

# ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ И ЭКОЛОГИЯ

ӘОЖ 544.6.018.47-039.7  
МРНТИ 31.15.33

DOI 10.55452/1998-6688-2021-18-2-12-19

## РЕНИЙ НЕГІЗІНДЕГІ СЕНСОРЛАР

**МОЛДАГАЛИЕВА А.А., КУДРЕЕВА Л.К., КАЛЫЕВА А.Р, ӘУЕЛБЕК Қ.**

*Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан*

***Аңдатпа.** Бұл әдеби шолу жұмысында рений негізіндегі электрохимиялық сенсорлардың жұмыстары қарастырылды. Рений негізіндегі сенсорлардың зерттеу жұмыстары бір-бірімен салыстырылып, кесте құрылды. Электрохимиялық және биологиялық сенсорлар дайындау үшін рений негізіндегі жұмысшы электродтардың синтезделу жолдары анықталды. Рений негізіндегі сенсорларды синтездеу үшін термиялық, микротолқынды термиялық тотығу, ультрадыбыс, магнетронды бұрку, биэкспоненциалды ыдырау әдістері кеңінен қолданылғандығы анықталды. Рений негізіндегі сенсорлардың таңдалынған аналитке қатысты анықтау шегі, сызықтық диапазоны, жауап беру уақыты, сезімталдығы, т.б. негізгі параметрлері салыстырылды. Қарастырылған ғылыми еңбектер нәтижесінде рений негізіндегі сенсорлардағы ренийдің маңызды элемент ретінде таңдалыну себебі жоғары сезімталдыққа, жоғары балқу температурасына (3000 °C-тан жоғары), жылдам реакцияға және төмен шығындарға ие болғандығы деп болжанды. Рений негізіндегі сенсорлардың хош иісті органикалық қосылыстарды, гистаминді, ДНҚ-ны, оттегіні, иондарды, карциноэмбрионалды антигенді, күн сарысын, жылу ағынын және ісік биомаркерін анықтау үшін қолданылғандығы анықталды. Бұл жұмыс рений негізіндегі электрохимиялық сенсорлар туралы ғылыми-зерттеу жұмыстарының қазіргі аспектілері туралы жалпылама ақпарат береді.*

***Түйінді сөздер:** рений, рений нанобөлішегі, биосенсор, электрохимиялық сенсор, аналит*

## СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ РЕНИЯ

**МОЛДАГАЛИЕВА А.А., КУДРЕЕВА Л.К., КАЛЫЕВА А.Р, АУЕЛБЕК К.**

*Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, 050000, Алматы, Казахстан*

***Аннотация:** В данной литературной обзорной работе были рассмотрены работы электрохимических сенсоров на основе рения. Исследовательские работы сенсоров на основе рения были сопоставлены между собой и была составлена таблица. Определены пути синтеза рабочих электродов на основе рения для изготовления электрохимических и биологических сенсоров. Установлено, что для синтеза сенсоров на основе рения широко использовались методы термического, СВЧ-термического окисления, ультразвука, магнетронного распыления, биэкспоненциального разложения. Сравнивались основные параметры сенсоров на основе рения по отношению к выбранному аналиту: предел обнаружения, линейный диапазон, время отклика, чувствительность и др. В результате рассмотренных научных работ предполагалось, что причиной выбора рения в качестве важного элемента в сенсорах на основе рения была высокая чувствительность, высокая температура плавления (выше 3000°C), быстрая реакция и низкие потери. Было обнаружено, что сенсоры на основе рения использовались для определения ароматических органических соединений, гистамина, ДНК, кислорода, ионов, карциноэмбрионального антигена, солнечного желтка, теплового потока и*

биомаркера опухоли. Данная работа дает обобщенную информацию о современных аспектах научно-исследовательских работ по электрохимическим сенсорам на основе рения.

**Ключевые слова:** рений, наночастица рения, биосенсор, электрохимический сенсор, аналит

## RHENIUM BASED SENSORS

MOLDAGALIYEVA A.A., KUDREYEVA L.K., KALIYEVA A.R., AUYELBEK K.

