



## Original researches

## The Dynamics and Diagnosis of the Toxic Effects of Contaminated Soil on the Stability of Seedlings Wheat Furious

Received: 8 June 2018  
Revised: 31 June 2018  
Accepted: 2 July 2018

P. V. Pisarenko, M. S. Samojlik, L. A. Kolesnikova, I. L. Plaksiyenko  
*Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine*

Poltava State Agrarian Academy,  
Skovkrody, st, 1/3, Poltava, 36003, Ukraine

Tel.: +38-066-405-20-79  
E-mail: nil@pdaa.com.ua

**Cite this article:** Pisarenko, P. V., Samojlik, M. S., Kolesnikova, L. A., Plaksiyenko, I. L. (2018). The dynamics and diagnosis of the toxic effects of contaminated soil on the stability of seedlings. *Agrology*, 1(3), 240–246. doi: 10.32819/2617-6106.2018.13002

**Abstract.** Ukraine is such a country where agricultural sector of industry is highly developed. Soil surface is the greatest national wealth. The life quality of the whole population depends on its condition. Agricultural soils have the highest priority in protection and utilization among other soils; and unfortunately just agricultural soils come under man-made influence to the utmost. Poltava oblast has one of the richest natural resources of Ukraine – fertile soils. It was investigated the germination and early development of vegetative organs of spring wheat that was chosen as the test plant for determination of phytotoxicity of different levels of the modulated oil contamination of soil in Poltava region. Macroscopic and morphometric experiment of structural changes in vegetative organs were conducted fourth leaf of the seedlings of wheat spring. New method of identification morphometric features of lamina by of homotopic geometrical models was offered. The usage of homotopic geometrical models feature the minimization of fault of the morphometric measuring gives the opportunity and to use the classic metrics for research of structural changes of cuts, to conduct the analysis of dynamics and determine the orientation of structural changes of biological objects in experimental terms. Investigated the dynamics of spring wheat seedlings mikromorfologiyi depending on the content of crude oil in the soil. Found that small amounts of oil pollution (5 ml/kg) stimulate anabolic processes in the leaf blade, which is manifested in increasing their size and number of structural elements. with relatively large doses of oil contamination of soil (30 ml/kg) mass of soil significantly retards the development of structural elements of the leaf blade. The conducted researches and morphometric data gave an opportunity to discover three basic effects of influence on the germination and early development of spring wheat under conditions of the modulated oil pollution of the soil (5, 10, 20, 30, 40, 50 ml/kg). The first effect is stimulant, favorable influence of the small doses of oil ( $\leq 5$  ml/kg) on germination and growth of spring wheat. The second effect is resistance. It is revealed in tolerance of wheat furious in action of oil contamination of soil (10–20 ml/kg). The third effect is phytotoxic. The first morphological signs of oppression of seed germination and deceleration the growth of seedlings of spring wheat in the condition of oil contamination of soil ( $\geq 20$  ml/kg) are revealed. An increase in the concentration of oil contamination of the soil to 50 ml/kg of leads to a delay in the growth of seedlings, a decrease in the amount of chlorenchyme in the leaf plate, destruction and death of wheat furious.

**Keywords:** leaf plate, morphometric indexes, agroecosystem, approximation, homotopic geometrical models.

## Динаміка і діагностика токсичного впливу нафтозабрудненого ґрунту на стійкість проростків пшениці ярої

П. В. Писаренко, М. С. Самойлік, Л. А. Колеснікова, І. Л. Плаксієнко  
*Полтавська державна аграрна академія, м. Полтава, Україна*

**Анотація.** Як і в цілому по Україні, питання охорони земель на Полтавщині залишаються надзвичайно гострими. До земель сільськогосподарського призначення входять і землі, які з різних причин нині не використовуються під вирощування сільськогосподарських культур, зокрема нафтозабруднені угіддя. Ці землі в області становлять незначний відсоток, але вони помітно можуть вплинути на прибутки аграрних підприємств. Нехтування земельними ресурсами, звичайно, йде в розріз з вимогами раціонального природокористування. Найбільш нестійкими в екологічному відношенні є ті райони, в яких розорані землі піддаються техногенному навантаженню і значно переважають над умовно стабільними угіддями. Досліджено ранній розвиток вегетативних органів пшениці ярої, що була вибрана як тест-рослина для визначення фітотоксичності різних рівнів змодельованого нафтового забруднення ґрунту Полтавського регіону. Показано, що новий спосіб апроксимації зрізів біооб'єктів складної форми гомотопними плоскими геометричними моделями сприяє мінімізації похибки морфометричних вимірювань, дає можливість використовувати

вати класичну метрику для дослідження структурних змін зрізів, визначати направленість структурних змін біологічних об'єктів в експериментальних умовах. Досліджено динаміку мікроморфології проростків пшениці ярої залежно від умісту сирої нафти в ґрунті. Малі дози нафтового забруднення (5 мл/кг) стимулюють процеси анаболізму в листковій пластинці, що проявляється в збільшенні розмірів листків і кількості структурних елементів. За відносно великих доз нафтового забруднення (30 мл/кг) маси ґрунту суттєво затримується розвиток структурних елементів ЛП. Проведені експерименти та морфометричні дані дали змогу виявити в умовах змодельованого нафтового забруднення ґрунту (5, 10, 20, 30, 40, 50 мл/кг) три основні ефекти впливу на ранній розвиток рослин пшениці ярої. Перший ефект – стимулюючий; сприятливий вплив малих доз нафти ( $\leq 5$  мл/кг) на ріст рослин пшениці ярої. Другий ефект – резистентність; проявляється в толерантності рослин пшениці ярої до дії нафтового забруднення ґрунту в дозі 10–20 мл/кг. Третій ефект – фітотоксичний. За умов нафтового забруднення ґрунту в дозі  $\geq 20$  мл/кг виявляються перші морфологічні ознаки уповільнення росту проростків пшениці ярої. Збільшення концентрації нафти до 50 мл/кг ґрунту призводить до затримки росту проростків, зменшення кількості хлоренхіми в листковій пластинці, до деструкції і загибелі рослин пшениці ярої.

**Ключові слова:** листкова пластинка, морфометричні показники, агроєкосистема, апроксимація, гомотопні геометричні моделі.

