

## НАЗИВ ФАКУЛТЕТА Природно-математички факултет

## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
<p>1. Датум и орган који је именовao комисију</p> <p><b>Наставно-научно веће Природно-математичког факултета у Новом Саду на 30. седници одржаној 15.06.2017. године именовало је Комисију за оцену урађене докторске дисертације под насловом "Кинетика и механизам уклањања одабраних метала из воде адсорпцијом на аминокфункционализованом угљеничном наноматеријалу" кандидата АЛЕКСАНДРЕ ШУЋУРОВИЋ за стицање стручног назива доктор наука заштите животне средине.</b></p> <p>2. Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>Др Божо Далмација, редовни професор, ужа научна област Хемија (Хемијска технологија и Заштита околине), изабран 18.03.1996. године, Природно-математички факултет, Нови Сад, – председник.</b></li> <li>2. <b>Др Јелена Тричковић, ванредни професор, ужа научна област Физичка хемија, изабрана 01.02.2015. године, Природно-математички факултет, Нови Сад, – ментор.</b></li> <li>3. <b>Др Јасмина Агбаба, редовни професор, ужа научна област Заштита животне средине, изабрана 26.03.2015. године, Природно-математички факултет, Нови Сад, члан.</b></li> <li>4. <b>Др Марина Шћибан, редовни професор, ужа научна област Биотехнологија, изабрана 13.02.2014. године, Технолошки факултет, Нови Сад, члан.</b></li> </ol>
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Име, име једног родитеља, презиме: <b>Александра (Никола) Шућуровић</b></li> <li>2. Датум рођења, општина, држава: <b>22.12.1975. Београд, Савски Венац, Република Србија</b></li> <li>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив</li> <li>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија <b>2011. године, заштита животне средине</b></li> <li>5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране: <b>Факултет за физичку хемију, Физичко-хемијска својства и оксидативна стабилност уља добијеног из лиофилизованог семена малине и јагоде, физичка хемија, 27.05.2010.</b></li> <li>6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: <b>физичка хемија</b></li> </ol>
III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:
<p><b>"Кинетика и механизам уклањања одабраних метала из воде адсорпцијом на аминокфункционализованом угљеничном наноматеријалу"</b></p>

#### IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Докторска дисертација је написана на 178 страна, а садржи 38 слика, 21 табелу и 344 литературна навода. Текст садржи шест поглавља: Увод - 3 стране, Теоријски део - 67 страна, Експериментални део - 12 страна, Резултати и дискусија - 65 страна, Закључак - 5 страна и Литература - 19 страна. Дисертација садржи и Биографију - 1 страна и Кључну документацијску информацију - 6 страна.

У оквиру докторске дисертације испитано је адсорпционо понашање одабраних метала (Cu(II), Cd(II), Pb(II), Cr(VI)), као и As(III), на аминокфункционализованом угљеничном наноматеријалу, MWCNT-NH<sub>2</sub>, на четири одабране рН вредности (3; 4,5; 6 и 11) и при различитим саставима воденог раствора (присуство хлорида, нитрата, сулфата и фосфата), а у циљу испитивања могућности примене MWCNT-NH<sub>2</sub> за уклањање арсена и јона метала из водених раствора у области њихових релативно ниских концентрација (0,01-3 mg L<sup>-1</sup>).

Одабир метала вршен је на основу литературних података о учесталости њиховог појављивања у отпадним водама, као и у природним водама. Неки од одабраних метала, као што су олово и кадмијум и њихова једињења, се налазе на листи приоритетних супстанци према Оквирној Директиви о водама Европске Уније (2000/60/ЕЦ), а бакар и арсен се налазе на листи приоритетних супстанци специфичних за слив Дунава, што значи да је неопходно њихово ефикасно уклањање из отпадних вода како би се заштитили акватични системи. Веома значајан регионални проблем јесте присуство арсена геолошког порекла у подземним водама које се користе за припрему воде за пиће. С обзиром да је присуство и As(III) и одабраних тешких метала непожељно у води за пиће, због њиховог токсичног дејства, изузетно је важно њихово ефикасно уклањање у припреми воде за пиће. Овде посебно долази до изражаја значај примене техника уклањања које су ефикасне у области ниских концентрација како би се задовољили стандарди квалитета воде за пиће.