*Al-Farabi Kazakh National university, 050000, Almaty, Kazakhstan*

**Abstract.** In this literature review, the work of electrochemical sensors based on rhenium was considered. The research work of the rhenium-based sensors was compared with each other and a table was compiled. The ways of synthesis of rhenium-based working electrodes for the manufacture of electrochemical and biological sensors are determined. It was found that the methods of thermal, microwave-thermal oxidation, ultrasound, magnetron sputtering, and bi-exponential decomposition were widely used for the synthesis of rhenium-based sensors. The main parameters of the rhenium-based sensors were compared with respect to the selected analyte: detection limit, linear range, response time, sensitivity, etc. As a result of the reviewed scientific papers, it was assumed that the reason for choosing rhenium as an important element in rhenium-based sensors was high sensitivity, high melting point (above 3000°C), fast response and low losses. It was found that rhenium-based sensors were used to detect aromatic organic compounds, histamine, DNA, oxygen, ions, carcinoembryonic antigen, solar yolk, heat flux, and tumor biomarker. This paper provides a summary of the current aspects of research work on rhenium-based electrochemical sensors.

**Keywords:** rhenium, rhenium nanoparticle, biosensor, electrochemical sensor, analite

### Қысқартылған сөздер

МКҚТ-монокристалды құрылымды талдау  
МКЕ-монокристалды есептеу  
ТС-термиялық сәуле  
bpy=4.4'-бипиридин  
ИЛС-импульсті лазер сәулесі  
ЦВА-циклді вольтамперометрия  
БПЫ-биэкспоненциалды ыдырау  
ТЫ-термиялық ыдырау  
МБ-магнетронды бүрку  
ХИОҚ-хош иісті органикалық қосылыс  
МЦ-металды цикл  
ИҚС-инфрақызыл спектроскопия  
УД-ультрадыбыс  
КЭА-карциноэмбрионалды антиген  
ЭКТ-электрокаталитикалық тотығу  
ТТ-термиялық тотығу

### Кіріспе

Сенсор бір немесе бірнеше бастапқы өлшеу түрлендіргіштері бар құрылымдық оқшауланған құрылғы. Сенсор өлшеу ақпаратының сигналын беруге, одан әрі түрлендіру-

ге, өңдеуге және (немесе) сақтауға ыңғайлы, бірақ бақылаушының тікелей қабылдауына болмайтын нысанда шығаруға арналған. Датчиктер экономиканың көптеген салаларында тау-кен және өңдеу, өнеркәсіптік өндіріс, көлік, коммуникация, логистика, құрылыс, ауыл шаруашылығы, денсаулық сақтау, ғылым және басқа салаларда қолданылады. Қазіргі уақытта сенсор техникалық құрылғылардың ажырамас бөлігі болып табылады.

Рений негізіндегі сенсорлар көптеген зерттеуші ғалымдардың қызығушылығын арттыруда. Себебі рений өзінің көптеген қасиеттерінің артықшылығымен әртүрлі салаларда қолданысқа ие бола алатын сенсорлық жүйенің элементі бола алады. Сондықтан да бұл әдеби шолу жұмысында рений негізіндегі сенсорлардың мүмкіншіліктері, артықшылықтары, құрамдық бөліктері келтірілген. Рений негізіндегі сенсорлардың әркелкі салаларда қолданыс табуы көптеген мәселелер қатарын қысқартады. Соның ішінде жылу ағынын дәл өлшеу үшін рений негізіндегі сенсорлық жүйе маңызды рөл атқарады. Өйткені, вольфрам-рений жылу датчигі жоғары

