

В. П. МАРЦЕНЮК¹, І. В. ЖУЛКЕВИЧ², А. С. СВЕРСТЮК², Н. А. МЕЛЬНИК², Н. В. КОЗОДІЙ³,
І. Б. БЕРЕЗОВСЬКА⁴

ВИКОРИСТАННЯ БІОСЕНСОРІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

¹Університет в Бельсько-Бялій, м. Бельсько-Бяла, Республіка Польща

²Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України,
м. Тернопіль, Україна

³Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

⁴ВНКЗ ЛОР «Львівський інститут медсестринства та лабораторної медицини
імені Андрея Крупинського», м. Львів, Україна

Мета: розглянути класифікацію біосенсорів (за типом перетворювача), принцип їх роботи, галузі застосування біосенсорів залежно від виду забруднювачів навколишнього середовища та основні напрямки подальшого розвитку біосенсорних технологій.

Матеріали і методи. У дослідженні застосовано бібліосемантичний та аналітичний методи.

Результати. Біосенсор є портативним аналітичним пристроєм, що складається з чутливого елемента біологічного походження та фізико-хімічного перетворювача. Його устаткування має такі компоненти: біорецептор, перетворювач, процесор сигналу на виході. Біосенсори класифікуються відповідно до біорецептора (ферменти, імуноафінність, ДНК і цілі мікробні клітини) чи перетворювача (електрохімічний, оптичний, п'єзоелектричний, електрохімічний та тепловий біосенсори). Як біосенсори, так і біологічні прилади можна використовувати як інструменти контролю параметрів навколишнього середовища – для оцінки фізичного, хімічного та біологічного моніторингу забруднювальних речовин у довкіллі. Основні програми біосенсорів призначено для виявлення та контролю різних забруднювальних речовин, включно солі важких металів, органічні та неорганічні забруднювачі, токсини, антибіотики і мікроорганізми.

Висновки. Застосування сучасних нанотехнологічних біосенсорів має великий потенціал для екологічного моніторингу та для виявлення забруднювальних речовин, оскільки дані біологічні пристрої є портативними і дають змогу проводити вимірювання в режимі реального часу. Принцип роботи біосенсора ґрунтується на здатності фіксування біологічного матеріалу, відбувається за допомогою фізичного або мембранного захоплення, нековалентних або ковалентних зв'язків.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: біохімічна потреба кисню; біорецептор; біосенсор; моніторинг довкілля; перетворювач.

Розвиток науки і техніки потребує появи нових методів детекції. Тому в науці та промисловості зростає інтерес до біосенсорів. Вони є альтернативою до загальновикористовуваних методів вимірювання, які характеризуються поганою вибірковістю, високою вартістю, поганою стійкістю, неточними результатами і переважно їх може використовувати лише висококваліфікований персонал. Біосенсори – це нова генерація сенсорів, які застосовують у своїй конструкції біологічні матеріали. Вони мають високу чутливість, селективність, точність, дають змогу здійснювати швидкі та прості вимірювання [10]. Біосенсори характеризуються високою ефективністю і їх широко використовують у харчовій промисловості [1], при моніторингу параметрів довкілля [15], у військовій промисловості та під час бойових дій [6], у медицині [19] як засоби для встановлення діагнозів. У цілому біосенсори поділяють на дві частини. Перша пов'язана з рівнем рецептора до біологічного

матеріалу, який використовують в його будові. Рецепторами можуть бути фермент, протеїн, порфєрин, антиген або антитіло. Друга частина біосенсорів обмежена до шару провідника, де біологічний ефект перетворюється на вимірювальний сигнал, який може бути електрохімічний, імпедансний, амперометричний, оптичний та ін.

На сьогодні однією з основних проблем, з якою стикається людство, є екологічні забруднення, що зростають з кожним днем і завдають серйозної шкоди планеті. Забруднення довкілля складається з трьох основних його видів: вода, ґрунт, повітря. Забруднення ґрунту і води має найбільш негативний ефект внаслідок посилення урбанізації та індустріалізації в недавньому минулому. Вода, ґрунт і повітря значно забруднені неочищеними промисловими та сільськогосподарськими відходами, а також важкими металами, пестицидами, гербіцидами, діоксинами та іншими токсичними речовинами.