За уклањање метала изабрана је техника адсорпције као често примењивана и са економског аспекта приступачна техника, а као адсорбент је коришћен угљенични наноматеријал из групе вишеслојних угљеничних нанотуби (ВСУНЦ) које су функционализоване аминок групама како би се повећао њихов афинитет ка металима. Генерално, ова група материјала је добро испитана за уклањање органских полутаната, док је њихова ефикасност за уклањање метала из водених система слабо истражена до сада. Карактеризација наноматеријала је укључивала одређивање присуства површинских функционалних група, одређивање специфичне површине, запремине пора и средњег пречника пора, као и одређивање тачке нултог наелектрисања.

Како би се добили подаци о могућем механизму процеса адсорпције, као и о брзини одвијања процеса, односно времену неопходном за успостављање адсорпционе равнотеже, кинетичка испитивања су извршена на четири одабране рН вредности. Да би се одредили адсорпциони капацитети и афинитети адсорбента према испитиваним јонима и на тај начин добили додатни подаци неопходни за објашњавање механизма адсорпције, адсорпција је испитана и у равнотежним условима, такође на четири одабране рН вредности. Потом су адсорпциони експерименти у равнотежним условима изведени на једној рН вредности у присуству одабраних аниона (хлорида, нитрата, сулфата и фосфата), а на основу добијених резултата предложен је механизам адсорпције одабраних метала (Cu(II), Cd(II), Pb(II), Cr(VI)) и As(III) на аминокфункционализованом угљеничном наноматеријалу у испитиваним условима. Извршено је поређење резултата ове студије са актуелном литературом из области третмана вода како би се утврдило да ли MWCNT-NH<sub>2</sub> могу конкурисати постојећим, комерцијалним и широко коришћеним адсорбентима у третманима вода.

## V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

У УВОДУ докторске дисертације указано је на проблем загађења животне средине услед присуства арсена и тешких метала у акватичним системима, најчешће услед испуштања непречишћених или недовољно пречишћених индустријских и комуналних отпадних вода. У овом делу је истакнуто да је адсорпција најчешће коришћена физичко-хемијска метода за уклањање арсена и метала из воде. Новији литературни подаци показују да се у задњих десет - петнаест година интензивно ради на синтези нових адсорбената са побољшаним карактеристикама, међу којима се врло често спомињу наноматеријали, као и угљенични наноматеријали. Такође, дато је образложење теме докторске дисертације и дефинисани су предмет и циљеви истраживања.

У ОПШТЕМ делу докторске дисертације дат је преглед хемијских особина арсена и испитиваних метала у акватичним системима, као и њихове токсичности, типичних концентрација у различитим воденим срединама (површинске воде, подземне воде, отпадне воде) и максимално дозвољене концентрације према важећој националној легислативи. Даље је дат преглед конвенционалних метода за уклањање арсена и метала из воде, као и литературни преглед најчешће коришћених адсорбената који се користе у третману вода и њихових адсорпционих особина како би се могло извршити поређење са резултатима докторске дисертације. Такође, дата је теорија адсорпционог процеса. Приказани су математички модели који се користе за описивање брзине адсорпционог процеса, а који су важан алат у оптимизацији адсорпционог процеса и одређивању механизма адсорпције. Дат је преглед најчешће коришћених математичких модела за описивање процеса адсорпције у условима адсорпционе равнотеже, а који су од великог практичног значаја за оцену ефикасности адсорпционог процеса, као и за сам дизајн адсорбента. Детаљно су описане морфолошке особине УНЦ које утичу на адсорпцију арсена и тешких метала из воде, као и најчешће коришћене методе дисперзије УНЦ за превазилажење проблема мале дисперзивности у воденим растворима. Пажљиво су анализирани особине УНЦ и сагледани потенцијални утицаји као што су рН вредност, јонска јачина, температура, време контакта између адсорбента и адсорбата и количина УНЦ на адсорпцију арсена и тешких метала из водених раствора. Дати литературни прегледи су актуелни, опсежни, али у исто време у потпуности усмерени на проблем истраживања.

У ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОМ делу описане су коришћене експерименталне технике и методе. Експеримент се састојао из пет фаза:

1. Прва фаза укључивала је одабир адсорбента, тешких метала и анјона, и дати су критеријуми који су коришћени при избору УНЦ, тешких метала и анјона. У овом делу описана је детаљна процедура синтезе и функционализације ВСУНЦ.
2. У другој фази извршена је карактеризација одабраних ВСУНЦ, а у самој тези дат је детаљан опис коришћених техника у карактеризацији испитиваног адсорбента као што су одређивање специфичне површине, запремине пора, средњег пречника пора и тачке нултог наелектрисања, као и методе за испитивање присуства функционалних група.
3. Трећа фаза обухватала је кинетичка испитивања ради стицања увида у ефикасност адсорбента у погледу брзине уклањања арсена и метала из водених раствора. У овом делу детаљно је описан поступак извођења кинетичких експеримената, као и почетних услова.
4. Четврта фаза, обухватала је извођење адсорпционих експеримената у равнотежним условима. У овом делу детаљно су приказани сви услови и принципи рада.
5. Последња фаза укључивала је извођење адсорпционих експеримената у равнотежним условима у присуству одабраних анјона. Детаљно су приказани сви принципи и услови рада.

У поглављу РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА дати су резултати истраживања који су

представљени у пет поглавља. У првом потпоглављу, *Карактеризација наноматеријала*, представљени су резултати карактеризације испитиваног адсорбента и добијене вредности су упоређене са литературним подацима за најчешће коришћене адсорбенте на бази угљеника (активни угаљ и различите угљеничне наноматеријале) који се користе за уклањање арсена и метала из воде. У следећем потпоглављу, *Адсорпциона кинетика*, обрађени су и дискутовани подаци испитивања брзине адсорпционог процеса на четири испитиване рН вредности. Експериментални подаци су описани са неколико кинетичких, реакционих и дифузионих модела, а на основу добијених резултата предложен је механизам адсорпције арсена и металних јона на амонификционализованим вишеслојним угљеничним наноцевима. Такође, утврђено је време неопходно за успостављање адсорпционе равнотеже које је даље коришћено у експериментима у равнотежним условима. У трећем потпоглављу, *Адсорпција у равнотежним условима*, примењена су два адсорпциона модела и одређени су адсорпциони капацитети и афинитети испитиваног адсорбента за одабране метале, и предложен је механизам адсорпције арсена и испитиваних метала на ВСУНЦ. Резултати испитивања утицаја рН вредности на адсорпцију арсена и металних јона приказан је у потпоглављу *Утицај рН вредности на адсорпцију арсена и одабраних јона метала*. На основу резултата за четири испитиване рН вредности предложен је механизам везивања арсена и металних јона за активне центре на површини адсорбента. Такође, урађено је поређење ефикасности уклањања арсена и метала на ВСУНЦ са ефикасношћу других испитиваних и комерцијалних адсорбената. У последњем потпоглављу, *Утицај анјона на адсорпцију арсена и одабраних јона метала*, прво су одређени адсорпциони капацитети и афинитети ВСУНЦ за арсен и одабране метале у дејонизованој води и у присуству различитих врста анјона, на основу чега је утврђено да ли присуство анјона утиче на уклањање арсена и метала из воде, и ако утиче, на који начин се то дешава. Такође, у овом поглављу је предложен и механизам адсорпције арсена и метала у присуству анјона.