сезімталдықтың, жоғары балқу температурасының, жылдам реакцияның және арзан бағаның артықшылықтарына байланысты металлургияда, аэроғарышта, авиацияда, атом энергетикасында ультра жоғары температураны өлшеу үшін кеңінен қолданылады. [1] зерттеуде вольфрам-рений құймаларын тотығудан қорғау үшін  $ZrO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $ZrB_2$  және  $SiC$  тұратын композициялық жабын қабаты таңдалған. Тотықтырғыш-төзімді жабын қабаты вольфрам-рений термобулы датчигінің бетінде золь-гель әдісі арқылы өсірілді және жабынды қондыру процесі зерттелген. Соңында вольфрам-рений термопарасы тотығу атмосферасында  $2500^{\circ}C$ -та оттекті ацетилен жалынымен сыналды және термопаралар 1800 секундтан астам уақытта жұмыс істей алатындығы анықталды. Ал [2] зерттеу жұмысында радиожиілікті бүрку әдісімен кремний карбиді негізіндегі вольфрам-ренийлі жұқа пленкалы термобулы сенсоры алынғандығы жайлы баяндалған. Тәжірибе көрсеткендей, жабын қабаты шамамен  $600^{\circ}C$  температурада тотығудан туындаған сенсордың ыдырауын болдырмайды да, суық дәнекерлеу температурасын  $0^{\circ}C$  деңгейінде ұстап тұрғанда, тұрақты максималды жұмыс температурасын  $1420^{\circ}C$ -қа дейін арттырды.

Оттегіні анықтау көптеген мәселелерді шешуге мүмкіндік береді. Ренийдің трикарбонил кешені (I) соңғы жылдары өзінің қызықты фотофизикалық және фотохимиялық қасиеттеріне байланысты айтарлықтай назар аударды. Жалпы оттегі сенсорлары океанография, метеорология, экология және биология сияқты бірқатар салаларда қолданылады [3, 4]. Бұл мақалада рений кешенінің синтезі мен люминесцентті қасиеттері ұсынылды. Аргонмен қаныққан ерітінділердегі кванттық сәулелену айтарлықтай артты (әсіресе 590 Нм жолақ үшін). Бұл кешендердің жалғыз оттегі сенсублизаторлары ретінде әрекет ету қабілеті және оларды оттегі сенсорлары ретінде пайдалану үшін зерттелген [5]. [6] зерттеуінде силсесквиоксан пленкасына  $[Re(CO)_3BR]$  кешені енгізілгеннен кейін көптеген фотофизикалық қасиеттері мен  $O_2(^1\Delta_g)$ -ны фотосенсибилизациялау қабілетін сақтайтын сенсор

ролін атқара алатынын көрсеткен. Молекулалық оттегінің қатысуымен  $Re(CO)_3Br(PBI-Cab)$  қозған күйінің өмір сүру уақыты  $N_2$  таза атмосферасындағы 5,04 мкс-тен ауа атмосферасында 0,31 мкс-ке дейін айтарлықтай төмендейтіндігін авторлар анықтады. [7] зерттеуінде  $Re(CO)_3(CPO)Br$  кешені оттегіні оптикалық анықтау үшін жасалған. Осылайша динамикалық механизмнен кейін композиттік эмиссия  $O_2$  молекулаларымен сөндірілетіні Лян, Ян, Фенга авторларының зерттеу жұмысында расталды.

### Негізгі бөлім

Фотоэлектрохимиялық сенсорлық жүйе микроэлементтерді, әсіресе күрделі биологиялық жүйеде биологиялық белсенді молекулаларды талдауға мүмкіндік береді. Соның ішінде өтпелі металл дихальогенидтер қатарына жататын рений дисульфиді ( $ReS_2$ ) керемет электронды, тербелмелі және оптикалық сипаттамаларға ие.  $ReS_2$  осы ерекше қасиеттерге ие болғандықтан, ол электронды құрылғылар өндірісінде соның ішінде фотодетектор, литий-ионды аккумулятор, ең маңыздысы фотоэлектрохимиялық сенсорлық жүйеде кеңінен қолданылады. Ал  $ReS_2$  нано қабаттарына негізделген фотоэлектрохимиялық иммуносенсор әлі күнге дейін ісік биомаркерлерін анықтау үшін маңыздылығы жоғары жүйе ретінде зерттелуде.