Більшість забруднювальних речовин може накопичуватися і зберігатися довгий час у навколишньому середовищі через відсутність їх деградації. Крім того, вони також можуть входити в ланцюг живлення. Тому виявлення та моніторинг таких забруднювачів навколишнього середовища у ґрунті, воді та повітрі дуже важливі для загальної екобезпеки та безпеки біологічної системи. На сьогодні для моніторингу забруднювачів навколишнього середовища використовують хроматографію та спектроскопію, які є дорогі та потребують багато часу для дослідження. У зв'язку з цим, виникає потреба у простих екологічно чистих системах та пристроях для моніторингу навколишнього середовища із залученням сучасних технологій для розробки нових методів контролю забруднювальних параметрів навколишнього середовища. Тому такі підходи дадуть змогу швидко та дешево здійснити відповідний моніторинг у режимі реального часу [2].

Мета дослідження: описати основні концепції використання біосенсорів, розширити знання про їх найактуальніше застосування в галузі екологічного моніторингу, висвітлити найпоширеніші забруднювальні речовини з відповідними прикладами.

Матеріали і методи. У дослідженні застосовано бібліосемантичний та аналітичний методи.

Результати дослідження та їх обговорення. Біосенсор є портативним аналітичним пристроєм, який складається з чутливого елемента біологічного походження та фізико-хімічного перетворювача. Даний біосенсор є автономним інтегрованим пристроєм, що має можливість виробляти певну кількісну або напівкількісну аналітичну інформацію, використовуючи біологічний розпізнавальний елемент, тобто біохімічний рецептор, який безпосередньо контактує із перетворювачем.

Біосенсорне устаткування має такі компоненти (рис. 1):



Рис. 1. Структурні елементи типового біосенсора.

1. Біорецептор – це чутливий розпізнавальний елемент біологічного походження, наприклад тканини, цілі клітини/мікроорганізми, органи, ферменти, антитіла та нуклеїнові кислоти (рис. 2), або будь-який інший біологічно отриманий матеріал чи біоімітатор. Ці чутливі елементи також можуть бути розроблені шляхом застосування відповідних біологічно-інженерних технологій [3].

2. Перетворювач або детекторний елемент: працює за допомогою фізико-хімічного способу і перетворює сигнал, що генерується від взаємодії аналітів, тобто зразків, з біологічними елементами в інший сигнал із можливістю його вимірювання. На рисунку 3 показано типи біосенсорів, що найбільш широко використовують.

3. Процесор сигналу на виході – це засіб візуалізації сигналу на виході біосенсора, який

забезпечує відображення результатів вимірювання.

Принцип роботи біосенсора

На першому етапі фіксування біологічного матеріалу відбувається за допомогою фізичного або мембранного захоплення, нековалентних або ковалентних зв'язків. На наступному етапі здійснюється контакт між фіксованим біологічним матеріалом і перетворювачем. Аналіт зв'язується з біологічним матеріалом для утворення приєднаного аналіту, що, у свою чергу, генерує електронний сигнал із можливістю його вимірювання. Іноді аналіти перетворюються в проміжні речовини, при цьому процес перетворення супроводжується виділенням тепла, газу (кисню), електронів. На останньому етапі в біосенсорі фіксуються електричні сигнали, що відповідають кількості (концентрації) вимірювальних речовин із можливістю

подальшої візуалізації, які можна виміряти і візуалізувати за допомогою засобів відображення.



Рис. 2. Матеріали для розробки біосенсора.

У недавньому минулому кілька біосенсорів були розроблені з використанням різних комбінацій біорецептора та перетворювача. Біосенсори можуть бути прокласифіковані відповідно до біорецептора (ферменти, імуноафінність, ДНК і цілі мікробні клітини) чи перетворювача (електрохімічний, оптичний, п'єзоелектричний та тепловий біосенсори) (рис. 3).

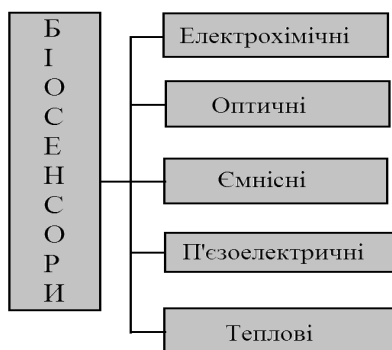


Рис. 3. Види біосенсорів.

Застосування біосенсорів для екологічного моніторингу

Як біосенсори, так і біологічні прилади можна використовувати як інструменти контролю параметрів навколишнього середовища – для оцінки фізичного, хімічного та біологічного моніторингу забруднювальних речовин у довкіллі. Основні програми біосенсорів, що описані нижче, призначені для виявлення та контролю різних забруднювальних речовин, включно солі важких металів,

органічні та неорганічні забруднювачі, токсини, антибіотики і мікроорганізми.