## Вступ

В умовах глобалізації та світової тенденції переходу на збалансований розвиток сучасна інтенсифікація темпів розвитку української економіки сировинної орієнтації, що супроводжується забрудненням компонентів навколишнього середовища, ініціює необхідність забезпечення екологічно безпечного розвитку економіки країни та її регіонів. Того ж часу в результаті постійної деградації ґрунтів, через недооцінку реальної загрози, яку вона являє собою для теперішнього і особливо наступних поколінь, незбалансованого і науково необґрунтованого землекористування в регіонах України спостерігається щорічне збільшення еколого-економічного збитку за забруднення ґрунтів (Rudko, 2013; Melnik, 2012; Samojlik, 2014; Pisarenko, 2009).

Сучасним пріоритетним елементом аграрного сектору України вважається нафтогазовидобувний комплекс, який перетворився на один із найнебезпечніших джерел забруднення довкілля. В Україні промислово розробляються близько 200 родовищ, що є базою нафтогазової промисловості. На сьогоднішній день в промисловій експлуатації знаходяться 47 родовищ, експлуатуються 2 газосховища. Перспективним за видобутку нафти і газу вважається Донецько-Придніпровський регіон, в якому зосереджено майже 85% ресурсів вуглеводнів країни (Penderetsky, 2004; Rudko & Adamenko, 2009). Підкреслимо, що підприємства паливно-енергетичного комплексу здійснюють значне техногенне навантаження на довкілля. Так, викиди енергетичної галузі становлять близько 40% викидів усіх секторів економіки (Storchak et al., 2015).

Проблемі вивчення рівня надходження, акумуляції, міграції, перетворення нафти й нафтопродуктів у ґрунтах присвячені праці відомих вітчизняних та зарубіжних дослідників (Pisarenko & Kolesnikova, 2004; Sklyar & Lebedev, 1962; Abbasov & Musaev, 1998; Wierzbicki, 2013; Ubani et al., 2013; Jones et al., 2014; Baguley et al., 2015; Edge et al., 2016; Frascchetti et al., 2016; Hsing et al., 2013; Joye et al., 2016; Kark et al., 2015; Kleindienst et al., 2015; Lanzen et al., 2016; Ziervogel et al., 2014; Sun et al., 2015; Mitchell et al., 2015). Проте ґрунти України, зокрема Полтавщини, в цьому плані є малодослідженими.

Порівняння табличного матеріалу картотек показує, що всі нафти Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) за фізико-хімічними й технологічними властивостями близькі між собою і характеризуються підвищеним умістом світлих фракцій, википаючих до 350 °C, малим умістом сірки, смоли, парафіну та мікроелементів (Sklyar & Lebedev, 1962). Виняток – нафта Решетняківського родовища густиною 0,7969, в'язкістю за 50 °C 1,72 сс<sub>т</sub>, з температурою застигання 22,0 °C (Abbasov & Musaev, 1998; Pisarenko & Kolesnikova, 2004). З огляду на опублікований матеріал, характеристики товарних якостей нафти Решетняківського родовища й нафт ДДЗ суттєво відріз-

няються: підвищеним умістом фракцій, википаючих до 350 °C, і парафінів – 4,55%. Уміст світлих фракцій, википаючих до 300 °C, дорівнює 63,8%; із них на частку бензинових фракцій припадає 45,0%. Найбільший вихід вуглеводнів отриманий під час обробки решетняківської нафти: із фракції 150–350 °C – 24,2%; 200–350 °C – 28,4%. Бензинові фракції початку кипіння 140–200 °C містять у незначній кількості (4–7%) ароматичні вуглеводні. У результаті фракціонування дистиляцією вуглеводнів, які утворюють комплекс з карбамідом, встановлено, що нафта Решетняківського родовища містять компоненти, близькі за своїми фізико-хімічними властивостями до нормальних парафінових вуглеводнів C<sub>10</sub>–C<sub>24</sub>, які є цінною сировиною для нафтохімічної промисловості та важливою характеристикою в процесі вивчення нафтових розливів на ґрунтах.

Із метою детального дослідження негативного впливу нафти на систему “ґрунт–рослина”, з огляду на дані щодо фізико-хімічних особливостей забруднювача, зони експлуатації родовища відносно аграрного сектору, була вибрана нафта Решетняківського родовища Новосанжарського району, одного з найбільших на Полтавщині. Крім цього, для згаданого нафто- і газосносного району аграрне виробництво є однією з провідних галузей економіки області й спеціалізується на вирощуванні зернових. За зведеними даними науковців Полтавської державної аграрної академії, значні площі родючих земель Полтавщини, що зазнають техногенного навантаження, мають середній, високий і досить високий рівень забруднення нафтою й нафтопродуктами (Pisarenko, 2009; Samojlik, 2014). Унаслідок цього суттєво погіршується водний, повітряний та поживний режими ґрунтово-покриву сільськогосподарських угідь Полтавської області.

Мета статті – дослідити особливості токсичного впливу різних рівнів нафтового забруднення ґрунту на стійкість сільськогосподарських культур (на прикладі пшениці ярої) та виявити взаємозв'язки між умістом сирої нафти в ґрунті та проявом тест-відгуків модельної рослини.

## Матеріал і методи досліджень

У посудини з ґрунтом вносили сиру нафту густиною 0,7969 г/мл, що характеризується підвищеним умістом парафіну – 4,55%, низьким умістом смол, асфальтенів і сірки, висивали по 100 каліброваних насінин пшениці, здійснюючи спостереження за її схожістю, ростом і розвитком на різних фазах вегетації. Повторність у досліді – чотириразова, закладка одночасна. До контрольної групи входили четверті листки проростків пшениці ярої, вирощені на ґрунті, що не містив компонентів сирої нафти. Для мікроскопічних морфометричних досліджень вирізували центральну частину листкової пластинки (ЛП) шириною 1–2 мм по 5 проростків у кожній групі спостережень. Біозразки готували згідно з класичною методикою для електронної мікроскопії (Skvortsov, 1970; Gritsayenko, 2003). Одним із проявів адаптації рослин до впливу екологічних стресів

є зміна геометричних характеристик листків ранньої стадії вегетації, що безпосередньо впливає на структуру мезофілу і, як наслідок, – на фотосинтетичний потенціал рослин у цілому (Veselova et al., 1993).