[8] зерттеуде ренийдің (I) алкокси-көпірлі бинуклеарлық кешендері Альцгеймер ауруымен бірге жүретін  $\beta$ -амилоидты фибриллалардың агрегациясын селективті және сезімтал анықтау үшін сенсор ретінде қолданылатындығы жайлы баяндалған. Сәулелену қарқындылығының өзгеруімен қатар, нәтижелер бұл кешендерден құрылған сенсорлар біріншіден, ДНҚ-ның жоғары модуляцияланған қасиетін көрсетті, ол әртүрлі диацияларды саралауға мүмкіндік берді. Екіншіден, иондық қоспада селективтілікті көрсете алды. [9]. Үндістанда қант диабетімен ауыратын 50,8 миллион адам тұратыны үлкен мәселені туғызды [10]. Инсулин жоғары температура, төмен рН және т.б. сияқты белгілі-бір

жағдайларда амилоидты фибриллалардың түзілуіне бейім болып келеді. Бұл инсулин фибриллалары инсулиннің қайталанған инъекцияларында байқалатын инсулин амилоидының шөгінділеріне байланысты II типті қант диабетін емдеуге елеулі қауіп төндіреді [11]. Сондықтан амилоидты "жараларды" сезімтал анықтаудың жақсы әдістерін жасау клиникалық диагностика мен терапевтік қолдануда өте маңызды роль атқарады. Соңғы жылдары қант диабетін емдеуге қойылатын талаптардың салдарынан инсулин фибрилляциясын анықтауға қызығушылықтың өсуі байқалады. Авторлар [12] жұмыста классикалық амилоидты Тиофлавин бояуы мен флуоресцентті әдісті қолдана отырып, рений негізіндегі сенсор көмегімен инсулин фибриллаларын анықтау жайлы хабарлаған. Белсенді ИАШ бояғышын (индукцияланған агрегация шығындысы) 1,2 - бис [4-(3 - сульфonatoпропоксил)фенил]-1,2-дифенилэтил тұзы негізіндегі электродты инсулин фибриллаларының сенсоры және ингибиторы ретінде қолдануды көрсеткен. [13]. Бұл ренийлі (I) бинуклеарлық кешендер биомолекулаларға және оптикалық визуализацияға арналған сенсор ретінде фотоэлектрлік қасиеттерге ие екені зерттеу барысында анықталған. Сонымен қатар ұзын алкилді тізбектердің агрегациясы агрегатталған фосфоресценцияның жоғарылау қасиеттеріне және амилоидты фибриллаларды анықтауға арналған сенсорлық жүйеге келтірілген [14]. Ірі қара сарысуындағы альбуминің конформациялық өзгерістерін анықтауға арналған рений (I) негізіндегі флуоресцентті сенсор жайлы зерттелген. Жалпы құрылымы  $[Re(CO)_3(N-N)L]PF_6$  болатын рений (I) кешендерінің ақуыз байланыстыратын қасиеттері (мұндағы  $n-n = 4,4$ -дина-ноил-2,2-бипиридин және  $L = \text{ру-3-COOH}$  және  $\text{Ру-3-CONH}_2$ ) бұқаның сарысуы альбуминімен  $pH=7,4$ -те ультракүлгінді сіңіру спектрін қолдана отырып зерттелген [15]. [16] жоғары тұрақты Re нанобөлшектері алғаш рет органикалық еріткіште біртекті төмендету жолымен ДНҚ-ны анықтау мақсатында бөлме температурасында 10 минут ішінде синтезделген. Ал осы синтезделген Re органозолы тоңазытқышта мөрленген кон-

тейнердің астында сақталған кезде 6 айдан астам уақыт бойы өте тұрақтанған.

Бензол, ксилол және толуол органикалық қосылыстар денсаулық үшін созылмалы жағымсыз әсерлерді, соның ішінде астма, аллергия және қатерлі ісік ауруын тудыратыны белгілі. Соған байланысты рений негізінде модификацияланған сенсорлар көптеген ғалымдардың назарын аударған. Бұл жұмыста [17] гистаминді-маңызды биогендік аминді анықтау үшін  $ReO_2$  негізімен модификацияланған гетерогенді көміртекті электродты сенсорды қолдану мүмкіндігі көрсетілген. Бұл әдіс балық тұздығындағы гистаминді анықтауда сәтті қолданылған. [18] зерттеуінде екі алкокси-көпірлі бинадерлік комплекстердің  $[ \{ Re(CO)_3(1,4-NVP) \} 2(\mu 2-OR)_2 ]$  (1,  $R = C_4H_9$ ; 2,  $C_{10}H_{21}$  4-лигандпен (1-нафтилвинил) пиридинмен (1,4-NVP) ұзын алкил тізбегінің күшейтілген эмиссиясының сипаттамалары көрсетілген.