Важкі метали

Такі важкі метали, як мідь (Cu), кадмій (Cd), ртуть (Hg), свинець (Pb), цинк (Zn) та інші, є надзвичайно шкідливими. Вони відомі завдяки високій токсичності та біоаккумуляції в харчовому ланцюзі. Для визначення важких металів у різних зразках навколишнього середовища було розроблено ряд бактеріальних біосенсорів із використанням ферменту та ДНК як біорецептора, оптичної та електрохімічної системи як перетворювача. У відомих наукових роботах зазначено, що оптичний біосенсор [7] для виявлення Pb і Cd з інгібуванням лужної фосфатази (AP), наявної на зовнішній мембрані мікрободоростей (*Chlorella vulgaris*), використовують як біорецептор.

Біохімічна потреба кисню (БПК)

Моніторинг БПК є одним із основних параметрів оцінки концентрації біологічно органічної забруднювальної речовини, що вимірюється у дослідних зразках води. Визначення БПК будь-якого зразка є трудомістким процесом, який триває протягом 5-ти днів, тому це не може бути використано в режимі реального часу. Швидкий он-лайн-моніторинг БПК можливий тільки з використанням біосенсорів. Клітини рекомбінантних *Escherichia coli* з *Vibrio fischeri* геном lux AE на основі біосенсора було розроблено для вимірювання БПК [14].

Азотні сполуки

Азотні з'єднання, тобто нітрати, широко використовують в галузях харчової промисловості як консерванти (з метою збільшення терміну зберігання продуктів) та мінеральні добрива (для збільшення родючості ґрунту). Надлишкове використання даних сполук може викликати несприятливі наслідки для здоров'я людини, а також спричинити забруднення поверхневих та підземних вод, які потім можуть бути токсичними для водного середовища. Азотні сполуки можуть незворотно реагувати із гемоглобіном, зменшуючи його транспортну функцію. Для визначення концентрації азотних сполук у зразках води було розроблено кілька біосенсорів, зокрема: амперометричний біосенсор [22], який використовує фермент (цитохром із нітратредуктази) для визначення кількості нітратів та ферментний біосенсор [11], який є швидким, дуже чутливим і стабільним та може використовуватися для оцінки нітратів у воді.

Поліхлоровані біфеніли

Поліхлоровані біфеніли є токсичними органічними сполуками, які також забруднюють навколишнє середовище. Такі сполуки мають високоліпофільний характер, тому вони накопичуються в ланцюгу живлення. Для виявлення поліхлорованих біфенілів у навколишньому середовищі було

розроблено такі біосенсори: біосенсор на основі дезоксирибонуклеїнової кислоти (ДНК) з хронометричним виявленням [12], імуносенсори з флуоресценцією [13], електрохімічні біосенсори [23].

Фенольні сполуки

Феноли та їх похідні (хлорфеноли) також є шкідливими факторами навколишнього середовища. Такі сполуки в основному використовують у виробництві барвників, ліків, пластмас, пестицидів, мийних засобів тощо. Виявлення і моніторинг фенолів є дуже важливим процесом, оскільки фенольні сполуки мають високу токсичність та здатні накопичуватися в навколишньому середовищі. Серед біосенсорів, які найчастіше використовують для виявлення та моніторингу фенолів, є:

1) амперометричний біосенсор із ферментом (тирозиназою) – як біорецептор для селективного виявлення фенолу в стічних водах [8];

2) оптичний біосенсор – використовує хемілюмінесцентні волокна для виявлення хлорфенолів [16].

Фосфороорганічні сполуки (ФОС)

Фосфороорганічні сполуки є групою органічних хімічних речовин, які зазвичай використовують як інсектициди, гербіциди та пестициди. У сучасному сільському господарстві їх використовують для боротьби із шкідниками та бур'янами. Пестициди найпоширеніші у воді, ґрунті та продуктах харчування. Їх токсичність та стійкість в навколишньому середовищі мають негативний вплив на здоров'я населення. Для виявлення пестицидів найбільш широко використовують сенсори на основі ферментів [17], наприклад, імунологічні амперометричні біосенсори було розроблено для виявлення пестицидів у воді [18], амперометричні та оптичні – для виявлення гербіцидів.

Діоксини є поліхлорованими сполуками, що викидаються як побічні продукти під час декількох хімічних процесів, які включають хлор. Вони є токсичними та канцерогенними речовинами для людей і мають значний вплив на навколишнє середовище через випадкове поступлення в ланцюг живлення, зокрема для їх виявлення був розроблений біосенсор поверхневого плазмонного резонансу [20].

