

**М.В. Нырцов<sup>1</sup>****ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ КАРТОГРАФИИ В ГИС****АННОТАЦИЯ**

Большинство современных карт создаётся с использованием программного обеспечения ГИС. Описание проекции, в которой проектируется карта, содержится в библиотеке PROJ. Эту библиотеку используют все популярные среди картографов ГИС-пакеты. К сожалению, в библиотеке отсутствуют проекции советских карт, параметры которых отличаются от стандартно задаваемых. Привязка и трансформирование картографических материалов по множеству опорных точек приводит к неудовлетворительным результатам, поэтому для полноценной работы требуется включение проекций карт времён СССР в PROJ и присвоение им уникального идентификатора картографических проекций EPSG.

В качестве референц-поверхности большинства малых тел Солнечной системы Международный астрономический союз рекомендует использовать трёхосный эллипсоид. Лидерство в области разработки проекций трёхосного эллипсоида для карт небесных тел принадлежит отечественным учёным. Разработанные проекции реализованы в виде инструментария, написанного на языке программирования JavaScript. С помощью него их можно вычислить, задавая исходные данные для картографируемого небесного тела. При этом следует учитывать, что для трёхосного эллипсоида используются три разновидности широт – планетоцентрическая, геодезическая (планетографическая) и условно-геодезическая. Работая с данными о небесных телах, необходимо учитывать так же прямоугольную систему координат. Последнее время практикуется задание данных о фигуре небесного тела с помощью пространственной прямоугольной системы координат, чтобы отказаться от способов задания широт.

В ГИС-пакетах отсутствует возможность выбора референц-поверхности трёхосного эллипсоида, нет и соответствующих проекций трёхосного эллипсоида. Отсутствуют также даты для тел Солнечной системы, фигуры которых описываются трёхосным эллипсоидом. В дальнейшем требуется разработка теории проекций трёхосного эллипсоида и включение этих проекций в библиотеку PROJ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** картография, математическая картография, картографическая проекция, системы координат

**Maxim V. Nyrtsov<sup>2</sup>****THE PROBLEMS OF MATHEMATICAL CARTOGRAPHY IN GIS****ABSTRACT**

A significant number of maps is compiled using GIS. All GIS software commonly used by cartographers make use of cartographic projections which use the generic coordinate transformation software PROJ. Some existing and new projections are not included in PROJ, so today it is very important to integrate them into the software. One problem is that PROJ does not

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1, географический факультет, *e-mail*: [nyrtsovmaxim@geogr.msu.ru](mailto:nyrtsovmaxim@geogr.msu.ru)

<sup>2</sup> 119991, Russian Federation, Moscow, Leninskie Gory, GSP-1, Lomonosov Moscow State University, *e-mail*: [nyrtsovmaxim@geogr.msu.ru](mailto:nyrtsovmaxim@geogr.msu.ru)

include some projections used in Soviet maps because their parameters differed from standard projections. Georeferencing and transformation of scanned maps with a set of control points leads to unsatisfactory results. Therefore, for Russian cartographers it is necessary to include non-standard Soviet map projections in PROJ and to give them unique identifiers in EPSG. A second problem is that the International Astronomical Union recommends the use of triaxial ellipsoids as reference surfaces for small Solar System bodies. Leadership in the development of triaxial ellipsoid projections for celestial body maps belongs to Russian cartographers. The developed projections are implemented as an application written in JavaScript and can be calculated by setting the initial data for the celestial body. There are three types of latitudes on a triaxial ellipsoid: planetocentric, geodesic (planetographic), and quasi-geodesic. GIS software does not include the triaxial ellipsoid as a reference surface, so there is no opportunity to choose the type of latitude and to select a projection of a triaxial ellipsoid. There is also no datum for small Solar System bodies approximated by a triaxial ellipsoid. In the future it is necessary to develop a theory of triaxial ellipsoid projections and include these projections into the PROJ software.

**KEYWORDS:** cartography, mathematical cartography, map projection, coordinate systems

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня трудно представить создание и использование современной карты без ГИС. Практически все самые используемые картографами проекции имеют поддержку в соответствующем модуле ГИС. Всё чаще ставится вопрос о необходимости разработки новых картографических проекций. Под вопросом и существование таких разделов математической картографии, как теория и методы разработки новых картографических проекций [Bugaevsky, Snyder, 1995; Серапинас, 2005]. Но правомерно ли такое утверждение?

Если в начале космической эры данных о небесных телах Солнечной системы было не так уж много и все исследования были сосредоточены вокруг земных карт, то в современных условиях данные о небесных телах различной тематики и назначения поступают на Землю огромным потоком. Это порождает необходимость в их наглядной визуализации в виде карт и картографических изображений. И здесь возникает первостепенная задача по разработке математических основ и вычислению проекций этих карт. Именно в этой области сейчас находятся совместные проблемы математической и внеземной картографии. Они заключаются в разработке новых картографических проекций трёхосного эллипсоида, который рекомендует использовать Международный астрономический союз в качестве референц-поверхности большинства малых тел Солнечной системы [Archinal et al., 2011]. Эти проекции отсутствуют в ГИС-пакетах, поэтому приходится решать проблему по вычислению координат узловых точек картографической сетки и её построению с помощью стороннего инструментария.