Аниондарға арналған жаңа химосенсорлардың дамуы биологиялық, экологиялық және химиялық процестердегі іргелі рөліне байланысты супрамолекулалық химия саласындағы маңызды тақырып болып табылады. [19] зерттеуде авторлар полярланған N-H-ты анықтау мақсатында рений карбонилдерінің бірнеше кешенін зерттеудің соңғы нәтижелерін сипаттаған. Сондай-ақ тиоамидтер мен 2,6-пиридиндикарбонилдихлорид, изофталоилдихлорид және терефталойлдихлорид туындылары синтезделген. [20] зерттеуінде авторлар 2,2'-бипиридин лигандтарының амидті, мочевиалы және тиомочевинді туындылары Re (I) негізіндегі үш кешенді түрлерімен спектрлік әдістер арқылы синтезделгендігі жайлы сипатталған. Бұл кешендер УК және ЯМР спектроскопия әдісімен зерттелген  $CN^-$ ,  $F^-$ ,  $CH_3COO^-$  және  $H_2PO_4^-$  сияқты аниондарды қосқанда айтарлықтай спектрлік өзгерістер көрсететіні анықталды. [21] зерттеуінде тиоамид, мочевиана және тиомочевин лигандтары синтезделген, содан кейін олардың көпірлі ренийдің (I) трикарбонилдиимин кешендері алынған. Тиомочевина негізіндегі кешендер F, Cl және Br сияқты галогендермен айтарлықтай эмиссиялық реакцияларды



көрсеткен. Амидотиомочевина негізіндегі рений (I) кешені сулы және жартылай сулы еріткіштерде цианид аниондарын анықтауда сенсор ролін атқара алатыны нәтижелермен дәлелденген. [22] зерттеу жұмысында авторлар Re(I) иминді функционданған кешендерін жасап шығарған. Авторлар оларды ацетонитрилдегі  $\text{Cu}^{2+}$  ионымен селективті байланыстыру арқылы химосенсорлар ретінде қолдануға болатындығын тәжірибе барысында анықтаған. [23] зерттеуінде 2,20-бипиридин лигандтарына қосылған гидроксил және имин топтары бар рений (I) трикарбонил кешендерінің сериясы синтезделген және әртүрлі спектроскопиялық әдістермен сипат-

талған. Бұл кешендер  $\text{Cu}^{2+}$  ионы үшін флуоресцентті "қосылатын" химосенсор ретінде қызмет ететіні анықталған. Сенсордың өмір сүру уақыты және Re (I) кешенінің кванттық шығысы  $\text{Cu}^{2+}$  ионын қосқанда айтарлықтай артқан. Мұнда сипатталған эксперименттер нәтижелері металл рецепторлары аниондарды қабылдаудың жаңа тәсілдерін жасауға мүмкіндік береді деп болжанған. [24]. Бұл [25] мақалада ренийдің (I) және иридийдің (III) люминесцентті кешендерін иондарға, молекулаларға және биомолекулаларға сенсор ретінде қолдану қарастырылған. Келесі кестеде рений негізіндегі сенсорларды салыстыру келтірілген.

**1-кесте. Рений негізіндегі сенсорларды салыстыру кестесі**

Сенсор электрод беті құрамы	Зерттеу әдісі	Re сенсорды синтездеу әдісі	Аналит	Жауап беру уақыты	Сезімталдығы	Анықтау шегі	Әдебиеттер
$\text{Re}(\text{CO})_3(\text{Br-PODZ})\text{BR}$	МКҚТ	Допинг	Оттегі	9 с	3,91	-----	[26]
$\text{Re}(\text{CO})_3\text{Br}(\text{ПБИ})$	МКЕ	ТС	Оттегі	6 с	20,53	-----	[27]
$\text{Re}_2(\text{CO})_6(\text{bpy})_2$ (Ду-фен) <sub>2</sub>	Қоспалау	ИЛС	Оттегі	8 с	20,1	-----	[28]
$\text{Re}(\text{CO})_3(\text{POP})\text{Br}$	ЦВА	БПЫ	Оттегі	5 с	7,07	-----	[29]
W-5Re/W-26Re	Микронды	ТЫ	Жылу ағыны	-----	$3,8 \times 10^{-6} \text{ В}/(\text{кВт}/\text{м}^2)$	-----	[30]
WRe26-In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SEM, XRD және XPS	ТЫ	Жылу ағыны	-----	201,6 мкВ/К	-----	[31]
Тетра Re МЦ	-----	МБ	ХИОҚ	-----	-----	30 г/л	[32]
4-ОН Re МЦ	ИҚС	-----	Амин	-----	-----	-----	[33]
Сэндвич типті $\text{ReS}_2$ нанобөлшегі	-----	УД	КЭА	-----	-----	0,468 пг/мл	[34]
(ReCDAC)	ЭКТ	ТТ	Күн сарысы	-----	91,53 мкА/мкМ	16 Нм	[35]