У поглављу ЗАКЉУЧАК јасно и сумарно су приказани добијени резултати и закључци који се односе на рад у целини.

У поглављу ЛИТЕРАТУРА дат је списак коришћене литературе која је актуелна и свеобухватна.

#### VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

A. Šučurović, J. Tričković, S. Maletić, M. Kragulj Isakovski, A. Kukovecz, M. Prica, B. Dalmacija (2017) Effects of anions on adsorption of trace levels of Cu(II), Pb(II) and Cr(VI) by amino functionalized multi-walled carbon nanotubes, *Revista de Chimie* 68 (2), 362-368. (M23, импакт фактор за 2015. годину је 0,956)

J. Tričković, M. Kragulj, S. Maletić, A. Šučurović, Á. Kukovecz, Z. Kónya, S. Rončević, B. Dalmacija (2014) Adsorption of divalent heavy metal ions from aqueous solution by amino-functionalized multi-walled carbon nanotubes, Book of abstracts from conference SIWAN6, 15-18 October, Szeged, Hungary, pp. 121-122. (M64)

#### VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Спроведена истраживања *карактеризације наноматеријала* су показала да је испитивани наноматеријал, MWCNT-NH<sub>2</sub>, имао специфичну површину 181,9 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> и средњи пречник пора 14,64 nm. Укупна запремина пора одређена БЈХ методом износила је 1,31 cm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup>, док микропоре нису детектоване примењеним т-тестом. Тачка нултог наелектрисања је износила 6,4. Све приказане вредности за испитивани материјал су у опсегу вредности карактеристичним за ову врсту материјала.

*Испитивање кинетике адсорпционог процеса* је показало да се кинетика адсорпционог процеса одвија у две фазе. После почетног брзог периода (који је трајао око 4 h) следио је спорији период успостављања адсорпционе равнотеже, која се у свим испитиваним случајевима и на свим испитиваним рН вредностима успоставила после 48 h.

Брзина адсорпције је у свим испитиваним случајевима (сви адсорбати и све рН вредности) најбоље била описана реакционим моделом псеудо-другог реда што је указало на успостављање хемијских интеракција између адсорбата и везивних места на површини адсорбента.

Примена Вебер-Морисовог дифузионог модела показала је да се адсорпција одвијала у два корака, дифузијом јона метала кроз раствор према спољашњој површини наноматеријала (екстерна/спољашња дифузија) и дифузијом адсорбата унутар пора и интерстицијалних канала адсорбента (унутарчестична дифузија). Резултати су указали на то да унутарчестична дифузија, иако спорији корак од екстерне дифузије, није једини ограничавајући корак у процесу адсорпције (на шта указује вредност одсечка  $C_i$  различита од нуле), већ су за то одговорне и интеракције испитиваних јона са везивним местима на површини адсорбента.

*Испитивање утицаја рН вредности на брзину адсорпционог процеса* показала је да рН вредност, у испитиваном опсегу, има највећи утицај на ефикасност адсорпције  $\text{Cu(II)}$  и  $\text{Cr(VI)}$ , а најмањи на уклањање  $\text{Cd(II)}$ . Ефикасност адсорпције за арсен и већину метала, најбоља је била у киселој средини (и до 96%), али се на основу добијених резултата не може издвојити једна рН вредност која обезбеђује оптимално уклањање свих испитиваних метала и арсена. У оквиру исте рН вредности, најбољи степен уклањања постиже се за јоне  $\text{As(III)}$  и  $\text{Cr(VI)}$ , а најмањи за јоне  $\text{Cd(II)}$ , за већину испитиваних рН вредности.

