

Оригинални научни рад

УДК 528.23:520/524
Original scientific article**Милутин Тадић****КАРТОГРАФСКЕ ПРОЈЕКЦИЈЕ У АСТРОНОМИЈИ**

Извод: У раду се излажу специфичности избора картографских пројекција за карте које се користе у астрономији – карте небеских тела и карте звезданог неба. Наведено је да су картографске пројекције настале у окриљу астрономије, истакнуте су разлике између географских и астрономских карата, анализирани су картографске пројекције које се данас најчешће користе у астрономији и препоручене су пројекције које би се могле користити.

Кључне речи: математичка картографија, астрономија, картографска пројекција, карта звезданог неба

Abstract: The article explains specifics of choice of map projections for charts used in astronomy – charts of celestial bodies and star charts. It says that map projections have appeared in the scope of astronomy, explains the differences between geographical and astronomical charts, analyses the map projections which are most commonly used in today's astronomy, and suggests projections which can be used.

Key words: mathematical cartography, astronomy, map projection, star chart

Картографске пројекције су настале у окриљу астрономије

Картографија је наука о историји, начинима приказа, израде и употребе карата (и осталих графичких приказа) површине Земље или њеног дела, као и разних објеката и појава у вези с њом. Ово је једна од дефиниција картографије, којој, да би била потпуна, иза речи „Земље“ треба убацивати „и осталих небеских тела или небеске сфере“, с обзиром на то да картографи „опслужују“ и астрономију.

Заправо, математичка картографија, темељ картографије, појавила се, не у оквиру географије, него управо у оквиру астрономије. То је разумљиво, јер је идеја о небеској сфери много старија од идеје о Земљиној лопти.

Прва конструисана картографска мрежа је мрежа хоризонталног сунчаног часовника (Тадић, 2002). Гномонске пројекције (централне пројекције) небеских паралела у часовној мрежи сунчаног часовника представљају конусне пресеке који су били познати старогрчким математичарима у трећем веку пре нове ере – Менехму, Еуклиду, Архимеду и Апологију Пергејском (њима треба дати првенство када је у питању гномонска пројекција, а не Талесу, како се то често погрешно чини).

Часовне мреже сунчаних часовника конструисане су посредством ортографске пројекције небеске сфере коју су стари Грци називали аналема – „оно што је узето одозго“ (с неба). Творци аналеме би могли бити Аполоније Пергејски или Хипарх, а детаљи су познати захваљујући Витрувију и Птоlemeју. Употреба аналеме је касније механизована у виду планисфере коју је описао Птоlemeј.

Механизована је и употреба стереографске пројекције и то справом која се зове астролаб (астролабијум), којим су мерени вертикални и хоризонтални углови и одређивани дневни и ноћни часови. Изум астролаба, а самим тим и стереографске пројекције, се приписује Хипарху, мада је та пројекција, по свој прилици, била позната и Аполонију Пергејском.

Кад су у питању картографске пројекције у Старом веку, три су кључна имена – Аполоније Пергејски, Хипарх и Птоlemeј, од којих су Хипарх и Птоlemeј и највећи астрономи тога доба. Хипарх је највероватније и творац конусне пројекције (просте конусне пројекције) коју је три века касније Птоlemeј разрадио и применио у географији (па је названа I Птоlemeјева пројекција). Птоlemeј је модификовао просту конусну пројекцију и добио нову – псеудоконусну пројекцију (која се данас погрешно назива Бонова, а њене екстремне варијанте – Вернерова и Сансонова). Из описа конструкције картографске мреже у „Географији“ (I. XXIV) произилази да је Птоlemeј познавао и азимутну еквилистантну картографску пројекцију која се данас назива Постеловом (Тадић, 2006).

Списку твораца картографских пројекција у Старом веку треба додати Ератостена и Марина Тирског. Ератостен је своју карту екумене исцртао у мрежи правоугаоне цилиндричне пројекције, док се за Марина Тирског тврди да је то исто урадио у мрежи квадратне цилиндричне пројекције. Није познато да су те пројекције користили у астрономији, али то није искључено с обзиром на то да су се бавили математичком географијом, тј. да су у довољној мери познавали географију и астрономију свога времена.