Поперечні зрізи ЛП проростків пшениці мають досить складну форму. Геометричною мовою, поперечний розріз ЛП представлений “випукло-ввігнутою” протяжною плоскою фігурою, площа якої обмежена замкненою “хвилеподібною” кривою. Така форма розрізів ЛП є складною для проведення морфометричних досліджень і якісного мікроморфометричного опису. Суттєві труднощі виникають під час вибору первинних метричних показників для характеристики динаміки форми зрізів ЛП, що потім використовуються для визначення похідних (вторинних) параметрів і зіставлення кількісної інформації, що отримується в результаті проведених експериментів. Для характеристики зрізів біоб’єктів складної форми в практиці морфометричних досліджень зазвичай використовують апроксимовані фігури (Saltikov, 1970). Складний контур розрізу мікрооб’єкта “трансформується” в одну з найпростіших геометричних фігур типу: круг, еліпс, квадрат, ромб, прямокутник і т. п. (Alexandrov, 1990). Така “модельна” трансформація форми зрізів реальних біоб’єктів у прості геометричні фігури дає можливість суттєво спростити проведення морфометричного аналізу, використовуючи відому метрику класичних геометричних фігур та відповідні математичні формули (Beskin, 1981; Starkov, 2008).

### Результати

У практичній геометрії форму протяжних обмежених фігур оцінюють за допомогою показника “фактор форми” (Tsikunov, 2006). Заявлений параметр – це відношення двох найбільш характерних метричних величин досліджуваної фігури, взятих у відповідних стехіометричних коефіцієнтах, для отримання безрозмірної величини (табл. 1). Найчастіше як показник фактора форми використовують відношення площі фігури (S) до квадрата її периметра (P<sup>2</sup>):

$$\Phi = S / P^2. \quad (1)$$

**Таблиця 1.** Морфометричні показники поперечних розрізів ЛП четвертого листка проростків пшениці ярої (M±m)

Параметри листової пластинки (1)		
Показник	Контроль	Експеримент, 30 мл/кг
S, мк <sup>2</sup>	406 000 ± 1000	300 000 ± 1000
L <sub>з</sub> , мк	3330 ± 100	2670 ± 80
L <sub>в</sub> , мк	3560 ± 150	2740 ± 80
L <sub>с</sub> , мк	3100 ± 100	2372 ± 80
P, мк	6890 ± 250	5410 ± 180
Φ	0,0085	0,010
H <sub>max</sub> , мк	216 ± 10	208 ± 10
h <sub>min</sub> , мк	80 ± 5	70 ± 5
H <sub>с</sub> , мк	148 ± 10	139 ± 10
L <sub>с</sub> / H <sub>с</sub>	21 : 1	17 : 1

*Примітки:* S – площа поперечного перетину ЛП; L<sub>з</sub> – довжина зовнішнього контуру зрізу ЛП; L<sub>в</sub> – довжина внутрішнього контуру зрізу ЛП; L<sub>с</sub> – середня довжина ЛП; P – периметр поперечного перетину ЛП; Φ – фактор форми; H<sub>max</sub> – товщина поперечного розрізу ЛП на вершині центрального гребеня; h<sub>min</sub> – мінімальна товщина зрізу ЛП у глибині впадини, що розміщена на краю ЛП; H<sub>с</sub> – середня товщина ЛП; L<sub>с</sub> / H<sub>с</sub> – співвідношення середньої довжини ЛП та середньої товщини ЛП.

У такий спосіб отримані числові дані фактора форми ЛП у контролі (0,0085) й експерименті (0,010). Отже, якщо еквівалентною фігурою реального розрізу ЛП обрати модель у формі видовженого прямокутника, то співвідношення числових значень більшої й меншої сторін у контролі становитимуть приблизно 30 : 1, а в експерименті – 20 : 1. Для апроксимації форми зрізів біо-структур, у тому числі й поперечних розрізів ЛП, використовують різні моделі (багатогранних) протяжних геометричних фігур. У даній роботі (як приклад) використано три геометричні моделі.

**Геометрична модель 1.** Протяжний прямокутник, у якому більша сторона (L) рівна напівпериметру (P / 2) контуру зрізу ЛП проростка пшениці. Меншу сторону модельного прямокутника визначали за формулою

$$H_c = (H_{max} + h_{min}) / 2, \quad (2)$$

де H<sub>max</sub> – товщина поперечного розрізу ЛП на вершині центрального гребеня; h<sub>min</sub> – мінімальна товщина зрізу ЛП у глибині впадини, розміщеної на краю ЛП.

У моделі 1 використані три лінійні параметри, характерних для реальної ЛП. Результати визначення числових показників похідних параметрів даної геометричної моделі (табл. 2; індекс 2) підтверджують, що площа фігури, апроксимованої прямокутником, набагато перевищує значення даного показника реального зрізу ЛП: у контрольній групі – в 1,26 раза, в експериментальній – в 1,25 раза. Величини периметрів апроксимованих прямокутників близькі до значень цих показників зрізів реальних ЛП. У контрольній групі відношення P<sub>прям</sub> / P<sub>ЛП</sub> для четвертого листка проростка пшениці ярої дорівнює 1,04, а в експериментальній – 1,05. Однак фактор форми модельних прямокутників в 1,3 раза більший значення даного показника зрізів ЛП в обох групах спостережень. Коефіцієнт елонгації реальної ЛП у контролі дорівнює L<sub>с</sub> / H<sub>max</sub> = 3100 / 216 = 14,3; в експериментальній групі – 11,4 (2372 / 208). У геометричній моделі 1 коефіцієнт елонгації відповідно дорівнює 3445 / 148 = 23,3 та 2705 / 139 = 19,5. Таким чином, виходячи зі значень коефіцієнта елонгації, геометричні моделі суттєво відрізняються від реальних ЛП як у контролі, так і в експерименті.

**Таблиця 2.** Параметри апроксимованих прямокутників (2)

Показник	Контроль	Експеримент, 30 мл/кг
S, мк <sup>2</sup>	509 860	375 995
A, мк	3445	2705
B, мк	148	139
P <sub>1</sub> , мк	7186	5688
Φ	0,011	0,013
A / B	23 : 1	19 : 1

*Примітки:* S – площа апроксимованого прямокутника; P<sub>1</sub> – периметр апроксимованого прямокутника; A / B – співвідношення сторін апроксимованих прямокутників; A, B – відповідно більша та менша сторони апроксимованого прямокутника (2).