*Испитивање адсорпције у равнотежним условима* довело је до следећих резултата и закључака:

1. Моделовање података за адсорпцију у равнотежним условима на испитиваним рН вредностима, показало је да се подједнако добро могу користити Ленгмиров и Фројндлихов адсорпциони модел.
2. Вредности Ленгмировог адсорпционог коефицијента  $K_L$  налазе се у опсегу од 0,05 до 17,0 L  $\text{mg}^{-1}$ , док се  $q_m$  вредности крећу у опсегу од 10,9 до 40,2  $\text{mg g}^{-1}$  за  $\text{As(III)}$ , од 3,61 до 84,7  $\text{mg g}^{-1}$  за  $\text{Cu(II)}$ , од 26,1 до 200  $\text{mg g}^{-1}$  за  $\text{Pb(II)}$ , од 8,41 до 42,1  $\text{mg g}^{-1}$  за  $\text{Cd(II)}$  и од 4,79 до 27,5  $\text{mg g}^{-1}$  за  $\text{Cr(VI)}$  у зависности од рН вредности раствора.  $K_F$  вредности Фројндлиховог модела за све испитиване метале на различитим рН вредностима крећу се у опсегу од 2,02 до 32,9  $(\text{mgg}^{-1})/(\text{mgL}^{-1})^n$ . Највише  $K_F$  вредности (32,9  $(\text{mgg}^{-1})/(\text{mgL}^{-1})^{0,61}$ ) добијене су за  $\text{Pb(II)}$  на рН 11 и за  $\text{As(III)}$  на рН 3 (19,9  $(\text{mgg}^{-1})/(\text{mgL}^{-1})^{0,73}$ ).
3.  $K_d$  вредности не показују јасан тренд са порастом рН вредности за већину метала, осим у случају  $\text{Cd(II)}$  где  $K_d$  вредности бележе тренд раста (од рН 3 до рН 11) на свим равнотежним концентрацијама  $C_e$ .

И хемија метала и хемија површине адсорбента веома су условљени рН вредношћу воденог раствора, а добијени резултати су указали на сложен механизам адсорпције:

1. У случају  $\text{As(III)}$   $q_m$  вредност опада са порастом рН вредности раствора у низу  $\text{pH } 3 > \text{pH } 4,5 \approx \text{pH } 6 > \text{pH } 11$ . Потенцијални механизам уклањања јона  $\text{As(III)}$  на нижим рН вредностима (рН 3-6) је процес комплексирања са присутним амино групама на површини  $\text{MWCNT-NH}_2$  и грађење монодентатних комплекса, као и остваривање дисперзионих интеракција између неполарног молекула  $[\text{H}_3\text{AsO}_3]^0$  и  $\pi$ -електрона графенског слоја. На рН 11 адсорпција  $\text{As(III)}$  је најмања, услед постојања одбојних електростатичких интеракција између негативно наелектрисане површине адсорбента и  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$  јона, као и услед конкуренције између  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$  и  $\text{OH}^-$  јона за везивање за иста адсорпциона места.
2. Капацитет адсорпције за  $\text{Cr(VI)}$  расте следећим редом  $\text{pH } 11 < \text{pH } 6 < \text{pH } 3 < \text{pH } 4,5$ . Добијени резултати су у складу са очекивањима хемије површине и хемије самог метала. Највиша  $q_m$  вредност на рН 4,5 објашњава се присуством доминантне врсте  $\text{HCrO}_4^-$  јона

на поменутој рН, као и постојањем електропозитивне површине MWCNT-NH<sub>2</sub> услед протоновања -NH<sub>2</sub> групе у киселој средини, па долази до повољног електростатичког привлачења између окси-анијона HCrO<sub>4</sub><sup>-</sup> и NH<sub>3</sub><sup>+</sup> групе. MWCNT-NH<sub>2</sub> показују врло сличан капацитет адсорпције на рН 6 и рН 11. На рН 6 доминантна врста су Cr(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup> јони, и с обзиром да је на датој рН вредности површина MWCNT-NH<sub>2</sub> позитивно наелектрисана, очекивано је да између адсорбента и адсорбата постоје одбојне електростатичке интеракције, које везивање Cr(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup>, од стране адсорбента, чине мање ефикасним. Даљи пораст рН вредности и прекорачење вредности рН<sub>тнн</sub>, праћени су променом природе наелектрисања површине адсорбента, као и доминантног облика метала. Успостављање електронегативне природе површине MWCNT-NH<sub>2</sub>, као и присуство доминантних CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup> јона такође неповољно утичу на везивање CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup> од стране адсорбента, и чине га мање ефикасним из истог разлога као и у случају Cr(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup>.