Гормони

Збільшення населення на планеті та розвиток сільського господарства призводить до безперервного поступлення природних і синтетичних залишків гормонів (естрадіолу, естрону і етиленестрадіолу) в екосистему, що негативно впливає на здоров'я людей через збільшення онкологічних захворювань репродуктивних органів. Гормони разом із іншими органічними забруднювачами виявляють у зразках поверхневих вод за допомогою сучасних автоматизованих оптичних імуносенсорів.

Антибіотики

Широке та немедичне використання антибіотиків у навколишньому середовищі викликає занепокоєння, оскільки вони спричиняють розвиток резистентності до антибіотиків. Виникнення таких антимікробних сполук також викликає проблеми із безпечністю харчових продуктів через їх можливе введення в харчовий ланцюг. Протягом останніх років було розроблено декілька типів біосенсорів для визначення кількості антибіотиків у харчових продуктах та різних біологічних зразках. Наприклад було розроблено оптичний імуносенсор для визначення сульфаметазину в сечі тварин [21].

Забруднення мікроорганізмами

Через стічні води передається велика кількість різних захворювань, що викликають бактерії, віруси, найпростіші, гриби. Їх зазвичай спостерігають в забруднених або неочищених водах, тому необхідна розробка ефективного моніторингу якості водопостачання для зменшення впливу водних патогенів на здоров'я населення. Впровадження нових сучасних біосенсорних технологій широко використовують для швидкого виявлення та моніторингу забруднювальних мікроорганізмів у режимі реального часу. Численні види біологічних властивостей, включаючи нуклеїнову кислоту і детекторів на основі імуноафінних сенсорів, не тільки швидко виявляють мікроорганізми в навколишньому середовищі, а також їх токсини (біотоксини). Найкращий детектор на основі поверхневого плазмонного резонансу розроблено [4] для моніторингу в реальному часі для виявлення сальмонел та лістерій у зразках води.

Розвиток біосенсорних технологій

Незважаючи на перспективні застосування біосенсорних технологій в багатьох галузях здоров'я, медицини, сільського господарства, космічних дослідженнях, існує ще багато нез'ясованих питань, що пов'язані з використанням нанотехнологій при моніторингу навколишнього середовища. Нижченаведені ключові обмеження щодо застосування нанотехнологій в навколишньому середовищі:

1) компоненти біосенсора складаються з наноматеріалів, таким чином вплив таких матеріалів на людський організм та накопичення в харчових продуктах можливе через ланцюг живлення. Сучасні знання про нанотехнології все ще перебувають на початкових стадіях розвитку, тому неможливо точно спрогнозувати вплив наночастинок на людське здоров'я та навколишнє середовище;

2) є ряд досліджень [24], в яких описано, що нанотехнології можуть істотно зменшити функціональні можливості біосенсорів;

3) взаємодія наночастинок із нецільовими ланками довкілля призводять до розвитку екологічних проблем [25];

4) існують проблеми, пов'язані з використанням наноматеріалів, які мають негативний вплив на екосистему;

5) на початковому етапі розробки біосенсор має високу вартість на виробництво;

6) більшість датчиків біосенсорів перевіряється в дистильованій воді або в буферному розчині. Інформація про моніторинг у режимі реального часу ще не є достатньо доступною, тому ми не зможемо отримати в майбутньому точних даних про наявність певних добавок у сполуках, які досліджують;

7) існуючі біосенсори мають обмежений термін служби і не можуть протидіяти несприятливим екологічним залежностям щодо чутливого характеру біологічного матеріалу, який використовують при розробці сенсора [26];

8) відсутність громадської свідомості у країнах, що розвиваються.

Висновки

У роботі розглянуто класифікацію біосенсорів (за типом перетворювача), принцип їх роботи, галузі застосування біосенсорів залежно від виду забруднювачів навколишнього середовища та основні напрямки подальшого розвитку біосенсорних технологій. На сьогодні екологічна безпека вимагає застосування технологій, які є чутливими, вибірковими, дешевими для користувача та екологічно чистими, портативними з мінімальною потужністю споживання. Біосенсори є біофізичними приладами, які здатні виявляти різноманітні забруднювачі навколишнього

середовища, включаючи феноли, пестициди, токсини та гормони. На даний момент більшість біосенсорів призначена для виявлення і моніторингу забруднювальних речовин навколишнього середовища і практикують лише виконання цих вимог та іноді не дають точної інформації через певні обмеження (довготривалий час аналізу, домішки інших сполук у зразках дослідження).