Дакле, астрономи Старог века су познавали перспективне азимутне пројекције – гномонску (централну), ортографску и стереографску (које су тако назване много касније), неперспективну азимутну пројекцију која се данас назива Постелова, просту конусну и псеудоконусну пројекцију (I и II Птоlemeјева пројекција), те цилиндричне пројекције – квадратну и правоугаону. Већином су их користили за графичко решавање различитих задатака из области сферне астрономије, и није познато да су картографске пројекције користили за израду карата звезданог неба. А за то су имали све предуслове – успоставили су сферне координатне системе на небеској сфери, одредили положаје великог броја звезда и разрадили одговарајуће картографске пројекције.

Картографске пројекције у астрономији данас

У наше време, картографске пројекције се користе у астрономији за израду карата небеских тела (Сунца, планета, Месеца и осталих сателита) и карата звезданог неба.

1. Анализа пројекције за карте небеских тела. После карата Земље (Земљине површине) прво су се почеле израђивати карте Месеца – карте видљиве полулопте у пресателитској ери и карте површине целог Месеца – у сателитској ери. Касније су се почеле израђивати карте површине Сунца и планета Земљине групе.

Небеска тела се налазе на великим удаљеностима од Земље и са Земље се виде у спољној пројекцији. Због великих удаљености пројекциони зраци заклапају врло мале углове, тако да се карте небеских тела по правилу раде не у спољној, него у ортографској пројекцији (код које су пројекциони зраци међусобно паралелни). Најчешће су то карте хемисфера урађене у екваторијалној ортографској пројекцији у чијој се картографској мрежи паралеле приказују као међусобно паралелне дужи (тетиве основне кружнице), а меридијани као елипсе, с тим да су екватор и средњи меридијан пројекције приказани као међусобно нормални пречници основне кружнице (као велике кружнице које пролазе кроз центар пројекције).

У случајевима када је потребно детаљније приказати дорађени део површине неког од небеских тела, поступа се исто као и код географских карата. Области око екватора се приказују у некој од нормалних додирних цилиндричних пројекција (нпр. квадратној или Меркаторовој), а поларни предели у некој од азимутних пројекција (ортографској или Постеловој).

2. Анализа пројекције за карте звезданог неба. Настанак карте звезданог неба може се, крајње поједностављено, објаснити на следећи начин: 1) небеска тела која се налазе на различитим удаљеностима од Земље (од ока посматрача као центра) централно су пројектована на замисљену небеску сферу; 2) небеска сфера је смањена на величину звезданог глобуса чији се размер узима за јединицу; 3) површина звезданог глобуса се пројектује у раван, у изабраној картографској пројекцији.

Иако карта звезданог неба има исто опште одређење као и географска карта – умањен, уопштен, условно деформисан картографски приказ – између те две врсте карата постоји низ битних разлика (табела 1).

С обзиром на то да се на небеској сфери оперише само са угаоним растојањима између небеских објеката, при избору картографске пројекције би се, на први поглед, требало усредсредити на конформне пројекције. И ту се круг пројекција јако сужава – од перспективних пројекција остаје само стереографска, од цилиндричних – Меркаторова, и низ конусних пројекција (Витковског III, Каврајског III, Ламбертова и др.) Али, и у тој редукованој групи, нема „праве“ пројекције. Прво, ни код једне од њих

