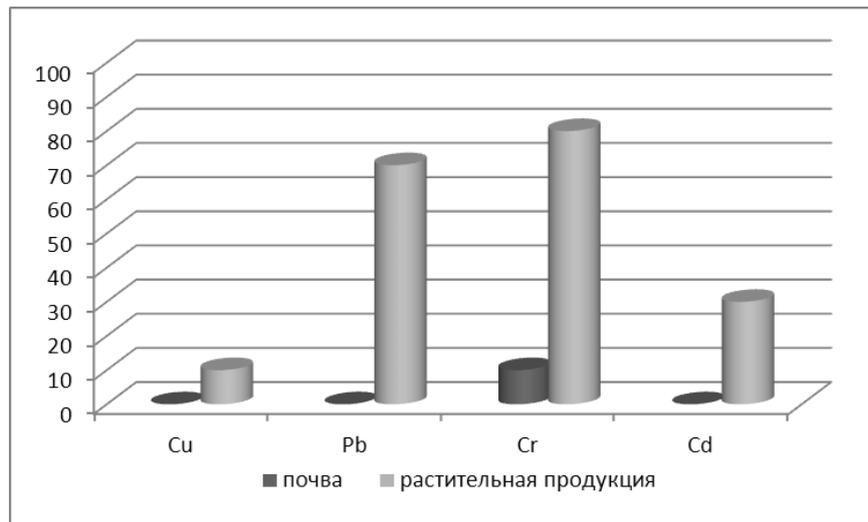
#### **4. Концептуальный подход к бонитировке почв по содержанию тяжелых металлов**

Учитывая, что загрязнение почв тяжелыми металлами в Украине имеет очаговое распространение, а площадь загрязненных с.-х. земель составляет лишь небольшую часть от общей площади пахотных почв страны, нам представляется вполне логичным использовать традиционные алгоритмы оценивания негативных параметров почв, т.е. учитывать отрицательный эффект токсикантов с помощью поправочных коэффициентов.

Другим немаловажным вопросом в оценивании техногенно загрязненных почв является несоответствие между содержанием доступных форм тяжелых металлов в почве и растениях. В первую очередь, речь идет о способности выращиваемых с.-х. культур накапливать ТМ из окружающей среды вблизи оцениваемой почвы (атмосферный воздух, осадки, сточные и оросительные воды). Так, результаты наших исследований, проведенных в течение 10-15 лет в зонах атмосферных выбросов предприятий энергетической и химической промышленности (Змиевская теплоэлектростанция (ТЭС) и Авдеевский коксохимический комбинат), свидетельствуют об аэротехногенном происхождении избыточного содержания Fe, Cd, Ni, Cr, Pb и Cu в растительной продукции при относительно невысоком содержании ТМ в почвах (Рис. 1, 2).

Избыточность содержания Cr, Ni и Pb в почвах и растениях определяли относительно предельно допустимой концентрации (ПДК) или максимально допустимого уровня (МДУ), Cd и Fe - только ПДК в продовольственном сырье и МДУ в кормах для с.-х. животных (из-за отсутствия соответствующих нормативов ПДК в почвах).

В результате этой работы мы пришли к выводу, что осуществление процедур оценки и сертификации земель с.-х. назначения требует обязательного включения анализов тест-растений по эколого-токсикологическим показателям, поскольку из-за несовершенства почвенной диагностики невозможно точно оценить риски загрязнения растительного сырья. Тестирование растений на содержание ТМ также позволяет дать ответ на другой вопрос: «имеет ли смысл отделять природное происхождение аномально высокого содержания тяжелых металлов в почвах от антропогенного?». Главными индикаторами здесь являются реакция с.-х. культур и уровень накопления в них ТМ, то есть, количество и качество урожая.



**Рис. 1.** Техногенное загрязнение тяжелыми металлами под влиянием выбросов Змиевской ТЭС, % от общей площади обследования с содержанием тяжелых металлов выше ПДК (МДУ)



**Рис. 2.** Техногенное загрязнение тяжелыми металлами под влиянием выбросов Авдеевского коксохимического комбината, % от общей площади обследования с содержанием тяжелых металлов выше ПДК (МДУ)

Эти и другие аспекты были заложены в основу разработки нового концептуального подхода к бонитировке почв по содержанию тяжелых металлов в Украине. Помимо выше упомянутого имеет смысл учитывать следующие факторы:

1. Распространенность тех или иных видов ТМ на территории оценивания, наличие соответствующей нормативной базы, возможность получения и обновления массивов фактических данных по всей площади оцениваемых с.-х. земель;

2. Влияние отдельных МЭ/ТМ на плодородие почвы, производительность с.-х. культур, качество урожая, жизнедеятельность и состояние здоровья живых организмов (микроорганизмов, растений, животных и людей) может быть не только негативным, но и положительным. Например, речь идет о таких металлах, как медь, цинк, кобальт, молибден, хром, которые в небольших концентрациях являются МЭ, необходимыми для нормального роста и развития живых организмов;