**Геометрична модель 2.** Поперечний зріз ЛП проростків пшениці апроксимований сплюсненим еліпсом. Менша вісь еліпса рівна максимальній товщині ЛП на вершині центрального гребеня, а більша – ширині ЛП (табл. 3; індекс 3). Для визначення периметра та площі еліпса використовували відповідні формули:

$$P = \pi (A + B); \quad (3)$$

$$S_{еліпса} = \pi (A \cdot B) \text{ при } B = H_{max} / 2; \quad A = L_c / 2. \quad (4)$$

Результати обчислень свідчать про те, що для контрольної групи периметр модельного еліпса в 1,32 раза менший, ніж периметр ЛП, а площа еліпса більша площі ЛП в 1,3 раза. Анало-

**Таблиця 3.** Параметри апроксимованих еліпсів (3)

Показник	Контроль	Експеримент, 30 мл/кг
S, мк <sup>2</sup>	525 887	387 485
A, мк	1550	1180
B, мк	108	104
P <sub>2</sub> , мк	5209	4052
Ф	0,019	0,024
A / B	14 : 1	11 : 1

*Примітки:* S – площа апроксимованого еліпса; A, B – відповідно більший і менший діаметри еліпса (3); P<sub>2</sub> – периметр апроксимованого еліпса; A / B – співвідношення сторін апроксимованих еліпсів.

**Таблиця 4.** Параметри гомотопних прямокутників (4)

Показник	Контроль	Експеримент, 30 мл/кг
S, мк <sup>2</sup>	406000	300000
A, мк	3330	2586
B, мк	122	116
P <sub>3</sub> , мк	6890	5410
Ф	0,0085	0,010
A / B	27 : 1	22 : 1

*Примітки:* S – площа гомотопного прямокутника; P<sub>3</sub> – периметр гомотопного прямокутника; A / B – співвідношення сторін гомотопних прямокутників; A – більша, B – менша сторони гомотопного прямокутника (2).

гічні дані отримані й в експериментальній групі. Так, периметр модельного еліпса в 1,33 раза менший за периметр ЛП, а площа еліпса в 1,29 раза перевищує площу ЛП. Фактор форми модельного еліпса в 2,2 раза більший, ніж значення для контрольної групи ЛП і в 2,4 раза більше аналогічного показника для експериментальної групи ЛП.

Геометричні моделі 1 і 2 на основі використання лінійних параметрів реальних ЛП (висота, ширина) суттєво відрізняються від реальних об'єктів за такими основними параметрами, як S, P, Ф.

**Геометрична модель 3.** На відміну від перших двох геометричних моделей, модель 3 за параметрами S, P, Ф відповідає реальним ЛП.

Як виявилось, параметри гомотопних прямокутників геометричної моделі 3 практично не відрізняються від кількісних показників поперечних зрізів ЛП в обох групах спостережень (табл. 4; індекс 4). Для вирішення труднощів, що виникають, нами розроблений та запропонований спосіб апроксимації форми зрізів ЛП гомотопними геометричними моделями. В основу способу закладений принцип “деформованого перетворення зображення зрізу листової пластинки” у форму гомотопного прямокутника, периметр (P), площа (S) і фактор форми (Ф) якого рівні за значенням цим метричним показникам реального досліджуваного зрізу. Отримані числові дані лінійних параметрів однотипних гомотопних моделей зрізів ЛП проростків пшениці ярої, вирощеної на ґрунтах із різною дозою нафтового забруднення, переконливо свідчать, що за дози нафтового забруднення 5 мл/кг ґрунту, збільшення площі поперечного зрізу ЛП четвертого листка пшениці ярої відбувається за рахунок збільшення розмірів її ширини (A) на 120% і товщини (B) на 131% відносно аналогічних параметрів ЛП контрольних рослин (табл. 5).

Більша сторона моделі (A), що відповідає ширині ЛП, за концентрації нафти 50 мл/кг зменшується до 73% відносно контролю, а менша сторона моделі (B) відповідає товщині ЛП

і становить порівняно з контролем 78%. Наведені дані дають підстави припустити, що в умовах проведеного експерименту спостерігається відносно нерівнозначне зменшення розмірів лінійних показників моделей ЛП. Незважаючи на зменшення площі та числових значень лінійних показників A і B гомотопних моделей поперечного перерізу, коефіцієнт елонгації їх форми ( $K_c = A / B$ ) змінюється в досить обмеженому інтервалі значень  $K_c$  (26; 28). Це свідчить про те, що навіть за несприятливих (нафтове забруднення ґрунту) умов розвитку проростків пшениці ярої простежується закон подібності форми ЛП. Із збільшенням умісту в ґрунті сирової нафти (від 10 мл/кг до 50 мл/кг), визначається прогресивне зменшення лінійних розмірів гомотопних моделей і, як наслідок, – суттєва зміна розмірів реальних зрізів ЛП.

Отримані результати кількісних показників проведеного морфометричного аналізу дали можливість встановити, що залежно від дози нафтового забруднення ґрунту суттєво змінюються розміри листової пластинки (табл. 6).

Відносно параметрів ЛП у нормі (ґрунт без нафтового забруднення) за концентрації сирової нафти в ґрунті 5 мл/кг визначається достовірне й суттєве збільшення площі поперечного перерізу ЛП в 1,52 раза. Приріст площі поперечного зрізу ЛП відносно норми становить 152%. Встановлено, що збільшення розмірів поперечного зрізу ЛП обумовлене суттєвим зростанням умісту кількості елементів у поліфункціональному структурному компоненті (ПСК), який являє собою сукупність клітин хлоренхіми, судинних пучків, механічної тканини. Якщо в нормі площа ПСК дорівнює  $\approx 290 \cdot 10^3$  мк<sup>2</sup>, то в умовах нафтового забруднення (5 мг/кг) ця величина збільшується в 1,65 раза. За нашими даними, у зрізах ЛП четвертого листка спостерігається збільшення площі хлоренхіми в 1,85 раза. Зростання розмірів ЛП супроводжується збільшенням протяжності та ширини пласта одношарового епідермісу. Сумарна площа зовніш-

**Таблиця 5.** Динаміка значень лінійних показників гомотопних моделей зрізів за різної дози нафтового забруднення ґрунту

Параметри моделі ЛП	Доза сирової нафти в ґрунті, мл/кг						
	0 контроль	5	10	20	30	40	50
A, мк	3430	4100	3300	3100	2770	2570	2500
%	100	120	96	90	81	75	73
B, мк	122	160	124	113	108	97	95
%	100	131	102	93	88	80	78
P=2(A+B), мк	7100	7900	6840	6400	5760	5360	5200
%	100	111	96	90	81	75	73
$K_c = A / B$	28 : 1	25,6 : 1	27 : 1	27 : 1	26 : 1	26,5 : 1	26,3 : 1

*Примітки:* чисельник: A – більша сторона (ширина ЛП), B – менша сторона (товщина ЛП) гомотопної моделі; P – периметр ЛП;  $K_c$  – коефіцієнт елонгації форми ЛП; знаменник – значення параметра відносно норми.