Картографске пројекције у астрономији

Табела 1. – Разлике између карте звезданог неба и географске карте

Географска карта	Карта звезданог неба
Приказана је површина Земље (или њен део) – са свим објектима и појавама повезаних с њом. Земљина лопта је коначне величине ($R = 6\,371\text{ km}$) и растојања на њеној површини се изражавају у јединицама дужине.	Приказана је небеска сфера (или њен део) – са свим објектима и појавама повезаним с њом. Небеска сфера је огромне, а неодређене величине – радијус јој је већи од растојања до најудаљенијег небеског објекта.
Конструира се у конкретном (главном) линијском размеру, тј. Земљина лопта се смањи изабрани број (M) пута на величину глобуса, а онда се изврши прелаз у раван.	О линијском размеру се може се говорити само у релативном смислу – небеска сфера се смањује неодређен број пута на небески глобус чији се радијус узима за јединицу.
Приказани су географски објекти и њихов стварни распоред на површини Земље. Удаљености између објеката се изражавају у јединицама за дужину.	Приказани су небески објекти и њихов привидни распоред на небеској сфери. Удаљености између објеката се изражавају у угаоној мери.
Најважније је сачувати односе површина приказаних географских објеката.	Најважније је сачувати углове и ликове звезданих конфигурација.
Посматрач се налази на површини Земљине лопте – она му је „под ногама“. Зато се површина Земљине лопте картографски приказује једино гледано споља.	Посматрач се налази у центру небеске сфере – она му је „над главом“. На звезданом глобусу он је може видети и споља. Зато картографски приказ небеске сфере може бити двојак – гледано изнутра и гледано споља (у огледалу).
Све оно што се налази унутар рама карте представља географски садржај карте. Елементи садржаја могу бити природни објекти и они које је човек изградио.	Све оно што се налази унутар рама карте представља астрономски садржај карте. Елементи садржаја су природни објекти (небеска тела).
Земљина површина је неравна (рељеф).	Небеска сфера је „глатка“.
Приказане су тачке које се налазе на различитим надморским висинама што се да очигледно приказати посебним методама приказивање рељефа (изохипсама и бојеном хипсометријом).	Приказани су небески објекти који се налазе на различитим дубинама ванземаљског простора, што се не да очигледно приказати на звезданој карти.

није сачувана верност ликова у буквалном смислу те речи, јер када се каже „конформна“, то значи да се ради о пројекцији код које је сачувана сличност бесконачно малих ликова (док је сваки коначни лик искривљен у различитој мери, зависно о његовог положаја, величине и оријентације). У стереографској пројекцији деформације расту с удаљавањем од центра пројекције, код Меркаторове с удаљавањем од екватора, а код конусних с удаљавањем од стандардних паралела. Осим тога, у стереографској и Меркаторовој пројекцији се не може приказати цела небеска сфера, а у конусним може, с тим да су ликови у поларним областима искривљени до непрепознатљивости.

Због тога се одговарајуће пројекције за карте звезданог неба чешће бирају не из групе конформних, него из групе еквилистантних пројекција – пројекција код којих је главни размер (јединични размер) сачуван дуж једног од главних праваца деформација, док није сачувана ни верност бесконачно малих ликова нити односи површина. Такве пројекције се приближно налазе на средини између конформних и еквивалентних пројекција.

Прелиставајући астрономске атласе (табела 2) уочава се да је избор сведен на три-четири пројекције: Постелова пројекција (азимутна еквилистантна), проста конусна пројекција (конусна еквилистантна са две стандардне паралеле) и квадратна цилиндрична пројекција (цилиндрична еквилистантна пројекција). Све су то еквилистантне пројекције и све су еквилистантне правцем меридијана (и у том смислу може се говорити о условној једнакости њихових размера).

Поменуто картографске пројекције (тј. одговарајуће карте) се на допуњавају – Постелова поларна пројекција се примењује за израду карата северне и јужне небеске хемисфере (карта звезданог неба у хемисферама) или поларних калота, проста конусна секућа пројекција – за делове звезданог неба између екватора и полова, и квадратна цилиндрична пројекција – за екваторски појас. Осим поларне, примењује се и попречна Постелова пројекција за приказивање „кришки“ небеске сфере – сферних двоуглова ограничених деклинационим кружницама и одсеченим по приполарним небеским паралелама (нпр. у Norton's 2000.0 – *Stars Atlas and Reference Handbook*, eighteenth Edition, Longman, 1989.).

У неким случајевима на допуњавање се врши механички, тако што се у квадратној цилиндричној пројекцији прикаже појас небеске сфере до одређених приполарних деклинационих кружница, док се преостали делови (поларне калоте) прикажу у Постеловој поларној пројекцији. На тај начин приказ целог звезданог неба има облик омотача затвореног цилиндра развијеног у раван и само се условно може назвати картом (под картом се подразумева целовит приказ).