На сегодняшний день накоплен большой архив карт времён СССР, которые были созданы в специально разработанных под определённые задачи проекциях. Карты находятся преимущественно на бумажных носителях, поэтому для полноценной работы с ними требуется сканирование и привязка в ГИС. Так как отечественные проекции, отличающиеся от набора стандартных проекций, в ГИС отсутствуют, то приходится использовать технологию привязки и трансформирования по множеству опорных точек, что приводит к неудовлетворительным результатам.

Это всего лишь две проблемы (внеземная и земная) по реализации картографических проекций в ГИС. Рассмотрим эти и другие проблемы подробнее.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Проекция трёхосного эллипсоида**

Для обоснованного использования и реализации проекций трёхосного эллипсоида в ГИС необходима единая теоретическая составляющая, так как разработанные проекции существуют в виде отдельных классов. Поэтому следует применить системный подход, направленный на формирование целостности восприятия проекций трёхосного эллипсоида как самостоятельной группы проекций, но в то же время они должны войти в теорию математической картографии как подсистема в общей классификации проекций. Реализация проекций в ГИС предполагает формализацию параметров и функциональных зависимостей, используемых в формулах проекций. Существующие проекции необходимо проанализировать и на основании установленных общих свойств и признаков, их достоинств и недостатков сформировать теорию проекций трёхосного эллипсоида. Для отображения данных и анализа соответствия разработанных проекций поставленным задачам необходимо использовать картографический метод исследований.

### **Системы координат**

Данные о небесных телах, фигуры которых Международный астрономический союз предлагает аппроксимировать эллипсоидом вращения и трёхосным эллипсоидом, находятся преимущественно в планетоцентрических широтах и долготах. Задавая в ГИС-пакете референц-поверхность эллипсоида вращения, картографу предлагается использовать геодезическую широту, которая не совпадает с планетоцентрической, поэтому необходим предварительный пересчёт из одной системы в другую. Игнорирование этого факта приводит к ошибке в положении, а значит, и ошибке отображения данных. На трёхосном эллипсоиде нормаль к референц-поверхности не лежит в плоскости меридианного сечения, поэтому используются три разновидности широт – планетоцентрическая, геодезическая (планетографическая) и условно-геодезическая. Работая с данными о небесных телах, необходимо особое внимание уделять как планетографической, так и прямоугольной системе координат. Последнее время практикуется задание данных о фигуре небесного тела с помощью пространственной прямоугольной системы координат, чтобы отказаться от способов задания широт.

### **Анализ и использование проекций советских карт в ГИС**

За период времён СССР в отечественной картографии было разработано значительное число картографических проекций, целью которых являлось наилучшее представление картографируемой территории. Это в равной степени относится и к картам мира, и к картам СССР. К таким проекциям можно отнести произвольную поликоническую проекцию ЦНИИГАиК (карта мира в Физико-географический атлас мира), косую перспективно-цилиндрическую проекцию Соловьёва (карты СССР для начальной школы), косую перспективно-цилиндрическую проекцию ЦНИИГАиК (на карте СССР в этой проекции отображаются не только материковая часть, но и почти весь полярный бассейн с малыми искажениями) и др. В связи с возросшим интересом к исследованиям Арктической зоны России косая перспективно-цилиндрическая проекция ЦНИИГАиК актуальна и сегодня.

Проекция, которые разрабатывались в СССР, собраны в Атлас для выбора картографических проекций [Гинзбург, Салманова, 1957; Дополнение к Атласу..., 1975]. Для внедрения и использования отечественных картографических проекций в ГИС необходим их предварительный анализ по способу получения и характеру распределения искажений. Так как привязка и трансформирование сканированных карт СССР с помощью аппроксимирующих зависимостей по множеству опорных точек в ГИС приводят к неудовлетворительным результатам, необходимо включение отечественных проекций в библиотеку PROJ и реестр идентификаторов картографических проекций EPSG.

## Внедрение картографических проекций в ГИС с помощью библиотеки PROJ

Для полноценной работы с вышеупомянутыми проекциями в ГИС они должны содержаться в библиотеке PROJ.4.

PROJ.4 – это библиотека для выполнения преобразований между картографическими проекциями, которую используют современные ГИС-пакеты. В 2018 году была реализована 5-я версия библиотеки и PROJ.4 стала называться PROJ<sup>1</sup>.

До того, как картографическая проекция попадёт в библиотеку PROJ, она должна пройти несколько этапов реализации. На первом этапе для проекции должен быть осуществлён пересчёт из географических координат в прямоугольные и обратно. На втором этапе пересчёт должен быть реализован на любом из компьютерных языков. На третьем этапе необходимо получить код проекции в реестре идентификаторов картографических проекций EPSG.

