

## **АНАЛИЗ РЕГИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ СИБИРИ С ПОМОЩЬЮ ДИАГРАММ ВОРОНОГО**

**Ю.П. Воронов**

*ООО «Корпус»*

**А.Е. Лопаткина**

*ИЭОПП СО РАН*

### **Аннотация**

Показана возможность использования в экономических исследованиях математического аппарата диаграмм Вороного, до сих пор применяемого в естественных науках. Рассмотрены задачи сопоставления диаграмм Вороного и действующего административно-территориального деления на уровне субъекта Российской Федерации, деления полномочий филиалов крупной российской компании, исследования динамики демографического потенциала города.

**Ключевые слова:** диаграммы Вороного, региональный анализ, районирование, полномочия филиалов крупной компании, динамика демографического потенциала

### **Abstract**

The paper shows that the mathematical tools of Voronoi diagrams, previously used only in natural sciences, may be used in economic studies too. We analyze how such Voronoi diagrams may correspond with the political division of any RF subject, distribution of powers in branches of a large corporation, and dynamics of the demographic potential.

**Keywords:** Voronoi diagrams, regional analysis, zoning, powers of branches in a large corporation, demographic potential dynamics

В последнее время методы пространственного анализа получают все большее распространение и применяются для решения довольно

обширного круга задач. При этом экономические исследования могут представлять собой лишь частный случай проявления такого интереса. Построение и изучение диаграмм Вороного\* постепенно становится одним из центральных методических средств.

## ВВЕДЕНИЕ В АППАРАТ ДИАГРАММ ВОРОНОГО

Пусть на плоскости задано множество различных точек  $(x_i, y_i)_{i=1, 2, \dots, k}$ , являющихся центрами пятен. Тогда диаграмма Вороного определяется как деление плоскости на  $k$  ячеек (по числу точек), каждая ячейка содержит одну точку из исходного набора и для любой ячейки выполняется следующее свойство.

Ячейка, которая содержит точку  $(x_i, y_i)$ , содержит также все точки плоскости, которые ближе к  $(x_i, y_i)$ , чем к любой другой точке из исходного набора. Каждая ячейка диаграммы, содержащая  $(x_i, y_i)$ , называется многоугольником Вороного, соответствующим точке  $(x_i, y_i)$ , а ребра и вершины – ребрами и вершинами диаграммы Вороного. Триангуляция множества точек называется триангуляцией по Делоне, если внутри окружности, описанной вокруг каждого треугольника, не попадают точки этого множества. Два центра ячеек соединяются, если эти ячейки соседние по диаграмме Вороного. Если нет четырех точек, расположенных в одну линию, то можно построить сеть треугольников, двойственную диаграмме Вороного. Три центра ячеек образуют треугольник, если внутри этого треугольника не содержится ячейка.

Диаграммы применяются во многих областях знаний. Что касается практического значения сопоставления зон обслуживания по диаграммам Вороного и муниципальных границ, то оно состоит в следую-

---

\* Георгий Феодосьевич Вороной (1868–1908) – профессор Киевского университета, работы которого заложили основу современной вычислительной геометрии. Диаграмма Вороного, за рубежом иногда называемая разбиением Дирихле, представляет собой мощный инструмент анализа. Аппарат диаграмм Вороного используется во многих научных дисциплинах – от ядерной физики до археологии. С 2004 г. проводится ежегодный международный симпозиум по диаграммам Вороного и их применению в науке и технике. – *Прим. науч. ред.*

щем. С помощью диаграмм можно корректировать статистику обеспеченности населения школами, торговыми площадями, медицинскими учреждениями, а следовательно, и разрабатывать стратегию развития социальной сферы [1]. Диаграммы Вороного могут использоваться при проектировании населенных пунктов и микрорайонов, составлении генеральных планов поселений, а также схем территориального планирования. Совершенствование административного деления также является одной из важных сфер применения такого инструмента пространственной эконометрики, как диаграммы Вороного [2, 3].