При якісному екологічному моніторингу необхідно проводити дослідження із застосування нових біологічних речовин і широкого спектра забруднювачів навколишнього середовища. У подальших дослідженнях необхідно зосередитися на побудові нових екологічно чистих біосенсорів на основі біоматеріалів [27] з використанням гібридної біоплівки [9]. Оптичний біосенсор має величезний потенціал щодо виявлення забруднювальних речовин у навколишньому середовищі [5]. Очікується, що останні досягнення в галузі нанотехнологій, основані на мінітюаризації біосенсорних технологій для моніторингу навколишнього середовища, матимуть перспективне застосування.

Подальші дослідження повинні сприяти покращенню роботи біосенсора в реальних досліджуваних середовищах, включаючи генетичну модифікацію ферментів та цілі мікробні клітини, шляхом застосування генетично-інженерних технологій. Тому на сьогодні виникає потреба у використанні легких, швидких, специфічних, чутливих та портативних методів для аналізу загрози екологічної безпеки.

Список літератури

1. *Adley C.* Past, present and future of sensors in food production / C. Adley // *Foods*. – 2017. – No. 3 (3). – P. 491–510.
2. *Aisyah W. N.* Exploring the potential of whole cell biosensor: A review in environmental applications / W. N. Aisyah, W. Jusoh, L. S. Wong // *Intl. J. Chem. Env. Bio. Sci.* – 2014. – No. 2 (1). – P. 52–56.
3. *Akkoyun A.* Detection of sulphamethazine with an optical biosensor and anti-idiotypic antibodies / A. Akkoyun, V. F. Kohe, U. Bilitewski // *Sens. Actuators*. – 2000. – No. 70. – P. 12–18.
4. *Amperometric immunosensors and enzyme electrodes for environmental applications* / J. Parellada, A. Narvaez, M. A. Lopez [et al.] // *Anal. Chim. Acta*. – 2017. – No. 3 (62). – P. 47–57.
5. *Amperometric immunosensor for the detection of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) in water* / M. Wilmer, D. Trau, R. Renneberg, F. Spener // *Anal. Lett.* – 2007. – No. 30 (3). – P. 515–525.
6. *Burnworth M.* Fluorescent sensors for the detection of chemical warfare agents / M. Burnworth, S. Rowan, C. Weder // *Chemistry – European Journal*. – 2007. – No. 13 (28). – P. 7828–7836.
7. *Campas M.* Biosensors to detect marine toxins: Assessing seafood safety / M. Campas, B. Prieto-Simon, J. L. Marty // *Talanta*. – 2007. – No. 72. – P. 884–895.
8. *Detection of foodborne pathogens using surface plasmon resonance biosensors* / V. Koubova, E. Brynda, L. Karasova [et al.] // *Sens. Actuators*. – 2011. – No. 74. – P. 100–105.
9. *Development of conductometric nitrate biosensor based on Methyl viologen/Nafion composite film* / X. Wang, S. V. Dzyadevych, J. M. Chovelon [et al.] // *Electrochem. Commun.* – 2006. – No. 8. – P. 201–205.
10. *Diamond as a transducer material for the production of biosensors* / L. Mosinska, K. Fabisiak, K. Paprocki [et al.] // *Przemysl Chemiczny*. – 2013. – No. 6 (92). – P. 919–923.
11. *Disposable screen-printed electrodes for the immunochemical detection of polychlorinated biphenyls* / C. M. Del, I. Lioni, M. Taccini [et al.] // *Anal. Chim. Acta*. – 1997. – No. 342. – P. 189–197.
12. *Durrieu C.* Optical algal biosensor using alkaline phosphatase for determination of heavy metals / C. Durrieu, C. Tran-Minhw // *Environ. Res. Sect.* – 2002. – No. 51. – P. 206–209.
13. *Fluorescence-based assay with enzyme amplification on a micro-flow immunosensor chip for monitoring coplanar polychlorinated biphenyls* / T. Endo, A. Okuyama, Y. Matsubara [et al.] // *Anal. Chim. Acta*. – 2005. – No. 531. – P. 7–13.
14. *Highly sensitive nitrite biosensor based on the electrical wiring of nitrite reductase by [ZnCr-AQS] LDH* / H. Chen, C. Mousty, S. Cosnier [et al.] // *Electrochem. Commun.* – 2007. – No. 9. – P. 2240–2245.