**Таблиця 6.** Кількісні показники зміни площі зрізу ЛП та її структурних компонентів залежно від концентрації сирої нафти в ґрунті

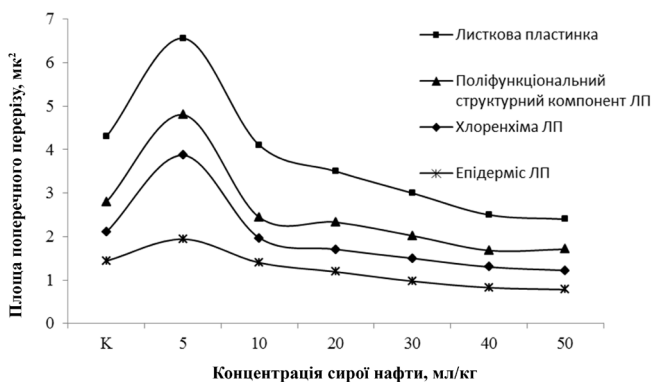
Показник	Концентрація сирої нафти в ґрунті, мл/кг						
	К (норма)	5	10	20	30	40	50
Слп, мк <sup>2</sup>	406·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	656·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	410·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	350·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	300·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	250·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	240·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>
Спск, мк <sup>2</sup>	290·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	480·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	244·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	233·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	202,4·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	168·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	171·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>
Схл, мк <sup>2</sup>	210·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	390·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	196,6·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	170·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	150·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	130·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	122·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>
S <sup>ε</sup> z+S <sup>ε</sup> v, мк <sup>2</sup>	144·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	194·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	139,8·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	119·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	97,3·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	82,5·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>	78·10 <sup>3</sup> ±10 <sup>3</sup>

*Примітки:* Слп – площа листової пластинки; Спск – площа поліфункціонального структурного компонента; Схл – площа хлоренхіми, мк<sup>2</sup>; S<sup>ε</sup>z+S<sup>ε</sup>v – сумарна площа зовнішнього та внутрішнього шарів епідермісу.

ного та внутрішнього шарів епідермісу зрізу ЛП зростає від 144·10<sup>3</sup> мк<sup>2</sup> у нормі до 194·10<sup>3</sup> (m ± 10<sup>3</sup> мк<sup>2</sup>) – у разі забруднення ґрунту 5 мл/кг. Зі збільшенням концентрації сирої нафти у ґрунті (10 мл/кг), морфометричні параметри структурної організації ЛП четвертого листка проростків пшениці ярої мало відрізняються від показників норми (рис. 1). Однак ці метричні показники ЛП набагато менші, ніж у рослин, вирощених на нафтозабрудненому ґрунті 5 мл/кг. Якщо площу ЛП у нормі прийняти за 100%, то в умовах нафтового забруднення ґрунту 10 мл/кг її площа становить 95%. На частку ПСК ЛП припадає ≈ 84% від значення норми (244·10<sup>3</sup> мк<sup>2</sup>). Площа хлоренхіми на поперечному перерізі ЛП зменшується до ≈ 94% від норми й дорівнює 196,6·10<sup>3</sup> мк<sup>2</sup>. Сумарна площа зовнішнього та внутрішнього епідермісу ЛП (у межах похибки вимірювань) не відрізняється від контрольних значень 97% від норми, а в метричному вираженні дорівнює 139,8·10<sup>3</sup> мк<sup>2</sup>.

Наведені морфометричні дані дають підстави стверджувати, що в умовах нафтового забруднення ґрунту 10 мл/кг органічні складові нафти не проявляють стимулюючої або інгібуючої дії на ріст і розвиток вегетативних органів проростків пшениці. Спостерігається лише тенденція до уповільнення процесів росту. Морфологічно це проявляється в чималому зменшенні цифрових значень морфометричних показників структурної організації ЛП четвертого прикореневого листка (рис. 1).

Із підвищенням дози нафтового забруднення ґрунту – від 20 до 50 мл/кг – спостерігається суттєве уповільнення процесів росту вегетативних органів проростків пшениці. Площа ЛП зменшується. За максимального нафтового забруднення ґрунту (50 мл/кг) розміри поперечного зрізу ЛП четвертого листка відносно норми зменшуються в 1,8 раза; площа покривної тканини (епідермісу) скорочується в 1,8 раза, ПСК – в 1,7 раза, хлоренхіми – в 1,7 раза. Доза нафто-

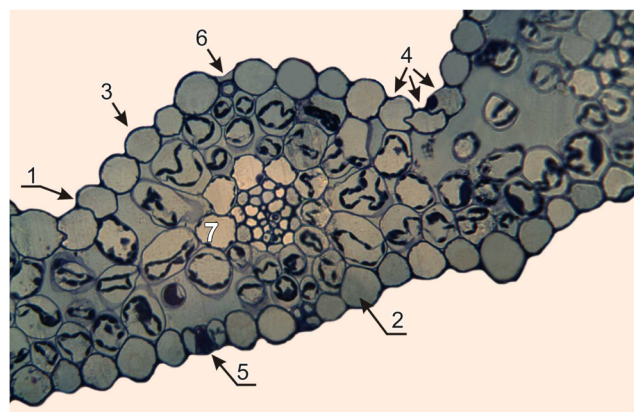


**Рис. 1.** Графіки зміни площі зрізу ЛП та її структурних компонентів залежно від концентрації сирої нафти в ґрунті. К – контрольні (норма) значення показників

вого забруднення ґрунту 40–50 мл/кг призводить до загибелі проростків пшениці ярої.

Мікроскопічні дослідження тотальних поперечних зрізів ЛП четвертого прикореневого листка проростків пшениці дали змогу встановити: по-перше, в умовах проведеного експерименту зрізи ЛП мають однотипну складну форму і “гофрований” контур; по-друге, зменшення площі перерізу ЛП корелює з розвитком деструктивних процесів в епідермісі, хлоренхімі та СВП, що призводить до загибелі рослин за дози нафтового забруднення ґрунту 40–50 мл/кг.