В мировой практике диаграммы Вороного используются довольно широко, но экономических приложений немного. Известны работы по определению зон влияния предприятий розничной торговли (см., например, [4, 5]), исследования, посвященные зонам влияния предприятий по добыче местных минеральных ресурсов [6, 7]. Можно упомянуть также исследования по оптимальному глобальному зонированию деятельности филиалов транснациональной компании. В данной статье мы воспроизводим исследование этого класса на примере компании РУСАЛ. Нет сомнения, что круг экономических приложений диаграмм Вороного будет расширяться за счет новых сфер их применения.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ДИАГРАММ ВОРОНОГО В АДМИНИСТРАТИВНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОМ РАЙОНИРОВАНИИ**

Задача административно-территориального районирования рассматривалась подробно при подготовке проекта административно-территориального деления штата Нью-Йорк. Объективная причина такого пересмотра состояла в том, что в регионе выросли мегаполисы Нью-Йорк и Буффало [8, 9]. По сравнению с ними несколько десятков графств, располагая равными политическими правами, составляют меньшинство населения штата. По этой причине властями штата уже несколько лет обсуждаются направления реструктуризации его административной структуры. Авторы исследования, посвященного этому вопросу, полагают, что их модель, основанная на диаграммах

Вороного, позволила достичь цели, поставленной властями штата. Модель была представлена комитету по реформе административно-территориального деления конгресса штата Нью-Йорк как наиболее естественный способ формирования графств с примерно одинаковым населением и прозрачной системой границ. В качестве одного из достоинств подхода отмечается, что генерация новой системы графств может быть проведена всего лишь за 10 секунд. Это делает возможным использование ее в ходе дебатов, так как любое предложение может быть немедленно представлено на карте.

В современных условиях развития Сибири и Дальнего Востока, когда налицо существенные изменения в системе расселения, американский опыт может оказаться полезным. В определенном смысле мотивы изменения границ в штате Нью-Йорк и в восточных районах России совпадают. Но на этом пути встречается несколько сложностей. Ведущие отечественные специалисты признают, что само направление экономического районирования в отечественной науке после распада СССР переживает кризис [10]. В советское время экономическое районирование территории было подчинено общей идее оптимального размещения производительных сил на плановой основе, а сам процесс размещения новых предприятий был естественным элементом плановой системы. Когда плановая система ушла в небытие, критерии районирования стали неопределенными. П.М. Крылов и Т.Г. Рунова пишут, что «экономический район определяется как территориальная часть народного хозяйства, имеющая специализацию в масштабе страны, сложившуюся под влиянием территориального разделения труда, природных и социальных свойств территории» [11, с. 133]. Подобные определения имеют описательный характер и из них не вытекает никаких рекомендаций, кроме представления, которое можно охарактеризовать гегелевским высказыванием «все существующее целесообразно».

Вторую и, пожалуй, наиболее существенную причину сформулировали В.Н. Лексин и А.Н. Швецов: «...Приходится решать задачу изменения АТУ (административно-территориального управления) в состоянии страны с прямо противоположным вектором, в условиях устойчивого сокращения численности населения, массового исчезно-

вения с лица земли деревень, сокращения численности ПГТ, стагнации городов» [12, с. 18]. На это обстоятельство обратил внимание также И.В. Лексин, отметивший, что события последнего десятилетия «сформировали такую принципиально новую и непрерывно трансформирующуюся, неустойчивую и долговременно переходную систему территориальной организации всех сторон жизнедеятельности, которую нельзя исследовать на основе постулатов как советских, так и западных школ в рамках обществоведческих теорий конца XX столетия» [13, с. 67].

Процесс пересмотра принципов районирования идет в одной плоскости – в дискуссиях на страницах научных журналов. Решение же второй проблемы затрагивает по преимуществу местные власти. Что делать, если для наполнения школы нет учеников, а фельдшерско-акушерского пункта – пациентов. Нужно укрупнять, создавать новую структуру учебных и медицинских заведений. Каждый раз решение приходится принимать не на основании теоретических построений, а исходя из соображений здравого смысла.

Для научной общественности эта тема непривлекательна, в частности, и потому, что экономическая теория в основном ориентирована на экономический рост, а не на убыль населения и свертывание социальной сферы. Для федерального уровня власти данная тема политически невыгодна. Поэтому решаются указанные вопросы индивидуально в каждом регионе, и это даже получило политически нейтральное название «комплексирование».