15. Kłos-Witkowska A. Enzyme-based fluorescent biosensors and their environmental, clinical and industrial applications / A. Kłos-Witkowska // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2015. – No. 24. – P. 19–25.
16. Long F. Recent advances in optical biosensors for environmental monitoring and early warning / F. Long, A. Zhu, H. Shi // *Sens.* – 2013. – No. 13 (10). – P. 928–948.
17. Marrazza G. Disposable DNA electrochemical biosensors for environmental monitoring / G. Marrazza, I. Chianella, M. Mascini // *Anal. Chim. Acta.* – 2009. – No. 387. – P. 297–307.
18. Mazhabia M. Disposable electrochemical DNA biosensor for environmental monitoring of toxicant 2-aminoanthracene in the presence of chlorine in real samples / M. Mazhabia, M. Arvandb // *J. Chem. Sci.* – 2014. – No. 126 (4). – P. 1031–1037.
19. Mehrotra P. Biosensors and their applications – a review / P. Mehrotra // *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. – 2016. – No. 6. – P. 153–159.
20. Mukhopadhyay S. S. Nanotechnology in agriculture prospects and constraints / S. S. Mukhopadhyay // *Nanotechnol. Sci. Appl.* – 2017. – No. 6. – P. 63–71.
21. Nakamura H. Current research activity in biosensors / H. Nakamura, I. Karube // *Anal. Bioanal. Chem.* – 2013. – No. 3 (77). – P. 446–468.
22. Parisi C. Proceedings of Workshop on Nanotechnology for the agricultural sector: from research to the field / C. Parisi, M. Viganì, E. R. Cerezo // URL : <https://ec.europa.eu/jrc>. – 2014.
23. Recent trends in rapid environmental monitoring of pathogens and toxicants: Potential of nanoparticle based biosensor and applications / P. Koedrit, T. Thasiphu, J. Weon [et al.] // *Sci. World J.* – 2015. – No. 1 (55). – P. 79–82.
24. Salgado A. M. Biosensor for Environmental Applications / A. M. Salgado, L. M. Silva, A. F. Melo // *In Tech*. – 2012. – No. 3. – P. 29–33.
25. Sara R.-M. Damià Barceló Biosensors as useful tools for environmental analysis and monitoring / R.-M. Sara, J. Maria, A. Lopez // *Anal. Bioanal. Chem.* – 2006. – No. 386. – P. 1025–1041.
26. Simple and rapid detection method using surface plasmon resonance for dioxins, polychlorinated biphenyl and atrazines / M. Shimomura, Y. Nomura, W. Zhang [et al.] // *Anal. Chim. Acta.* – 2012. – No. 434. – P. 223–230.
27. Total internal reflectance fluorescence (TIRF) biosensor for environmental monitoring of testosterone with commercially available immunochemistry: antibody characterization, assay development and real sample measurements / J. Tschmelak, M. Kumpf, N. Kappel [et al.] // *Talanta.* – 2006. – No. 69. – P. 343–350.

References

1. Adley, C. (2017). Past, present and future of sensors in food production. *Foods*, 3 (3), 491-510.
2. Aisyah, W.N., Jusoh, W., & Wong, L.S. (2014). Exploring the potential of whole cell biosensor: A review in environmental applications. *Intl. J. Chem. Env. Bio. Sci.*, 2 (1), 52-56.
3. Akkoyun, A., Kohe, V.F., & Bilitewski, U. (2000). Detection of sulphamethazine with an optical biosensor and anti-idiotypic antibodies. *Sens. Actuators*, 70, 12-18.
4. Parellada, J., Narvaez, A., Lopez, M.A., Dominguez, E., & Fernandez, J.J. (2017). Amperometric Immunosensors and Enzyme Electrodes for Environmental applications. *Anal. Chim. Acta*, 3 (62), 47-57.
5. Wilmer, M., Trau, D., Rennerberg, R., & Spener, F. (2007). Amperometric immunosensor for the detection of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) in water. *Anal. Lett.*, 30 (3), 515-525.
6. Burnworth, M., Rowan, S., & Weder, C. (2007). Fluorescent sensors for the detection of chemical warfare agents. *Chemistry – European Journal*, 13 (28), 7828-7836.
7. Campas, M., Prieto-Simon, B., & Marty, J.L. (2007). Biosensors to detect marine toxins: Assessing seafood safety. *Talanta*, 72, 884-895.
8. Koubova, V., Brynda, E., Karasova, L., Skvor, J., Homola, J., & Dostalek, J. (2011). Detection of foodborne pathogens using surface plasmon resonance biosensors. *Sens. Actuators*, 74, 100-105.
9. Wang, X., Dzyadevych, S.V., Chovelon, J.M., Jaffrezic, R.N., & Ling, C. (2006). Development of conductometric nitrate biosensor based on Methyl viologen/Nafion composite film. *Electrochem. Commun.*, 8, 201-205.
10. Mosinska, L., Fabisiak, K., Paprocki, K., Kowalska, M., Popielarski, P., & Szybowicz, M. (2013). Diamond as a transducer material for the production of biosensors. *Przemysl Chemiczny*, 6 (92), 919-923.
11. Del, C.M., Lioni, I., Taccini, M., Cagnini, A., & Mascini, M. (1997). Disposable screen-printed electrodes for the immunochemical detection of polychlorinated biphenyls. *Anal. Chim. Acta*, 342, 189-197.
12. Durrieu, C., & Tran-Minh, C. (2002). Optical algal biosensor using alkaline phosphatase for determination of heavy metals. *Environ. Res. Sect.*, 51, 206-209.
13. Endo, T., Okuyama, A., Matsubara, Y., Nishi, K., Kobayashi, M., & Yamamura, S. (2005). Fluorescence-based assay with enzyme amplification on a micro-flow immunosensor chip for monitoring coplanar polychlorinated biphenyls. *Anal. Chim. Acta*, 531, 7-13.
14. Chen, H., Mousty, C., Cosnier, S., Silveira, C., Moura, J.G., & Almeida, M.G. (2007). Highly sensitive nitrite biosensor based on the electrical wiring of nitrite reductase by [ZnCr-AQS] LDH. *Electrochem. Commun.*, 9, 2240-2245.
15. Kłos-Witkowska, A. (2015). Enzyme-based fluorescent biosensors and their environmental, clinical and industrial applications. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24, 19-25.
16. Long, F., Zhu, A., & Shi, H. (2013). Recent advances in Optical biosensors for environmental monitoring and early warning. *Sens*, 13 (10), 928-948.
17. Marrazza, G., Chianella, I., & Mascini, M. (2009). Disposable DNA electrochemical biosensors for environmental monitoring. *Anal. Chim. Acta*, 387, 297-307.