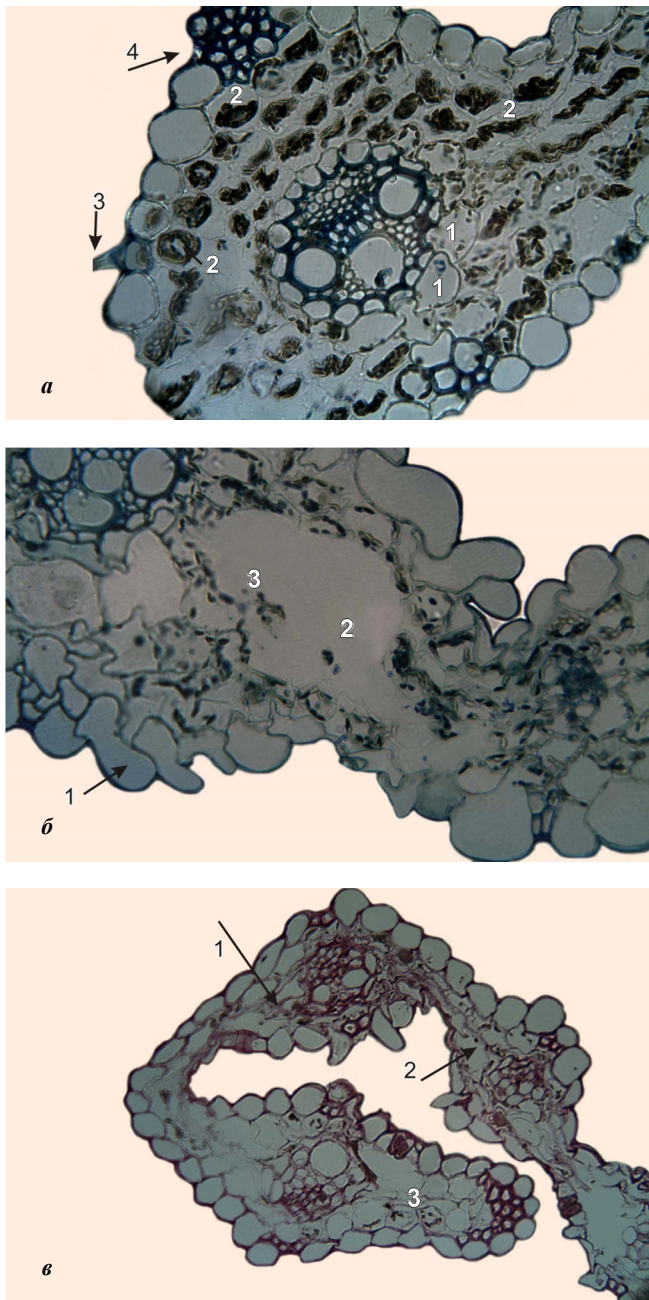
Результати мікроскопічних спостережень структурних змін вегетативних органів за наявності різних рівнів змодельованого нафтового забруднення ґрунту свідчать про те, що в умовах норми структура листової пластинки має типову будову (рис. 2).



**Рис. 2.** Мікроструктура листової пластинки четвертого листка проростка пшениці ярої в контролі (норма): 1, 2 – одношаровий епідерміс відповідно зовнішньої та внутрішньої поверхні ЛП; 3 – епідерміоцити, які виконують захисну функцію; 4 – регулюючі епідермальні клітини; 5 – епідермальні клітини продохів ЛП; 6 – місце розташування волоскової клітини; 7 – клітини мезофілу, які утворюють зовнішню піхву судинно-волоконистого пучка; ×400. Забарвлення – метиленовий блакитний

В умовах нафтового забруднення ґрунту 5 мл/кг (рис. 3,а) виявлена морфологія великого СВП разом із зовнішньою піхвою (1); спостерігаються, відносно норми, збільшення листової пластинки четвертого листка проростків пшениці, кількості клітин хлоренхіми та суттєве збільшення вмісту зерен хлорофілу в цитоплазмі хлоренхімних клітин (2), волоскова клітина (3), елементи механічної тканини (4).

У дослідях з нафтозабрудненим ґрунтом 20 мл/кг у листовій пластинці з'являються зони деструкції та лізису хлоренхімних клітин (рис. 3,б). Значна кількість клітин епідермісу і



**Рис. 3.** Мікроструктура листової пластинки четвертого листка проростка пшениці ярої в експерименті за концентрації сирової нафти в ґрунті: а – 5 мл/кг; б – 20 мл/кг; в – 50 мл/кг. \*400. Забарвлення – метиленовий блакитний

хлоренхіми піддається дегідратації й деформації. Виражені гетерогенні та гетероморфні клітини епідермісу (1); локальна зона лізису клітин хлоренхіми (2); вільно розташовані зерна хлорофілу (3).

За нафтового забруднення ґрунту 40–50 мл/кг зареєстровано розвиток тотального пікнозу та дегідратації клітин хлоренхіми (1); у цитоплазмі хлоренхімоцитів чітко оконтуровуються пікнотично змінені ядра, дрібні хлоропласти, які щільно прилягають до внутрішньої поверхні оболонки, а також оптично темні кулясті включення, що виявляються в цитоплазмі деяких клітин (2); окремі дрібні зерна хлорофілу (3); у зів'язлих листках проростків пшениці ярої – зони руйнування епідермісу й хлоренхіми (рис. 3, в).

## Обговорення

Проведені експерименти та морфометричні дані дали змогу виявити в умовах змодульованого нафтового забруднення ґрунту (5, 10, 20, 30, 40, 50 мл/кг) три основні ефекти впливу на проростання та ранній розвиток рослин пшениці ярої:

1. *Стимулюючий, сприятливий вплив малих доз нафти* ( $\leq 5$  мл/кг). Обумовлений, перш за все, наявністю в її складі комплексу низькомолекулярних азотвмісних органічних гетероциклічних сполук, які отримали назву “нафтові ростові речовини”. Вони стимулюють ріст вищих рослин. Інші нафтові родовища, у тому числі й Полтавського регіону, також містять у складі нафти низькомолекулярні азотвмісні гетероциклічні сполуки та багато інших органічних і мінералоорганічних сполучин, які в малих кількостях мають певний вплив на фізіологічні властивості. Під впливом цих хімічних речовин нафти відбувається штучна стимуляція проростання й росту рослин пшениці ярої. Такі хімічні речовини через кореневу систему потрапляють у листя, де активують біосинтез фітогормонів, під дією яких відбувається поділ клітин епідерми і хлоренхіми та їх подальша фізіологічна гіпертрофія – розтяг і збільшення розміру.