На рисунке 1 представлена диаграмма Вороного для Новосибирской области. Каждая ячейка диаграммы соответствует административному району, при этом все районы считаются равными друг другу. Границы ячеек диаграммы показывают, как могли бы проходить границы между районами области, если бы их проводили в точности посередине расстояния между районными центрами. Сама по себе диаграмма не может служить основанием для пересмотра административно-территориального деления субъекта Федерации, но она пригодна для качественного обсуждения несовпадения ячеек диаграммы и территорий районов.



Рис. 1. Диаграмма Вороного для Новосибирской области

Как видно из диаграммы, зоны влияния у ряда районов примерно совпадают с административными границами этих районов. Тем не менее некоторые расхождения заставляют по-новому трактовать сложившиеся границы районов. Например, зона влияния (ячейка диаграммы Вороного) Северного района захватывает часть территории Кыштовского и Куйбышевского районов. В отношении границ с Куйбышевским районом это можно объяснить историческим развитием поселений северо-запада Куйбышевского района, и такое положение не противоречит общей структуре административно-территориального деления. Что же касается восточной части Кыштовского района, которая находится в зоне влияния райцентра Северное, то путь от областного центра до этих поселений представляется нерациональным. Приходится ехать через райцентр Кыштовка, что увеличивает расстояние до этих населенных пунктов.

Наибольшее расхождение между административным делением и диаграммой Вороного отмечается по Северному, Убинскому, Каргатскому и Чулымскому районам. Характерно, что это отклонение можно считать групповым, т.е. единым для территории четырех адми-

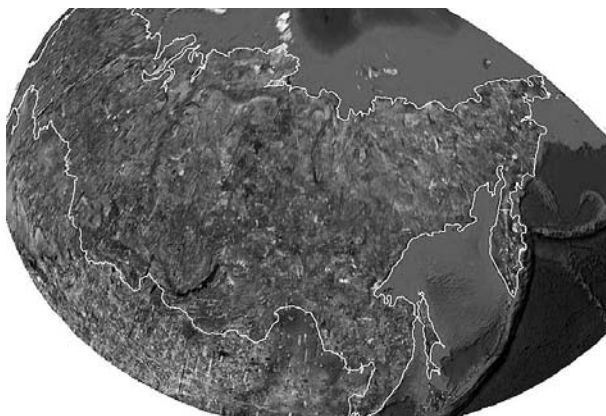
нистративных районов. И очевидны причины такого единого отклонения: в построении диаграммы Вороного не учитывалась ориентация рек, которые в зоне этих четырех районов направлены по течению на северо-восток. И здесь мы наталкиваемся на принципиальные отличия современных зарубежных тенденций в экономическом районировании от отечественных. В нашей стране река является естественной границей между регионами. Зарубежные же тенденции в районировании сводятся к тому, что граница между «естественными» регионами должна проходить по водоразделам, т.е. по границам речных бассейнов. В этом случае естественными становятся методы ведения сельского хозяйства, решение экологических проблем, рациональное водопользование и т.д.

В Новосибирской области данный принцип не выдерживается, и в частности Северный район представляет собой две линейно выстроенные последовательности сел, расположенных вдоль берегов рек Тара и Тартас. Фактически это две относительно независимые расселенческие структуры, каждая из которых имеет собственные перспективы развития.

Отсюда следует, что само по себе применение диаграмм Вороного дает лишь общую ориентировку относительно оптимальных границ административных единиц. При решении практических задач требуется учитывать множество дополнительных обстоятельств. Все они, в принципе, могут служить основанием для изменения правил триангуляции и, соответственно, для изменения диаграмм Вороного.

## **УЧЕТ СФЕРИЧНОСТИ ЗЕМНОГО ШАРА**

Для исследований более обширных территорий (начиная с территории Сибирского федерального округа и больших по площади) плоскостные диаграммы Вороного уже не подходят. Однако диаграммы могут быть построены не только на плоской, но и на сферической поверхности. Отображение пространственной информации на сфере не совсем типично для региональных исследований, но постепенно такое представление начинает использоваться в экспериментальном порядке.



*Рис. 2. Сибирь и Дальний Восток на глобусе*

На рисунке 2 приведено изображение части земного шара, на которой расположены восточные районы России. Видно, насколько искажено привычное для нас отображение этой территории на плоских (меркаторских) картах. Общее искажение состоит в том, что зрительно наиболее населенные южные районы Сибири и Дальнего Востока выглядят меньше, а северные – увеличены. Кроме того, расстояния на северных территориях выглядят длиннее, а на юге – короче.