18. Mazhabia, M., & Arvandb, M. (2014). Disposable electrochemical DNA biosensor for environmental monitoring of toxicant 2-aminoanthracene in the presence of chlorine in real samples. *J. Chem. Sci.*, 126 (4), 1031-1037.
19. Mehrotra, P. (2016). Biosensors and their applications – a review. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 6, 153-159.
20. Mukhopadhyay, S.S. (2017). Nanotechnology in agriculture prospects and constraints. *Nanotechnol. Sci. Appl.*, 6, 63-71.
21. Nakamura, H., & Karube, I. (2013). Current research activity in biosensors. *Anal. Bioanal. Chem.*, 3 (77), 446-468.
22. Parisi, C., Vigani, M., & Cerezo, E.R. (2014). Proceedings of workshop on nanotechnology for the agricultural sector: from research to the field. Retrieved from: <https://ec.europa.eu/jrc>.
23. Koedrith, P., Thasiphu, T., Weon, J., Boonprasert, R., Tuitemwong, K., & Tuitemwong, P. (2015). Recent trends in rapid environmental monitoring of pathogens and toxicants: Potential of nanoparticle based biosensor and applications. *Sci. World J.*, 1 (55), 79-82.
24. Salgado, A.M., Silva, L.M., & Melo, A.F. (2012). Biosensor for environmental applications. *In Tech.*, 3, 29-33.
25. Sara, R.-M., Maria, J., & Lopez, A. (2006). Damià Barceló Biosensors as useful tools for environmental analysis and monitoring. *Anal. Bioanal. Chem.*, 386, 1025-1041.
26. Shimomura, M., Nomura, Y., Zhang, W., Sakino, M., Lee, K.-H., & Ikebukuro, K. (2012). Simple and rapid detection method using surface plasmon resonance for dioxins, polychlorinated biphenyl and atrazines. *Anal. Chim. Acta*, 434, 223-230.
27. Tschmelak, J., Kumpf, M., Kappel, N., Proll, G., & Gauglitz, G. (2006). Total internal reflectance fluorescence (TIRF) biosensor for environmental monitoring of testosterone with commercially available immunochemistry: antibody characterization, assay development and real sample measurements. *Talanta*, 69, 343-350.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОСЕНСОРОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В. П. Марценюк¹, И. В. Жулкевич², А. С. Сверстюк², Н. А. Мельник², Н. В. Козодий³, И. Б. Березовская⁴

¹Университет в Бельско-Бялой, г. Бельско-Бяла, Республика Польша

²Тернопольский национальный медицинский университет имени И. Я. Горбачевского МЗ Украины, г. Тернополь, Украина

³Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, г. Тернополь, Украина

⁴ВУКЗ ЛОС «Львовский институт медсестринства и лабораторной медицины имени Андрея Крупинского», г. Львов, Украина

Цель: рассмотреть классификацию биосенсоров (по типу преобразователя), принцип их работы, области применения биосенсоров в зависимости от вида загрязнителей окружающей среды и основные направления дальнейшего развития биосенсорных технологий.