При избору картографске пројекције, осим свега осталог, у обзир се узима и једноставност конструкције картографске мреже, односно –

Картографске пројекције у астрономији

Табела 2. – Картографске пројекције за карте звезданог неба у неким астрономским публикацијама

Атлас	Пројекције
Antonin Bečvar (1962): <i>Atlas Coeli</i> 1950.0, Nakladelstvi československe akademie ved, Praha.	Постелова поларна Квадратна цилиндрична Птоlemeјева конусна (секућа)
Patrick Moore (1970): <i>The Rand McNally New Concise Atlas of the Universe</i> , Rand McNally and Company, Nenj York	Постелова пројекција (поларна) Меркаторова пројекција
Wil Tirion (1981): <i>Sky Atlas 200.0</i> , Sky Publishing Corporation.	Птоlemeјева конусна (секућа) Квадратна
Oldrich Hlad, František Hovorka, Pavla Polechova, Jitka Weiseloва (1988): <i>Hvezdna obloha 2000.0</i> , Geodeticky a kartograficky podnik v Praze, Praha.	Постелова поларна Квадратна цилиндрична Птоlemeјева конусна (секућа)
Norton's 2000.0 – <i>Stars Atlas and Reference Handbook</i> , Eighteenth Edition, edited by Ian Ridpath, Longman, 1989.	Постелова пројекција, поларна и попречна (у предговору Атласа погрешно се назива „Ламбертовом еквилистантном“) Постелова попречна пројекција Коса цилиндрична (за Млечни пут)
Patrick Moore: <i>Star Chart of the Southern Skies</i> , New Zeland Geographic Publications	Ајтовљева пројекција
<i>Sky & Telescope</i> (рубрика <i>Guide to the Evening sky</i> , карта <i>Northern Hemisphere Sky</i>)	Стереографска коса пројекција
Звездана карта северног неба, Астрономско друштво „Руђер Бошковић“, Београд, 1968.	Стреографска поларна пројекција
Карта северног неба, Астрономско друштво „Руђер Бошковић“, Београд, 1971.	Постелова поларна пројекција

једноставност саме картографске мреже. На пример, познати астроном Патрик Мур је аутор карте звезданог неба (*Star Chart of the Southern Skies*) која је заснована на Ајтовљевој пројекцији (једној од модификација азимутних пројекција). На врху овалног рама карте се налази зенит, а сагласно томе на дну је надир. Карта приказује небо како га види посматрач који се налази на 35°S, лицем окренут југу. Небеска сфера је „расечена“ од надира до зенита, тако да пресек пролази кроз северну тачку (односно тачно иза посматрача), па се северна тачка налази на оба краја хоризонта. Приказ обухвата цело звездано небо и лепо изгледа, али се на њој, због сложености картографске мреже, тешко може снаћи картографски недовољно образо-

ван корисник. За разлику од те пројекције, у астрономским атласима најфреквентније пројекције имају сасвим једноставне мреже које се лако конструишу. Код Постелове поларне пројекције паралеле се приказују као концентричне кружнице, а деклинационе кружнице као прамен правих линија које заклапају исте углове као и на небеској сфери. У простој конусној пројекцији паралеле су такође лукови концентричних кружница, а меридијани прамен правих које се разилазе из центра тих кружница, заклапајући међусобно исте углове (чија величина зависи од положаја стандардних паралела). Код квадратне пројекције, меридијани и паралеле су међусобно нормалне упоредне линије. С обзиром на то да су еквилине пројекције, код пројектовања са истог звезданог глобуса једна те иста паралела се на карти налази на истом растојању од екватора (и у том смислу се може говорити о истом размеру и компатибилности тих пројекција).

3. Пројекције за обртну карту звезданог неба. Обртна карта звезданог неба има кружни облик. У центру карте је један од небеских полова. Карта је покривена кружном плочом фиксираном у полу, а кружни или овални исечак (зависно од картографске пројекције) представља хоризонт на одређеној географској ширини. Обе плоче је могуће довести у положај који одговара неком часу и дану године и тада се у кружном исечку може видети видљиви део звезданог неба.