Представляется, что постепенное введение в обиход трехмерных отображений территории послужит на пользу региональным исследованиям. По небольшому накопленному нами опыту плоские карты приемлемы для субъекта Федерации (за исключением, возможно, Якутии и Красноярского края), а также для компактной группы субъектов Федерации, каковой, например, является юг Западной Сибири. Если же охватываются более обширные территории (например, территории Сибирского и Дальневосточного федеральных округов), то неизбежны искажения, так называемая дисторсия.

В первой половине 2000-х годов в Евросоюзе была принята программа разработки методов анализа сложных поверхностей. В рамках этой программы впервые были проведены исследования по построению диаграмм Вороного по земному шару (по сфере), и первая задача была следующей: как территориально распределяются компетенции



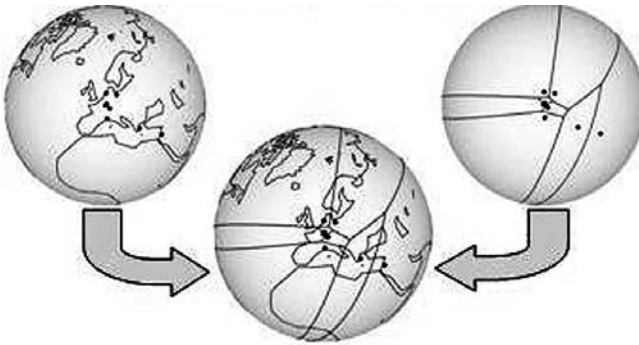


Рис. 3. Пример глобального распределения компетенций филиалов крупной европейской фирмы

филиалов и отделений транснациональной компании [14]. Отделения компании размещены в городах Афины, Берлин, Гронинген, Нанси, Саарбрюкен, София-Антиполис, Тель-Авив, Цюрих. Требуется определить, как может быть поделена территория всего мира между филиалами этой компании. Результат представлен на рис. 3.

Авторами данной статьи при постановке задачи было решено полностью повторить европейское исследование 2004 г. и построить диаграмму распределения компетенций для крупной российской фирмы, имеющей филиалы по всему миру. В качестве примера такого построения представлена диаграмма Вороного по территориальному распределению офисов компании РУСАЛ по земному шару. Компания РУСАЛ выбрана нами на том основании, что от динамики ее развития в существенной степени зависит и развитие нескольких структурообразующих отраслей экономики Сибири, прежде всего металлургии и электроэнергетики.

Наибольшее количество отделений компании функционирует в России. Вследствие их близкого друг к другу расположения зоны их влияния меньше, чем у тех отделений, которые удалены от российского скопления предприятий, входящих в группу. На Востоке России филиалы компании РУСАЛ расположены в Ачинске, Братске, Красноярске, Саяногорске, Новокузнецке, Иркутске, Шелехове, Тайшете (рис. 4).

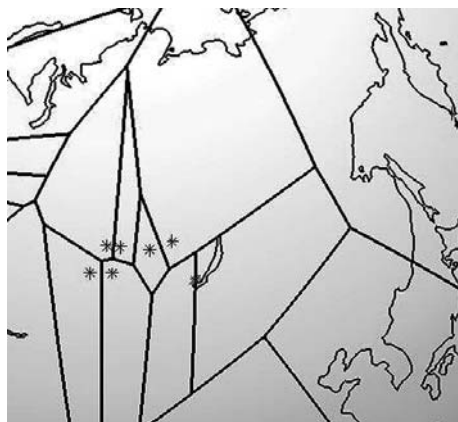


Рис. 4. Распределение глобальной территориальной компетенции филиалов компании РУСАЛ по Сибири и Дальнему Востоку

Проблемы взаимодействия местных органов власти и крупных корпораций сложны и не проработаны. Поэтому любая аргументация, которая возможна со стороны регионов, полезна в этих взаимоотношениях. Составление подобных диаграмм полезно для местных органов власти, поскольку опираясь на полученную информацию, они могут составить представление, в зоне действия каких филиалов или отделений крупнейших фирм находится подведомственная им территория. На этом основании возможно, например, предлагать создание нового филиала в связи с тем, что имеющиеся филиалы ориентируются на слишком большие территории. В частности, для Новосибирска было бы целесообразным размещение здесь филиала компании РУСАЛ в связи с тем, что в пригороде расположено крупнейшее предприятие по производству электродов для алюминиевой промышленности.