Материалы и методы. В исследовании применены библиосемантический и аналитический методы.

Результаты. Биосенсор является портативным аналитическим устройством, состоит из чувствительного элемента биологического происхождения и физико-химического преобразователя. Его оборудование имеет следующие компоненты: биорецептор, преобразователь, процессор сигнала на выходе. Биосенсоры классифицируются в соответствии с биорецептора (ферменты, иммуноаффинность, ДНК и целые микробные клетки) или преобразователя (электрохимический, оптический, пьезоэлектрический, электрохимический и тепловой биосенсоры). Как биосенсоры, так и биологические приборы можно использовать в качестве инструментов контроля параметров окружающей среды – для оценки физического, химического и биологического мониторинга загрязняющих веществ в окружающей среде. Основные программы биосенсоров предназначены для обнаружения и контроля различных загрязняющих веществ, включая соли тяжелых металлов, органические и неорганические загрязнители, токсины, антибиотики и микроорганизмы.

Выводы. Применение современных нанотехнологических биосенсоров имеет большой потенциал для экологического мониторинга и для выявления загрязняющих веществ, поскольку данные биологические устройства являются портативными и позволяют проводить измерения в режиме реального времени. Принцип работы биосенсора основывается на способности фиксации биологического материала, происходит с помощью физического или мембранного захвата, нековалентных или ковалентных связей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: биохимическая потребность кислорода; биорецептор; биосенсор; мониторинг окружающей среды; преобразователь.

USE OF BIOSENSORS FOR ENVIRONMENT MONITORING

V. P. Martsenyuk¹, I. V. Zhulkevych², A. S. Sverstiuk², N. A. Melnyk², N. V. Kozodii³, I. B. Berezovska⁴

¹University in Belsko Biala, Belsko Biala, Poland

²I. Horbachevsky Ternopil National Medical University, Ternopil, Ukraine

³Ivan Puliui Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine

⁴Andrey Krupinskiy Lviv Institute of Nursing and Laboratory Medicine, Lviv, Ukraine

Purpose: to consider the classification of biosensors (by transducer type), the principle of their operation, the scope of biosensors depending on the type of environmental pollutants and the main directions of further development of biosensor technologies.

Materials and Methods. Biblisemantic and analytical methods were used in the study.

Results and Discussion. The biosensor is a portable analytical device that consists of a sensitive element of biological origin and a physico-chemical transducer. Its equipment has the following components: bioreceptor, transducer, signal processor at the output. Biosensors can be classified according to the bioreceptor (enzymes, immuno-affinity, DNA and whole microbial cells) or the transducer (electrochemical, optical, piezoelectric, electrochemical and thermal biosensors). Both biosensors and biological devices can be used as tools to control environmental parameters – to assess the physical, chemical and biological monitoring of pollutants in the environment. Major biosensor programs are designed to identify and control various contaminants, including heavy metal salts, organic and inorganic contaminants, toxins, antibiotics, and microorganisms.

Conclusions. The use of modern nanotechnological biosensors has great potential for environmental monitoring and for the detection of pollutants, since these biological devices are portable and allow for real-time measurements. The principle of operation of the biosensor is based on the ability to capture biological material occurs through physical or membrane capture, non-covalent or covalent bonds.

KEY WORDS: **biochemical oxygen demand; bioreceptor; biosensor; environmental monitoring; transducer.**

Рукопис надійшов до редакції 02.07.2019 р.

Відомості про авторів:

Марценюк Василь Петрович – доктор технічних наук, професор кафедри обчислювальної техніки та автоматики Університету в Бельсько-Бялій.

Жулкевич Ігор Валентинович – доктор медичних наук, професор кафедри онкології, променевої діагностики і терапії та радіаційної медицини Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського МОЗ України; тел.: +38(0352) 26-82-80.

Сверстюк Андрій Степанович – кандидат технічних наук, доцент кафедри медичної інформатики Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського МОЗ України; тел.: +38(0352) 52-09-90.

Мельник Наталя Анатоліївна – кандидат медичних наук, асистент кафедри загальної гігієни та екології Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського МОЗ України; тел.: +38(0352) 52-47-88.

Козодій Наталія Василівна – магістр кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя; тел.: +38(067) 880-74-61.

Березовська Ірина Борисівна – кандидат технічних наук, доцент ВНЗ ЛОР «Львівський інститут медсестринства та лабораторної медицини імені Андрея Крупинського»; тел.: +38(050) 101-29-58, +38(03222) 237-49-97.