### Қорытынды

Барлық зерттеу мақалаларын қорытындылай келе зерттеу жұмысының рений негізіндегі электродтар сенсор ретінде негізінен оттегіні, жылу ағынын, гистаминді анықтауға қолданылғанын байқауға болады. Жалпы ренийдің кешенді қосылыстары сенсордың электродты бөлігіне көбірек пайдаланылғандығы мәлім болды. Рений қосылыстары көбіне термиялық жолмен синтезделген. Бұл жұмыста рений негізіндегі сенсорларға бай-

ланысты мақалалар қарастырылып, сенсорды әзірлеудегі қолданылған әдістер, анықтаушы аналиттер мен оларды анықтау шегі және сызықтық диапазоны бір-бірімен салыстырылды. Рений негізіндегі электродтарды сенсор ретінде қолдану көптеген жылдар бойы қызығушылық тудырып жатқандығы анықталды. Бірақ осындай негіздегі жұмыстар әлі де толықтай зерттеліп, әлемдік зерттеуші ғалымдардың қызығушылығын арттырады деген үмітпенен қорытынды жасауға болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

1. L. Zhang, Y. Peng, J. Zhou, R. Zhang, S. Chen, and X. Yang, "Tungstenrhenium thermocouple sensor for in-situ ultra-high temperature measurement of hypersonic aircraft surface" 2014, pp. 1-5.
2. Zhang, Zhongkai et al. 2019. "Effect of Oxidation on Conductivity Characteristics of Tungsten-Rhenium Thin-Film Thermocouples Sensor." *Proceedings of the 14th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, NEMS 2019*: pp. 114–17.
3. Kuczynska, Paulina, Malgorzata Jemiola-Rzeminska, and Kazimierz Strzalka. 2015. "Photosynthetic Pigments in Diatoms." *Marine Drugs* 13(9): pp. 5847–81.
4. Papkovsky, B. Dmitri, and I. Ruslan, Dmitriev. 2013. "Biological Detection by Optical Oxygen Sensing." *Chemical Society Reviews* 42(22): pp. 8700–8732.
5. Valdés, Eliseo et al. 2020. "An Amine Linker Group Modulates Luminescent Properties in a Rhenium (I) Tricarbonyl Complex. How Can It Be Applied for Ratiometric Oxygen Sensing?" *Dyes and Pigments* 172(August 2019): pp. 1077-87.
6. Spada, M. Ramiro et al. 2015. "Clean Singlet Oxygen Production by a ReI Complex Embedded in a Flexible Self-Standing Polymeric Silsesquioxane Film." *Journal of Physical Chemistry C* 119(18): pp. 10148–59.
7. Liu, Liang, Yan Yang, and Jun sheng Feng. 2017. "Study on a Rhenium Complex Having an Electron-Pulling Ring and Its Oxygen Sensing Application: Synthesis, Characterization and Sensing Performance." *Sensors and Actuators, B: Chemical* 253: pp. 310–16.