Имея в наличии набор диаграмм, можно лучше определиться с политикой взаимодействия региона и крупной компании. Очевидно, что эта область исследований находится в самом начале своего становления, тем не менее польза от таких исследований очевидна. Только в последнее время стали появляться работы (да и то переводные), в которых обсуждаются взаимоотношения крупных компаний

и регионов. Но возможно, что это направление охватит существенную часть экономико-математического макро моделирования. Во всяком случае, нельзя исключать и такой вариант развития экономической науки, когда модели «фирма – территория» существенно потеснят межотраслевые межрегиональные модели. И тогда существенным элементом таких моделей будет использование диаграмм Вороного для стартовой подготовки информации.

### **ДИНАМИКА ДЕМОГРАФИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

Диаграммы Вороного можно применять и на более высоком уровне – при анализе межрегиональных взаимодействий и взаимовлияний. Речь в данном случае идет о взаимовлиянии соседних административно-территориальных единиц. При этом зона влияния относительно небольших городов выглядит как круг с центром в данном городе, радиус которого прямо пропорционален численности населения этого города. Вся территория за пределами круга интерпретируется как зона влияния ближайшего крупного города. Поэтому основное влияние на данную территорию оказывают два города-миллионника – Новосибирск и Омск. Граница влияния Новосибирска и Омска на районные центры Новосибирской области с течением времени перемещается в восточном направлении. Это означает, что более быстрый рост Омска (относительно Новосибирска) изменяет зоны влияния в пользу Омска (рис. 5).

На рисунках 6 и 7 представлены диаграммы Вороного по численности населения городов Западной Сибири в 1956 и 2008 гг.

На диаграмме, отражающей численность населения (веса ячеек) крупнейших городов и агломераций Западной Сибири по состоянию на 1956 г. (см. рис. 6), отчетливо видны зоны их влияния на территорию шести субъектов Федерации. На рисунке 7 так же отчетливо видно, что спустя 52 года доминируют три центра городских агломераций, входящих в число 21 крупнейшей агломерации России: Новосибирской (седьмое место), Омской (11-е), Новокузнецкой (16-е).



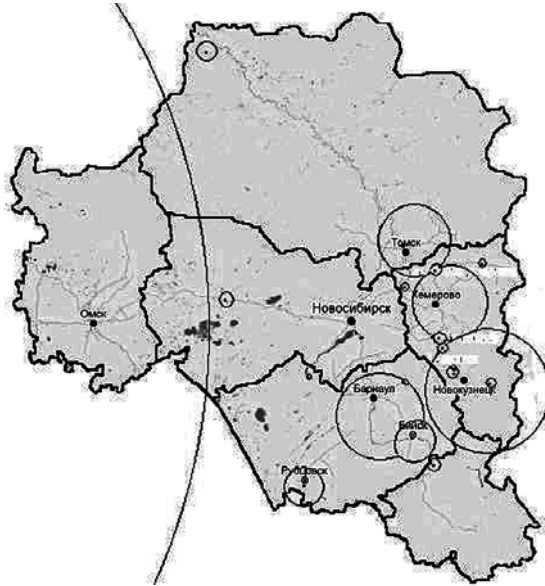


Рис. 7. Диаграмма Вороного по численности населения городов Западной Сибири, 2008 г.

Кемеровская область поделена на шесть зон. Максимальную часть территории области занимает Новокузнецкая агломерация (Прокопьевск, Киселевск, Новокузнецк). На втором месте – Кемеровская агломерация, между ними – Белово и Гурьевск. Север области занимают три ячейки: Юргинская, Анжеро-Судженская и Мариинская агломерации. Шесть ячеек Кемеровской области выходят за пределы административных границ области в сторону всех четырех субъектов РФ, которые с ней граничат.

Алтайский край разделен на пять зон, основу которых составляют Барнаульская и Рубцовская зоны, с которыми граничат Бийская и Заринская на востоке и Каменская и Славгородская на западе. Томская область состоит из двух зон: Томской и Стрежевской. Новосибирская область делится на три зоны: Новосибирскую, Куйбышевско-Барабинскую и Искитимскую.