3. Возможное наличие полиэлементного загрязнения почв и растениеводческой продукции под действием эмиссии предприятий и, как следствие, явления синергизма и антагонизма различных загрязнителей, а также подвижность, биологическая доступность, фитотоксичность различных соединений ТМ и толерантность с.-х. культур к воздействию токсикантов;

4. Различные потребности растений в микроэлементах и особенности накопления металлов отдельными видами с.-х. культур, что предполагает необходимость выбора основных культур для расчета общего и частных бонитетов почв;

5. Способность с.-х. культур накапливать ТМ из окружающей среды вокруг оцениваемой почвы (атмосферный воздух, осадки, сточные и оросительные воды);

6. Наличие различных методов определения содержания ТМ в почвах. Необходимы методы, имеющие широкое распространение на территории Украины, достаточно современные, которые применяются как наукой, так и производством, более или менее точно отражают количество биологически доступных растением соединений, и по которым уже собрано достаточное количество массовых данных по содержанию ТМ в почвах и х культурах на территории Украины. Поэтому для целей бонитировки почв Украины сейчас целесообразно ориентироваться на методы атомно-абсорбционной спектрофотометрии с использованием буферной аммонийно-ацетатной вытяжки с рН 4,8 по ДСТУ 4770.1-4770.9 для почвы; МВИ 31-497058-016 и для растительной продукции.

7. Буферная способность почв по отношению к тяжелым металлам, характеризующая возможность почвы поддерживать содержание биодоступных форм этих элементов на относительно постоянном уровне и противостоять внешним факторам воздействия, направленным на смещение этого уровня.

8. Возможность разбавления (смешивания) сельхозпродукции, имеющей чрезмерное и дефицитное содержание микроэлементов для достижения оптимального качества и сохранения возможности использования загрязненных почв в аграрном производстве.

9. Универсальность системы оценки качества техногенно загрязненных почв по содержанию тяжелых металлов, что позволит применять ее с различными методиками бонитировки почв.

Все перечисленные условия мы постарались учесть при разработке алгоритмов оценки качества почв по содержанию тяжелых металлов (Рис. 3). В дальнейшем на основе этого алгоритма будет разработана универсальная система (серия оценочных шкал) модификационных критериев на содержание тяжелых металлов в почвах пашни, сенокосов и пастбищ, распределенных по классам буферности почв относительно тяжелых металлов для целей общей и частной бонитировки почв.

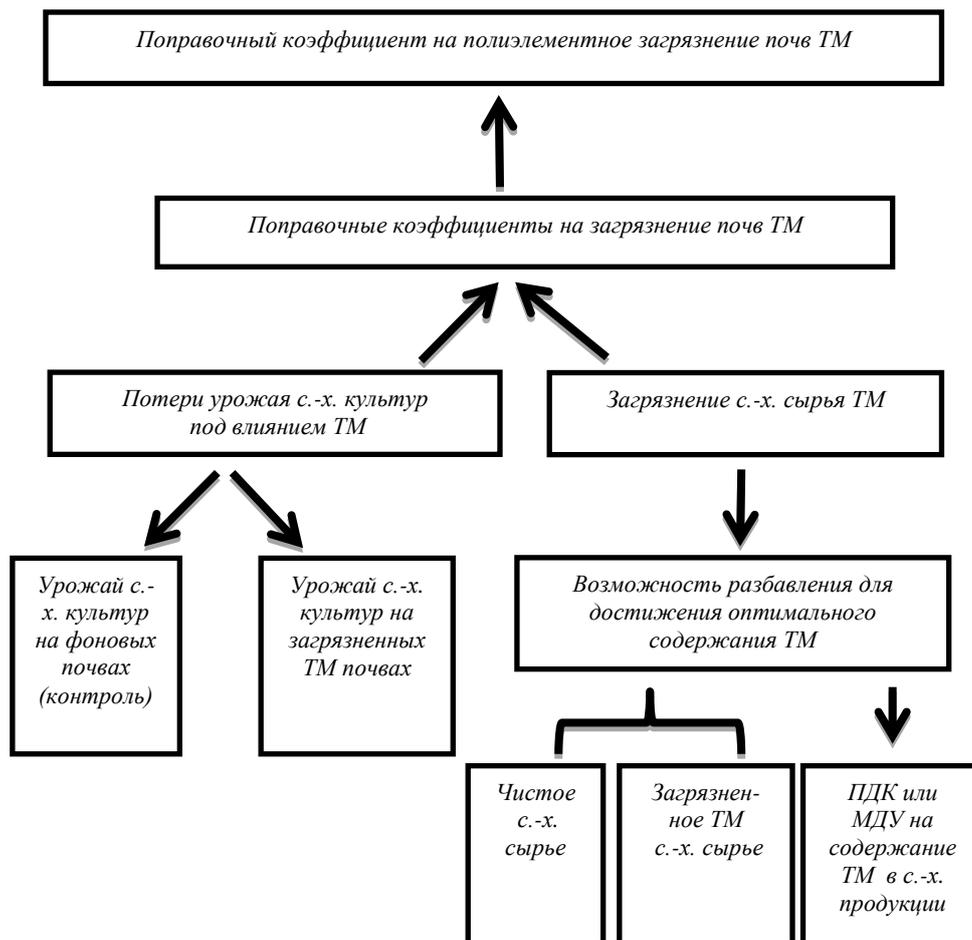


Рис. 3. Алгоритм оценки качества почв по содержанию тяжелых металлов (схема)