3. Двовалентни метали се нису понашали у складу са очекивањем када се у обзир узму особине површине и хемија самих метала на различитим рН вредностима. Степен уклањања метала био је већи у киселој средини упркос чињеници да су у киселој средини двовалентни метали углавном присутни у облику јона M<sup>2+</sup>, а истовремено на рН вредностима нижим од рН<sub>тнн</sub> површина MWCNT-NH<sub>2</sub> је позитивно наелектрисана, па се очекује да одбојне електростатичке интеракције буду присутне и одговорне за нижу ефикасност везивања M<sup>2+</sup> јона за површину адсорбента. Такође, конкуренција двовалентних јона метала M<sup>2+</sup> и H<sup>+</sup> јона за везивање за иста адсорпциона места требало би да допринесе нижем степену уклањања металних јона у киселој средини. Претпостављено је да се сорпција двовалентних метала на ВСУНЦ остварује захваљујући π-електронима из графенског слоја. Наиме, делокализовани π-електронски систем на површини УНЦ понаша се као Луисова база у воденим растворима и може да гради електрон донор-акцептор комплексе са јонима тешких метала који се понашају као Луисове киселине што може допринети ефикасном уклањању метала.

*Испитивање утицаја присуства анијона на уклањање арсена и метала* показало је следеће: 1) присуство хлорида повећало је афинитет површине MWCNT-NH<sub>2</sub> ка јонима арсена и свих метала у области ниских концентрација, 2) постоји претежно негативан ефекат већине анијона у области виших концентрација на уклањање As(III) из водених раствора, при чему су адсорпциони капацитети у присуству анијона били од 2 до 10 пута мањи у односу на дејонизовану воду, 3) присуство хлорида, нитрата, сулфата и фосфата позитивно су утицали на афинитет површине MWCNT-NH<sub>2</sub> ка Cu(II) у области виших концентрација (од 2 до 8 пута већи у односу на дејонизовану воду). Најмањи утицај анијона на афинитет површине ка везивању метала примећен је код хрома. Механизам уклањања метала у присуству анијона је доста компликован и разликује се у зависности од врсте метала и присутног анијона, али најчешће се процес уклањања остварује формирањем различитих врста унутрашње и спољашње сферних комплекса.

*Поређење капацитета MWCNT-NH<sub>2</sub> са капацитетом УНЦ, НМО (нанометалних оксида), АУ (активног угља) и "low-cost" адсорбента* за уклањање арсена и јона метала, показало је да MWCNT-NH<sub>2</sub> имају бољи адсорпциони капацитет у односу на: кречњак, глину, танин, „изворне“ УНЦ и TiO<sub>2</sub> за Cd(II); кречњак, хематит, морске алге и пиљевину, TiO<sub>2</sub> и „изворне“ УНЦ за Cu(II); кречњак, зеолите, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>2</sub> и танин за Pb(II); кречњак, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, танин, зеолите, глину, АУ за Cr(VI). MWCNT-NH<sub>2</sub> се одликују значајно већим капацитетом адсорпције у односу на многе “low-cost” адсорбенте (мусковит, црвени муљ, биомаса, кости рибе, модификоване зеолите, калцијум алгинат, итд.) употребљених за уклањање арсена.