Новокузнецкая полицентрическая агломерация возникла в ходе индустриализации благодаря большому количеству городов-спутников и стала одной из немногих миллионных агломераций, состоящих из нескольких городов, в каждом из которых существенно менее 1 млн жителей. В настоящее время она претерпевает значительную депопуляцию и имеет меньшие перспективы развития, чем Новосибирская и Омская агломерации. Зона ее влияния распространяется на половину Кемеровской области, восточную часть Алтайского края и Республику Алтай. Влияние Томска выходит за границу Томской области, охватывая часть территории Кемеровской области.

С помощью диаграмм Вороного можно отчетливо увидеть, как меняются зоны влияния разных городов при переходе от одного рассматриваемого периода к другому. Особую опасность для экономического развития юга Западной Сибири представляет негативная тенденция в демографическом потенциале южных районов Кемеровской области. Данная тенденция может быть переломлена, по нашему мнению, только посредством освоения крупного железорудного месторождения на этой территории.

\* \* \*

В статье показаны возможности извлечения новой информации, полезной для анализа динамики территориального развития, при использовании математического аппарата диаграмм Вороного. Очевидно, что при применении этого относительно нового класса математических методов появляется множество проблем. К их числу относятся обоснование приписываемых весов во взвешенных диаграммах Вороного, учет кривизны земного шара при использовании диаграмм для обширных территорий, учет влияния внешних факторов на методы построения диаграмм, использование других метрик помимо евклидовой и т.п. Но нет сомнения, что эти проблемы со временем будут разрешены, для чего подобные исследования должны стать распространенными.

## Литература

1. **Fortune S.J.** A sweepline algorithm for Voronoi diagrams // *Algorithmica*. – 1987. – No. 2. – P. 153–174.
2. **Фокс А., Пратт М.** Вычислительная геометрия: применение в проектировании и производстве. – М.: Мир, 1982. – 304 с.
3. **Okabe A., Suzuki A.** Locational optimization problems solved through Voronoi diagrams // *European Journal of Operational Research*. – 1997. – V. 98, No. 3. – P. 445–456.
4. **Boots B., South R.** Modeling retail trade areas using higher-order, multiplicatively weighted Voronoi diagrams // *Journal of Retailing*. – 1997. – V. 73, No. 3. – P. 519–536.
5. **Goncalves A.B., Mendes A.B.** Retail trade area delimitation using GIS and weighted Voronoi tessellations // *ESIG'2002. Encontro de Utilizadores de Informacao Geografical*. – 7th ed. – Lisbon: USIG, 2002. – P. 21–45.
6. **Richard F., Wen J., Martin E.** Efficiently mining regional outliers in spatial data // *SSTD: Conference's Materials*. – 2007. – P. 112–129.
7. **Frank R., Ester M., Knobbe A.** A multi-relational approach to spatial classification // *SIGKDD'09: Conference's Materials*. – Paris, 2009. – P. 1–9.
8. **Applying** Voronoi diagrams to the redistricting problem: Team 1034 report. – N.Y., 2007.
9. **Mehrotra A., Johnson E.L., Nemhauser G.L.** An optimization based heuristic for political districting // *Management Science*. – 1998. – V. 44, No. 8. – P. 1100–1114.
10. **Смирнягин Л.В.** Узловые вопросы районирования // *Известия РАН. Сер. географическая*. – 2005. – № 1. – С. 5–16.
11. **Крылов П.М., Рунова Т.Г.** Экономическая география и регионалистика. – М.: МГИУ, 2008. – 196 с.
12. **Лексин В.Н., Швецов А.Н.** Общероссийские реформы и территориальное развитие. Ст. 11: Региональная Россия начала XXI века: новая ситуация и новые подходы к ее исследованию и регулированию // *Российский экономический журнал*. – 2004. – № 4. – С. 3–23.
13. **Лексин И.В.** Системные основания преобразований территориального устройства государства и оценка аргументов «от экономики» // *Российский экономический журнал*. – 2003. – № 4. – С. 61–79.
14. **Fogel E., Setter O., Halperin D.** Arrangements of geodesic arcs on the sphere // *ACS Technical Report No. 361501-02*. – P. 1–9.

*Рукопись статьи поступила в редколлегию 02.03.2011 г.*

© Воронов Ю.П., Лопаткина А.Е., 2011