### Список цитированной литературы

1. *Дмитрук Ю.М.* Эколого-геохимический анализ ґрунтового покрыву агроэкосистем. Чернівці: Рута, 2006. 328 с.;
2. *Кисель В.И.* Загрязнение почв тяжелыми металлами. В кн.: Агроэкологическая оценка земель Украины и размещение сельскохозяйственных культур. Под ред. В.В. Медведева. К.: Аграрная наука, 1997. С. 114-125.;
3. *Медведев В.В., Плиско И.В.* Бонитировка и качественная оценка пахотных земель Украины X.: Друкарня № 13, 2006. 386 с.;
4. *Allen D.E., Singh B.P., Dalal R.C.* Soil Health Indicators Under Climate Change: A Review of Current Knowledge / In book "Soil Health and Climate Change", editors: Bhupinder Pal Singh, Annette L. Cowie, K. Yin Chan. Berlin: Publisher "Springer Berlin Heidelberg". Vol. 29 of the series Soil Biology. 2011. P. 25-45.
5. *Patra A.K., Lenka N.K., Biswas A.K.* Soil Health Assessment and Management Issues and Strategies. Indian Journal of Fertilisers. 2015. Vol. 11 (12). P.16-25.
6. *Wolfe D.* Approaches to monitoring soil systems. In: Uphoff N., Ball A., Fernandes E., Herren H., Husson O., Laing M., Palm Ch., Pretty J., Sanchez P., Sanginga N., Thies J. eds. Biological approaches to sustainable soil systems. Boca Raton: FL: Taylor & Francis/CRC Press, 2006. pp. 671–681.
7. *Guidelines for Soil Quality assessment in Conservation Planning / Friedman D., Hubbs M., Tugel A. [et al.], Editor B. Joubert.* 2001. 48 p.;
8. *Doran J.W., Safley M.* Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In: Pankhurst, C.E.; Doube, B.M.; Gupta. V.V.S.R., eds. Biological indicators of soil health. CAB International, Wallingford, UK, 1997. p. 1-28.;
9. *De la Rosa D., van Diepen C.A.* Qualitative and quantitative land evaluations. In: 1.5. Land Use and Land Cover, in Encyclopedia of Life Support System (EOLSS-UNESCO), Eolss Publishers. Oxford, UK, 2002. URL: [http://www.eolss.net].;
10. *Редько М.В.* Бонитировочная оценка почв сельскохозяйственных угодий с учетом их загрязненности тяжелыми металлами на примере Московской области: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. биол. наук: [спец] 03.00.27 «Почвоведение». МГУ имени М.В. Ломоносова. Москва, 2009. 25 с.;
11. *Кадастровая оценка сельскохозяйственных земель сельскохозяйственных организаций и крестьянских (фермерских хозяйств).* Содержание и технология работ. Утвержден и введен в действие приказом Государственного комитета по имуществу Республики Беларусь 28.03.2011 г. № 98. 138 с.
12. *Кузьмичов В.П., Дерев'янюк Р.Г.* Сучасні поправочні коефіцієнти на механічний склад та еродованість ґрунтів при їх бонітуванні. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Вип. 44. 1982 р. С. 3-7.
13. *Серый А.И.* Поправочные коэффициенты при бонитировке почв. *Почвоведение*. 1984. № 3. С. 114-125.

UDC 631.147:631.416.9:631.81.095.337

### The system for assessment of anthropogenic contaminated soils on heavy metals content

A.I. Fatjejev\*, E.B. Smirnova\*

NSC "Institute of Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky", Kharkiv, Ukraine

\*E-mail: fateev.ohrana@gmail.com; k\_smirnova@meta.ua

The aim of the review article is to present a new conceptual approach to the soil quality assessment by the content of heavy metals in the modern context of soil quality and soil health concepts. The article shows the main problems of contaminated soil assessment in Ukraine and suggests the best ways of solving them from the point of the authors view. The new assessment system proposes the development of a modification criteria series for general and individual soil indexes, taking into account the buffering of soils, the presence of different pollutants, synergism, antagonism and bioavailability of heavy metals, crops tolerance and the possibility of mixing and diluting plant products with excessive and deficient trace elements content. The authors proposed to use the yield quality criteria by ecological-toxicological indicators in the algorithms for calculating soil indexes. Unlike soil diagnostics, plant testing allows to determine precisely the areal of phytotoxic industrial emissions and to identify soil areas where it is difficult or impossible to obtain uncontaminated agricultural products.

**Key words:** heavy metals; trace elements; micronutrients; soil quality; soil health; soil assessment; soil contamination; food security; test plants.