8. Sathish, Veerasamy et al. 2014. 130 Talanta Alkoxy Bridged Binuclear Rhenium (I) Complexes as a Potential Sensor for  $\beta$ -Amyloid Aggregation. Elsevier. pp. 274-279
9. Mullice, A. Lucy, and J.A. Simon, Pope. 2010. "The Development of Responsive, Luminescent Lifetime Probes Based upon Axially Functionalised Fac-[Re(CO)<sup>3</sup>(Di-Imine)(L)]<sup>+</sup> Complexes." *Dalton Transactions* 39(25): pp. 5908–17.
10. International Diabetes Foundation (IDF), Diabetes Atlas, 4th edition, 2010. [77] C. Bryant, D.B. Spencer, A. Miller, D.L. Bakaysa, K.S. McCune, S.R. Maple, A.H. Pekar, D.N. Brems, Acid stabilization of insulin, *Biochemistry* 32 (1993) pp. 8075–8082.
11. J. Mohanty, S.D. Choudhury, H. Pal, A.C. Bhasikuttan, Early detection of insulin fibrillation: a fluorescence lifetime assay to probe the pre-fibrillar regime, *Chem. Commun.* 48 (2012) pp. 2403–2405.
12. N. K.Mishra, K. B. Joshi, S. Verma, Inhibition of Human and Bovine Insulin Fibril Formation by Designed Peptide Conjugates, *Mol. Pharmaceutics* 10 (2013) pp. 3903–3912.
13. V. Sathish, A. Ramdass, Z.Z. Lu, M. Velayudham, P. Thanasekaran, K.L. Lu, S. Rajagopal, Aggregation Induced Emission Enhancement in Alkoxy Bridged Binuclear Rhenium(I) complexes-Application as Sensor for Explosives and Interaction with Microheterogeneous Media, *J. Phys. Chem. B* 117 (2013) pp. 14358–14366
14. V. Sathish, E. Babu, A. Ramdass, Z.Z. Lu, T.T. Chang, M. Velayudham, P. Thanasekaran, K.L. Lu, W.S. Li, S. Rajagopal, Photoswitchable alkoxy-bridged binuclear rhenium(I) complexes – a potential probe for biomolecules and optical cell imaging, *RSC Adv.* 3 (2013) pp. 18557–18566.
15. Bhuvaneswari, Jayaraman, Ayub Khan Fathima, and Seenivasan Rajagopal. 2012. "Rhenium(I)-Based Fluorescence Resonance Energy Transfer Probe for Conformational Changes of Bovine Serum Albumin." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 227(1): pp. 38–44.
16. K. Sakthikumar, et al. 2016. "A Highly Stable Rhenium Organosol on a DNA Scaffold for Catalytic and SERS Applications." *Journal of Materials Chemistry C* 4(26): pp. 6309–20.
17. Veseli, Albana et al. 2016. "Electrochemical Determination of Histamine in Fish Sauce Using Heterogeneous Carbon Electrodes Modified with Rhenium(IV) Oxide." *Sensors and Actuators, B: Chemical* 228: pp. 774–81.