2. *Резистентність, що проявляється в толерантності рослин пшениці ярої до дії нафтового забруднення ґрунту* (10–20 мл/кг), на нашу думку, обумовлена компенсацією процесів, що відбуваються в клітинах рослин та мають протилежно направлену фізіологічну властивість. Толерантність рослин пшениці ярої та їх адаптація до дії даної концентрації нафти в ґрунті пояснюються нейтралізацією стимулюючої дії “нафтових факторів росту” нафти її токсикантами – метановими, ароматичними вуглеводнями. Хімічні речовини нафти, що проникають у клітини кореневої системи рослин, можуть впливати на біосинтез фітогормонів (збільшувати або зменшувати), безпосередньо включатися у внутрішньоклітинні метаболічні процеси, пригнічувати ріст рослин, проявляючи фітотоксичність. Отже, реакція рослин на вплив хімічних речовин, що мають протилежні фізіологічні властивості, залежить від того, який хімічний чинник має більший вплив на метаболічні процеси в організмі рослини. Якщо протилежно направлені процеси компенсують один одного, то біологічний ефект від їх дії нульовий; розвиток рослини в таких умовах не буде суттєво залежати від наявності нафти в ґрунті (у межах 10–20 мл/кг) та відрізнятися від норми. Відносно нейтральний вплив нафтового забруднення ґрунту (10–20 мл/кг) на проростання насіння і подальший розвиток проростків пшениці ярої обумовлений нейтралізацією дії “ростових органічних речовин” токсичними компонентами нафти. Останнє пояснюється тим, що у складі нафти Полтавського регіону знаходяться різні групи органічних речовин, серед яких найбільш токсичними для рослин та екологічно небезпечними є метанові (включаючи тверді парафіни) та аренні (моноядерні й поліциклічні) вуглеводні; їх уміст у нафті становить від 5 до 15%. Таким чином, асиміляційна ємність (кількість нафти, яку пшениця яра здатна асимілювати без порушення фізіологічних процесів свого росту та розвитку) знаходиться в межах 5–10 мл/кг.

3. *Фітотоксичний ефект за умов нафтового забруднення ґрунту* ( $\geq 20$  мл/кг). Потрапляючи до ґрунту, нафта та її компоненти адсорбуються гумусом, дрібнодисперсними мінеральними речовинами й огортають ґрунтові частинки. Такий ґрунт згодом набуває гідрофобних властивостей, не змочується водою, а рослини не одержують у необхідній кількості різних мінеральних та органічних елементів живлення. Якщо кореневі волоски покриті плівкою нафти (а це відбувається за концентрації нафти в ґрунті понад 30 мл/кг), то призупиняються процеси мікродифузії ґрунтового повітря, вологи та інших елементів живлення до коренів рослин пшениці ярої (незалежно від наявності в ґрунті вільної води та повітря). У таких умовах рослини пшениці ярої гинуть від фізіологічної посухи.



## Висновки

Динаміка цифрових значень основних морфометричних показників дала змогу отримати інтегральну інформацію про закономірності розвитку структурної адаптації та деадаптації рослин пшениці ярої залежно від дози нафти в ґрунті. Встановлено, що в умовах нафтового забруднення ґрунту 5 мг/кг відбувається стимуляція процесів метаболізму в клітинах епідермісу та хлоренхіми ЛП. Нафтове забруднення ґрунту 10–20 мг/кг суттєво не впливає на ріст і розвиток вегетативних органів проростків пшениці, параметри структурної організації у межах похибки вимірів наближені до норми, а за нафтового забруднення ґрунту від 20 до 50 мг/кг спостерігаються ознаки уповільнення процесів росту вегетативних органів проростків пшениці. Морфологічно це проявляється в чималому зменшенні цифрових значень морфометричних показників структурної організації ЛП. Визначено, що причинами фітотоксичності нафтозабруднених ґрунтів (30–50 мг/кг) є поєднана дія негативних агроecологічних фізико-хімічних факторів.