На основној кружној плочи обртне карте намењеној средњим географским ширинама уцртана је карта дела звезданог неба већег од једне хемисфере. Од перспективних пројекција може се применити само стереографска, јер се у ортографској пројекцији може приказати само једна небеска хемисфера, а у гномонској ни толико. Од неперспективних азимутних пројекција у обзир долазе и Постелова и Ламбертова, али је Постелова у предности због једноставније картографске мреже. Зато се за обртну карту звезданог неба најчешће користе стереографска и Постелова пројекција. Предност стереографске пројекције је то што се „прозор“ хоризонта приказује као круг, а предност Постелове је једноставнија картографска мрежа, мање уочљиве и боље распоређене деформације.

Закључак и препоруке

При избору картографске пројекције осим величине деформација, величине приказиване површине, њеног облика и оријентација, намене карте, начина коришћења и њеног формата, садржаја карте и других допунских захтева (Ginzburg, Salmanova, 1957), у обзир се узима и једноставност конструкције картографске мреже, односно – једноставност саме картографске мреже.

Скоро без изузетка, по инерцији, све се карте небеских тела раде у ортографској попречној пројекцији. Избор те пројекције је оправдан: при-

каз одговара погледу на небеско тело са огромне удаљености (као што их гледамо и у стварности), картографска мрежа упућује да је приказано сферно тело и, што је битно, картографска мрежа је врло једноставна за конструкцију. Слабе стране су што је приказ у ортографској пројекцији ограничен само на једну полулопту и што су превелике деформације у ободном појасу карте (све веће што је већа удаљеност од центра пројекције). Остајући при тој пројекцији, корак даље би се могао учинити и израдом карата хемисфера небеских тела (Месеца и Марса, рецимо) у поларним пројекцијама.

Када су у питању небеска тела, избору треба приступити слично као и када су у питању географске карте. То значи, у први план треба ставити захтев да се сачувају односи површина. У том смислу боље решење је да се за израду карата небеских тела, уместо ортографске, примени Ламбертова азимутна пројекција (еквивалентна азимутна пројекција), којој и географи због еквивалентности и умерених деформација углова дају предност када бирају пројекцију за карте Земљиних полулопти. У тој пројекцији се може приказати површина целог небеског тела, али се због деформација треба ограничити на карту у две хемисфере. Картографска мрежа је сличнија географској мрежи него код ортографске пројекције, а сложенија конструкција у компјутерско доба не игра битну улогу при избору.

Карте звезданог неба се најчешће израђују не у конформним, него у еквилистантним пројекцијама – и то пројекцијама које су у нормалном облику еквилистантне правцем меридијана. То су Постелова поларна, проста конусна и квадратна пројекција (занимљиво је да су то све картографске пројекције које су биле познате у Старом веку). Те три пројекције се добро допуњавају – прва се користи за поларне области, друга за области на „средњим деклинацијама“, а трећа за екваторијалне области. Све три имају једноставне картографске мреже, и код свих се паралеле приказују као међусобно упоредне линије, као и у географској мрежи, што кориснику олакшава сналажење на карти.

Осим поменутих пројекција, за прегледне карте звезданог неба користи се и стереографска пројекција због тога што је конформна и због тога што се њоме може обухватити више од једне небеске хемисфере. Такође, за екваторски појас се, уместо квадратне, понекад користи и Меркаторова пројекција, такође због њене конформности. За обртну карту звезданог неба користе се Постелова и стереографска поларна пројекција, чешће Постелова, јер су код стереографске велике деформације површина (на екватору четвороструке).

Доста простора остаје за примену и других картографских пројекција. На пример, за карте звезданог неба у две хемисфере долази у обзир Ламбертова пројекција у сва три облика, јер има умерене и боље распоређене деформације од свих других азимутних пројекција. У тој пројекцији

се може израдити и карта целе небеске сфере, али је такву карту због необичног изгледа картографске мреже теже „читати“. Комбинацијама од „зарубљене“ карте у цилиндричној пројекцији и две карте поларних калота у азимутној пројекцији може се додати комбинација у којој је цилиндрична пројекција замењена Гринтеновом пројекцијом (која је изгубила свој значај у изради карата света). По карактеру деформација, Гринтенова пројекција је произвољна, али има мале деформације углова и стоји негде на средини између конформних и еквилистантних пројекција.