18. Sathish, Veerasamy et al. 2013. "Aggregation-Induced Emission Enhancement in Alkoxy-Bridged Binuclear Rhenium(I) Complexes: Application as Sensor for Explosives and Interaction with Microheterogeneous Media." *Journal of Physical Chemistry B* 117(46): pp. 14358–66.
19. Chang, Kai Chi, Shih Sheng Sun, and Alistair J. Lees. 2012. "Anion Sensing by Rhenium(I) Carbonyls with Polarized N-H Recognition Motifs." *Inorganica Chimica Acta* 389: 16–28.
20. Ramdass, Arumugam et al. 2013. "Monometallic Rhenium(I) Complexes as Sensor for Anions." *Inorganic Chemistry Communications* 35: pp. 186–91.
21. Odago, Maurice O. et al. 2011. "Thioamide, Urea and Thiourea Bridged Rhenium(I) Complexes as Luminescent Anion Receptors." *Inorganica Chimica Acta* 374(1): pp. 558–65.
22. Ramdass, Arumugam et al. 2017. 240 *Sensors and Actuators, B: Chemical* Luminescent Sensor for Copper(II) Ion Based on Imine Functionalized Monometallic Rhenium(I) Complexes. Elsevier B.V. pp. 1216–1225
23. Ramdass, Arumugam et al. 2015. "Synthesis and Characterization of Monometallic Rhenium(i) Complexes and Their Application as Selective Sensors for Copper(Ii) Ions." *RSC Advances* 5(48): pp. 38479–88.
24. Bhuvaneswari, Jayaraman, Paulpandian Muthu Mareeswaran, Karunanithi Anandababu, and Seenivasan Rajagopal. 2014. "The Switching of a Rhenium(I) Complex from Turn-off to Turn-on Sensor System through Protein Binding." *RSC Advances* 4(65): pp. 34659–68.
25. Lo, Kenneth Kam Wing, Man Wai Louie, and Kenneth Yin Zhang. 2010. "Design of Luminescent Iridium(III) and Rhenium(I) Polypyridine Complexes as in Vitro and in Vivo Ion, Molecular and Biological Probes." *Coordination Chemistry Reviews* 254(21–22): pp. 2603–22.
26. Pu, Wan, Zhao Lun, Wang Lisha, and Xu Guangyang. 2013. "Linear Oxygen-Sensing Response from a Rhenium Complex Induced by Heavy Atom: Synthesis, Characterization, Photophysical Study and Sensing Performance." *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 112: pp. 228–36.
27. Wang, Chuan E. 2014. "An Oxygen-Sensing Rhenium(I) Complex with a Carbazole 'Shield' in Its Diamine Ligand: Synthesis, Characterization, Photophysical Property and Sensing Performance." *Journal of Luminescence* 145: pp. 531–38.
28. Xu, Xiao Yong, and Han Ning Xiao. 2012. "A Diamine Ligand with Long Arms and Its Corresponding Dinuclear Rhenium(I) Complex: Synthesis, Characterization, Photophysical Property, and Sensing Activity towards Molecular Oxygen." *Journal of Luminescence* 132(9): pp. 2251–58.
29. Wang, Xin Fang. 2013. "Study on a Rhenium(I) Complex with Oxadiazole-Derived Diamine Ligand: Synthesis, Characterization, Photophysical Property and Luminescence Response towards Molecular Oxygen." *Journal of Luminescence* 134: pp. 508–14.
30. Fu, Xiaoli et al. 2020. "High-Temperature Heat Flux Sensor Based on Tungsten-Rhenium Thin-Film Thermocouple." *IEEE Sensors Journal* 20(18): pp. 10444–52.
31. Bian et al. 2020. "Effect of Annealing on the Thermoelectricity Properties of the WRe26-In2O3 Thin Film Thermocouples." *Micromachines* 11(7): pp. 664–670
32. Huang, Genin Gary et al. 2011. "Gondola-Shaped Tetra-Rhenium Metallacycles Modified Evanescent Wave Infrared Chemical Sensors for Selective Determination of Volatile Organic Compounds." *Talanta* 85(1): pp. 63–69.
33. Huang, Genin Gary et al. 2018. "Cavity-Containing Rhenium Metallacycle Treated Evanescent Wave Infrared Chemical Sensors for the Selective Determination of Odorous Amines in the Atmosphere." *Sensors and Actuators, B: Chemical* 254: pp. 424–30.
34. Liu, Kou et al. 2020. "A Sandwich-Type Photoelectrochemical Immunosensor Based on ReS2 Nanosheets for High-Performance Determination of Carcinoembryonic Antigen." *Sensors and Actuators, B: Chemical* 320: pp. 128341. 35.

35. Veerakumar, Pitchaimani et al. 2018. “Activated Porous Carbon Supported Rhenium Composites as Electrode Materials for Electrocatalytic and Supercapacitor Applications.” *Electrochimica Acta* 271: pp. 433–47.
- 

**Information about authors:**

1. Moldagalieva Aida Asylbekovna – Master student, Al-Farabi Kazakh National University  
Email: Aidaa9898@mail.ru
2. Kudreeva Leila Kadirisizovna – Candidate of Chemical Sciences, Deputy Dean for educational, methodological and educational work, Al-Farabi Kazakh National University  
Email: Leila.Kudreyeva@kaznu.kz  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-5670>
3. Kalyeva Akmerrey Rakhimovna – PhD student, Al-Farabi Kazakh National University  
Email: akmerrey.kali@gmail.com
4. Auelbek Kazyna – Master student, Al-Farabi Kazakh National University  
Email: kauyelbek@mail.ru