## References

- Abbasov, V. M., & Musaev, A. V. (1998). Naftalanovaja neft' i ee naftenovye uglevodorody [Naphthalan oil and its naphthenic hydrocarbons]. Science, Baku (in Russian).
- Alexandrov, A. D. (1990). Vypuklye mnogogranniki [Convex polyhedra]. Gostekhizdat, Moscow (in Russian).
- Baguley, J. G., Montagna, P. A., Cooksey, C., Hyland, J. L., Bang, H. W., Morrison, C., Kamikawa, A., Bennetts, P., Saiyoi, G., Parsons, E., Herdener, M., & Ricci, M. (2015). Community response of deep-sea soft-sediment metazoan meiofauna to the Deepwater Horizon blowout and oil spill. Marine Ecology. Prog. Ser., 528, 127–140. doi: [10.3354/meps11290](https://doi.org/10.3354/meps11290).
- Beskin, N. L. (1981). Stereometrija [Stereometry]. Prosveshhenie, Moscow (in Russian).
- Tsikunov, A. E. (2006). Sbornik matematicheskikh formul [Collection of mathematical formulas]. Piter, Saint-Petersburg (in Russian).
- Edge, K. J., Johnston, E. L., Dafforn, K. A., Simpson, S. L., Kutti, T., & Bannister, R. J. (2016). Sub-lethal effects of water-based drilling muds on the deep-water sponge. *Geodia barretti*. Environ. Pollut., 212, 525–534. doi: [10.1016/j.envpol.2016.02.047](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.02.047).
- Fraschetti, S., Guarnieri, G., Gambi, C., Bevilacqua, S., Terlizzi, A., & Danovaro, R. (2016). Impact of offshore gas platforms on the structural and functional biodiversity of nematodes. Marine Environment. Res., 115, 56–64. doi: [10.1016/j.marenvres.2016.02.001](https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.02.001).
- Gritsaynko, G. M. (2003). Metody biologichnykh ta agrohimiichnykh doslidzhen' roslin i g'rutniv [Methodology of biologic and agrohimiichnye doslenie roslin and soil]. Nichlava, Kyiv (in Ukrainian).
- Hsing, P.-Y., Fu, B., Larcom, E. A., Berlet, S. P., Shank, T. M., Govindarajan, A. F., Lukasiewicz, A. J., Dixon, P. M., & Fisher, C. R. (2013). Evidence of lasting impact of the deepwater horizon oil spill on a deep Gulf of Mexico coral community. Elementa, 1:000012. doi: [10.12952/journal.elementa.000012](https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000012).
- Jones, I. L., Bull, J. W., Milner-Gulland, E. J., Esipov, A. V., & Suttle, K. B. (2014). Quantifying habitat impacts of natural gas infrastructure to facilitate biodiversity offsetting. Ecology & Evolution, 4(1), 79–90. doi: [10.1002/ece3.884](https://doi.org/10.1002/ece3.884).
- Joye, S. B., Bracco, A., Ozgokmen, T., Chanton, J. P., Grosell, M., MacDonald, I. R., Cordese, E. E., Montoya, J. P., & Passow, U. (2016). The Gulf of Mexico ecosystem, six years after the Macondo Oil Well Blowout. Deep Sea Res., II, 129, 4–19. doi: [10.1016/j.dsr2.2016.04.018](https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.04.018).
- Kark, S., Brokovich, E., Mazor, T., & Levin, N. (2015). Emerging conservation challenges and prospects in an era of offshore hydrocarbon exploration and exploitation. Conserv. Biol., 29, 1573–1585. doi: [10.1111/cobi.12562](https://doi.org/10.1111/cobi.12562).
- Kleindienst, S., Paul, J. H., & Joye, S. B. (2015). Using dispersants after oil spills: impacts on the composition and activity of microbial communities. Nat. Rev. Microbiol., 13, 388–396. doi: [10.1038/nrmicro3452](https://doi.org/10.1038/nrmicro3452).
- Lanzen, A., Lekang, K., Jonassen, I., Thompson, E. M., & Troedsson, C. (2016). High-throughput metabarcoding of eukaryotic diversity for environmental monitoring of offshore oil drilling activities. Mol. Ecol., 25(17), 4392–4406. doi: [10.1111/mec.13761](https://doi.org/10.1111/mec.13761).
- Melnik, L. G. (2012). Teoriya samoorganizacii jekonomicheskikh sistem: monografija [Theory of self-organization of economic systems: monograph]. University Book, Sumy (in Russian).
- Mitchell, A. L., Tkacik, D. S., Roscioli, J. R., Herndon, S. C., Yacovitch, T. I., Martinez, D. M., Vaughn, T. L., Williams, L. L., Sullivan, M. R., Floerchinger, C., Omara, M., Subramanian, R., Zimmerle, D., Marchese, A. J., & Robinson, A. L. (2015). Measurements of methane emissions from natural gas gathering facilities and processing plants: measurement results. Environ. Sci. Technol., 49(5), 3219–3227. doi: [10.1021/es5052809](https://doi.org/10.1021/es5052809).
- Penderytsky, A. G. (2004). Vplyv vidobutku nafti ta gazu na degradaciju zemel' v Ukraïni [Influence of oil and gas extraction on land degradation in Ukraine]. Environmental ecology and life safety, 5, 36–40 (in Ukrainian).
- Pisarenko, P. V., & Laslo, O. O. (2009). Ocinka ekologichnogo stanu sil'skogospodars'kyh ugid' Poltav's'koi oblasti [Estimation of the ecological state of agricultural lands of the Poltava region]. News of the Poltava state agrarian academy, 2, 23–25 (in Ukrainian).
- Pisarenko, P. V., & Kolesnikova L. A. (2004). Osoblyvosti vplyvu policyklichnyh aromatychnyh vuglevodniv u ob'jekty navkolyshn'ogo seredovyssha [Features of influence of polycyclic aromatic hydrocarbons in the environment objects]. News of the Poltava state agricultural institute, 1, 107–112 (in Ukrainian).
- Rudko, G. I. (2013). Ekologichna bezpeka navkolyshn'ogo pryrodno-go seredovyssha Ukraïny. Kontury problemy [Ecological safety of natural environment of Ukraine. Contours of problem]. Ecology of environment and vital functions safety, 4, 22–28 (in Ukrainian).
- Rudko, G. I., Adamenko, O. M. (2009). Zemlelogija. Ekologoresursna bezpeka Zemli [Earthology. Resource and Ecology safety of the Earth]. Akadempres, Kyiv (in Ukrainian).
- Saltykov, S. A. (1970). Stereometricheskaja metallografija [Stereometric metallography]. Metallurgy, Moscow (in Russian).
- Samojlik, M. S. (2014). Resursno-ekologichna bezpeka regionu: monografija [Resource and environmental safety of the region: monograph]. Simon, Poltava (in Ukrainian).
- Sklyar, V. T., & Lebedev, E. V. (1962). Nefty Ukraïny [Petroleum of Ukraine]. Yzd-vo tehnykh. lyteratury USSR, Kyiv (in Russian).
- Skvortsov, G. E. (1970). Mykroskopyy [Microscopes]. Mashynostroenye, Leningrad (in Russian).
- Starkov, S. N. (2008). Sravochnyk po matematycheskym formulam y grafykam funkcyj [The Boundary on Mathematical Formulas and Function Graphs]. Piter, Saint-Petersburg (in Russian).
- Storchak, D., Kanao, M., Delahaye, E. & Harris, J. (2015). Long-term accumulation and improvements in seismic event data for the polar regions by the International Seismological Centre. Polar Science, 9(1), 5–16. doi: [10.1016/j.polar.2014.08.002](https://doi.org/10.1016/j.polar.2014.08.002).
- Sun, S., Hu, C., & Tunnell, J. W. J. (2015). Surface oil footprint and trajectory of the Ixtoc-I oil spill determined from Landsat/MSS and CZCS observations. Mar. Pollut. Bull., 101, 632–641. doi: [10.1016/j.marpolbul.2015.10.036](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.10.036).
- Ubani, O., Atagana, H. I., & Thantsha, M. S. (2013). Biological degradation of oil sludge: A review of the current state of development. African Journal of Biotechnology, 12 (45), 52–58. doi: [10.5897/AJB11.1139](https://doi.org/10.5897/AJB11.1139).
- Veselova, T. V., Veselovsky, V. A., & Chernavsky, D. S. (1993). Stress u rastenyj [Stress in plants]. Moskow University, Moscow (in Russian).
- Wierzbicki, A. (2013). Model-based decision support methodology with environmental applications. Kluwer Academic Publishers, Boston, London.
- Ziervogel, K., D'souza, N., Sweet, J., Yan, B., & Passow, U. (2014). Natural oil slicks fuel surface water microbial activities in the northern Gulf of Mexico. Front. Microbiol., 5(188), 145–146. doi: [10.3389/fmicb.2014.00188](https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00188).