На основу свега изложеног закључено је да се испитивани адсорбент, MWCNT-NH<sub>2</sub>, може користити за уклањање тешких метала из воде на различитим рН вредностима (рН 3-6) и у присуству анијона. На рН 11, и други процеси, осим адсорпције, у случају Cu(II) и Cd(II), имају ефекат на уклањање из воденог раствора. Истраживање је показало да испитивани адсорбент може конкурисати комерцијалним адсорбентима када се пореде капацитети адсорпције при испитиваним условима у овом раду са доступним подацима из литературе.

## VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Кандидат је имао изузетно добар приступ анализи литературних података и планирању и извођењу експеримента, као и анализи експерименталних података. Анализа и тумачење резултата истраживања је оригинално, студиозно и јасно, што је резултирало и јасним закључцима. Начин приказа и тумачење резултата оцењује се позитивном оценом.

## IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме  
Дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме за израду докторске дисертације.
2. Да ли дисертација садржи све битне елементе  
Дисертација садржи све битне елементе.
3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

Дисертација је оригиналан допринос науци у области испитивања адсорпционог понашања јона тешких метала и арсена у области њихових релативно ниских концентрација ( $0,01-3 \text{ mg L}^{-1}$ ) у воденим растворима на аминофункционализованим угљеничним наноцевима. Угљенични наноматеријали су се показали као ефикасни адсорбенти за уклањање органских једињења, али могућност њихове примене за уклањање тешких метала и арсена из водених раствора није довољно истражена. Додатно, ограничен број студија који се бавио адсорпцијом метала на угљеничним наноцевима, испитивао је уклањање метала у области релативно високих концентрација изнад  $100 \text{ mg/L}$ . С обзиром да се стандарди квалитета воде за пиће и граничне вредности емисије за отпадне воде налазе у опсегу од  $0,003-2 \text{ mg L}^{-1}$ , истраживања у овом раду су била усмерена на област ниских концентрација. Поред испитивања примењивости и ефикасности аминофункционализованих вишеслојних угљеничних наноцеви за уклањање метала и арсена из водених раствора, у дисертацији је предложен механизам адсорпције при различитим условима и саставима воденог раствора што би требало да допринесе бољем разумевању процеса адсорпције метала на угљеничним наноматеријалима.

Додатно, резултати добијени у овој докторској дисертацији могу допринети бољем разумевању утицаја присуства угљеничних наноматеријала у акватичним системима на понашање и судбину арсена и одабраних метала у околини. Узимајући у обзир да је глобална производња угљеничних наноцеви процењена на 350 тона годишње, и да недостаје регулатива за контролисање испуштања ових материјала у животну средину, како код нас тако и у свету, за очекивати је да се они нађу у акватичним системима као последица ненамерног испуштања током било које фазе њиховог животног циклуса. С друге стране, адсорпција је један од битних механизма који контролише понашање и мобилност метала у акватичној средини. Према томе, разумевање процеса адсорпције метала на угљеничним наноматеријалима је од великог значаја за разумевање понашања метала у акватичној средини у присуству угљеничних наноматеријала.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања <b>Не постоје недостаци дисертације.</b>
<b>X ПРЕДЛОГ:</b>
На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:
- да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана
<b>На основу укупне оцене дисертације, Комисија предлаже да се завршена и предата докторска дисертација „Кинетика и механизам уклањања одабраних метала из воде адсорпцијом на аминокфункционализованом угљеничном наноматеријалу” прихвати, а кандидату АЛЕКСАНДРИ ШУЋУРОВИЋ одобри одбрана.</b>
- да се докторска дисертација враћа кандидату на дораду (да се допуни односно измени) или
- да се докторска дисертација одбија

НАВЕСТИ ИМЕ И ЗВАЊЕ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ  
ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај.

---

др Божо Далмација, редовни професор,  
председник комисије

---

др Јелена Тричковић, ванредни  
професор, ментор

---

др Јасмина Агбаба, редовни професор,  
члан

---

др Марина Шћибан, редовни професор,  
члан