На сегодняшний день реестр идентификаторов картографических проекций EPSG является стандартом и любая картографическая проекция, которая претендует быть включённой в ГИС, должна получить соответствующий уникальный номер в реестре.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На текущий момент времени разработаны практически все классы проекций трёхосного эллипсоида:

- цилиндрическая и азимутальная проекции, сохраняющие длины вдоль меридианов;
- цилиндрическая и азимутальная проекции, сохраняющие угол между меридианом и параллелью, а также длины на экваторе;
- равноугольная проекция Якоби;
- равновеликие цилиндрическая и азимутальная проекции;
- конические проекции различные по типам искажениям [Nyrtsov et al., 2017].

Инструментарий по вычислению проекций трёхосного эллипсоида и построению узлов картографической сетки для дальнейшего погружения в ГИС написан на языке программирования JavaScript<sup>2</sup>. При этом пользователю предоставляется возможность выбрать полуоси (оси) референц-поверхности трёхосного эллипсоида и способ задания широт, а также частоту и ориентацию картографической сетки.

Что касается включения проекций советских карт, а также проекций внеземных объектов в PROJ, то требуются дальнейшие исследования.

## ВЫВОДЫ

Из обзора проблем математической картографии в ГИС становится понятно, что они носят как фундаментальный, так и прикладной характер. Для обоснованного использования проекций трёхосного эллипсоида требуется формирование теории, а с ней тесно связана и прикладная проблема создания карт небесных тел, фигуры которых отличны от шара. Если на хорошо изученные небесные тела существуют запрограммированные в ГИС датумы, то с картографированием малых тел Солнечной системы, фигуры которых аппроксимируются трёхосным эллипсоидом, всё не так очевидно. Эти и другие проблемы требуют дальнейшего решения путём международного сотрудничества.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург Г. А., Салманова Т. Д. Атлас для выбора картографических проекций. Труды ЦНИИГАиК. Вып. 110. М.: Геодезиздат, 1957. 239 с.
2. Дополнение к Атласу для выбора картографических проекций. Ред. В. М. Богинский. М.: ОНТИ ЦНИИГАиК, 1975. 108 с.

<sup>1</sup> <https://proj4.org/>

<sup>2</sup> [http://geocnt.geonet.ru/ru/3\\_axial](http://geocnt.geonet.ru/ru/3_axial)

3. *Серापинас Б.Б.* Математическая картография: Учебник для вузов. М.: Академия, 2005. 336 с.
4. *Archinal B.A., A'Hearn M.F., Bowell E., Conrad A., Consolmagno G.J., Courtin R., Fukushima T., Hestroffer D., Hilton J.L., Krasinsky G.A., Neumann G., Oberst J., Seidelmann P.K., Stooke P., Tholen D.J., Thomas P.C., Williams I.P.* Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2009. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, February 2011. V. 109. Iss. 2. P. 101–135.
5. *Bugaevsky L.M., Snyder J.* Map Projections: A Reference Manual. London, Bristol: Taylor&Francis, 1995. 352 p.
6. *Nyrtsov M.V., Fleis M.E., Borisov M.M., Stooke P.J.* Conic projections of the triaxial ellipsoid: The projections for regional mapping of celestial bodies. *Cartographica*, 2017. V. 52. № 4. P. 322–331.

#### REFERENCES

1. Addition to Album of map projections. Ed. by V.M. Boginsky. Moscow: ONTI CNIGAIK (Department of Scientific and Technical Information of Central Research Institute of Geodesy, Aerial Photography and Cartography), 1975. 108 p. (in Russian).
  2. *Archinal B. A., A'Hearn M. F., Bowell E., Conrad A., Consolmagno G.J., Courtin R., Fukushima T., Hestroffer D., Hilton J.L., Krasinsky G.A., Neumann G., Oberst J., Seidelmann P.K., Stooke P., Tholen D.J., Thomas P.C., Williams I.P.* Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2009. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, February 2011. V. 109. Iss. 2. P. 101–135.
  3. *Bugaevsky L.M., Snyder J.* Map Projections: A Reference Manual. London, Bristol: Taylor & Francis, 1995. 352 p.
  4. *Ginzburg G.A., Salmanova T.D.* Album of map projections. Works of CRIGAPC (Central Research Institute of Geodesy, Aerial Photography and Cartography). Iss. 110. Moscow: Geodezizdat, 1957. 239 p. (in Russian).
  5. *Nyrtsov M.V., Fleis M.E., Borisov M.M., Stooke P.J.* Conic projections of the triaxial ellipsoid: The projections for regional mapping of celestial bodies. *Cartographica*, 2017. V. 52. No 4. P. 322–331.
  6. *Serapinas B.B.* Mathematical cartography. Moscow: Academy, 2005. 336 p. (in Russian).
-