Гномонска пројекција се недовољно користи, а погодна је, по природи конструкције, за израду карата мањих делова звезданог неба, нпр. сазвезђа. Небеска тела се из различитих дубина космоса пројектују на небеску сферу и ако се пред њихове пројекционе зраке „подметне“ раван карте – добија се приказ у гномонској пројекцији. Када су у питању мали делови звезданог неба неће доћи до изражаја прекомерне деформације својствене тој пројекцији. Осим тога, једино се у гномонској пројекцији велике кружнице са небеске сфере приказују на карти као праве линије, што олакшава повезивање звезда у сазвезђима (често корисници карата звезданог неба греше, повезујући правим линијама звезде на картама урађеним у другим пројекцијама). То својство гномонске пројекције препоручује је и за израду карата већег дела звезданог неба (мањег од једне хемисфере, наравно) на коме би били показани помоћни звездани полигони (Велики зимски шестоугао, Велики летњи троугао, Велики пролећни троугао, Квадрат Пегаса) или учртани познати (и откривани нови) алињмани (Гадић, 2004, 2005).

За приказивање тропског појаса небеске сфере обично се користе квадратна цилиндрична или Меркаторова пројекција. То су углавном нормалне пројекције код којих омотач цилиндра додирује небески екватор. У картографским мрежама тих пројекција екватор се приказује као права линија, а еклиптика као синусоида. Често еклиптику (тј. појас зодијака) треба ставити у први план, а то се може урадити применом косе цилиндричне пројекције код које ће омотач цилиндра додиривати небеску сферу по еклиптици. У картографској мрежи карте урађеној на тај начин еклиптика је права линија, а сазвезђа зодијака су нанизана на њу у водоравном појасу. Коса цилиндрична пројекција је и најпогоднија за израду карте звезданог неба на којој ће у првом плану бити Млечни пут.

Наравно, претходне препоруке треба узети условно јер задатак избора картографских пројекција нема једно решење (идеално решење). Увек се као решење појави група пројекција које углавном делимично, ређе у потпуности, испуњавају захтеве које диктира одређена карта. А тај избор је променљив, јер, ма колико добро познавали картографске пројекције увек наиђемо на нову пројекцију, познату пројекцију под новим именом, нову модификацију постојеће, или нову комбинацију две познате пројекције.

Литература

- Гинзбург Г. А., Салманова Т. Д. (1957): Атлас для выбора картографических проекций. Геодезиздат, Москва.
- Соловев М. Д. (1946): Картографические проекции. Геодезиздат, Москва.
- Тадић М. (2002): Сунчани часовници. Завод за уџбенике и наставна средства, Београд.
- Тадић М. (2004): Математичка географија. Завод за уџбенике и наставна средства, Београд.
- Тадић М. (2003): Анализа алињмана Северњаче (Северног небеског пола). Зборник радова, св. LI, Географски факултет, Београд.
- Тадић М. (2004): Сферна геометрија Великог зимског шестоугла. Зборник радова, св. LII, Географски факултет, Београд.
- Тадић М. (2006): Птоlemeјевска географија (античка математичка географија). Завод за уџбенике и наставна средства, Београд.

Milutin Tadić

MAP PROJECTIONS IN ASTRONOMY

Summary

Map projections developed in the scope of astronomy. In the ancient times astronomers used them to graphically solve astronomical tasks. Today, mathematical cartography is developing map projections for making the astronomical charts – charts of celestial bodies and star charts. To choose the proper projection, we must think of specifics of astronomical charts, which are different from geographical charts. The charts of celestial bodies (Moon, Sun and terrestrial planets) are usually made in the orthographic projection. It would be better to use the azimuthal equal-area projection (Lambert's projection). Star charts in star atlases are most often made in azimuthal equidistant projection (Postel's projection), conical equidistant projection with two standard parallels and cylindrical equidistant projection. They are all equidistant in meridian direction, they all have simple cartographic grids and they harmonically supplement each other. Next projections can also be used here: azimuthal equal-area projections (Lambert's projections) (star chart in hemispheres), Grinten's projections (star chart without the polar sectors) combined with some of azimuthal polar projections (polar sectors), gnomonic projections (for smaller parts of the sky or constellations) and oblique cylindrical projections (zodiac, Milky Way).