

# Оптимизированный алгоритм статистической проверки гипотез ретроспективных исследований на основе геохронологического трекинга

Р.Я. Ивакин<sup>1</sup>, Я.А. Ивакин<sup>2, 3</sup> , С.Н. Потапычев<sup>2, 3</sup> 

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

<sup>3</sup>АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР»

Санкт-Петербург, 198226, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: yan\_a\_ivakin@mail.ru

## Информация о статье

Поступила в редакцию 17.01.2020

Принята к публикации 02.03.2020

**Ссылка для цитирования:** Ивакин Р.Я., Ивакин Я.А., Потапычев С.Н. Оптимизированный алгоритм статистической проверки гипотез ретроспективных исследований на основе геохронологического трекинга // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 1. С. 86–93. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-86-93

**Аннотация:** Геохронологический трекинг как эффективная информационная технология работы с цифровыми картографическими наборами пространственных данных широко применяется в ретроспективных исследованиях закономерностей в перемещении тех или иных артефактов за установленный период времени. В статье представлены основные положения по алгоритмизации процедуры геохронологического трекинга при статистической проверке гипотез ретроспективных исследований. Произведена постановка задачи оптимизации алгоритма указанной процедуры для различных вариантов контролируемых параметров. Описаны результаты решения этой оптимизационной задачи как в общем виде, так и в ряде наиболее типовых вариантов. Полученные результаты решения оптимизационной задачи интерпретированы в терминах предметной области ретроспективных исследований. Показаны пути дальнейшего практического применения оптимизированного алгоритма в задачах современной логистики, интеллектуального анализа данных и формализованных знаний.

**Ключевые слова:** географические информационные системы, ГИС-технологии для ретроспективных исследований, геохронологический трек и трекинг, изоморфизм графов, рациональный алгоритм, оптимизация алгоритма, междисциплинарные исследования на базе ГИС, постановка задачи оптимизации.

## Введение

Ретроспективный анализ прикладных пространственно распределенных процессов есть основа для выработки решений по развитию и оптимизации соответствующих маршрутных сетей, количеству привлекаемых ресурсов, по объемам необходимого финансирования и пр. Одним из наиболее эффективных средств указанного анализа является информационная технология геохронологического трекинга или геохронотрекинга, описанная в работах [1–3]. Программные средства геохронотрекинга становятся одним из наиболее популярных пользовательских приложений, интегрируемых в состав геоинформационных систем (ГИС) пакетов прикладных программ.

На основе геохронотрекинга разработана процедура проверки исследовательских гипотез об устойчивых тенденциях в процессах миграции, перемещений объектов, контроля трафика и пр. Сегодня эта процедура используется для анализа логистики современных транспортно-поставочных сетей, оптимизации транспортных потоков, систем диспетчеризации транспорта. Ее математическая сущность сводится к поиску и оценке статистической значимости изоморфизма соответствующих графов: итоговый граф геохронотрекинга представляется как граф-базис, в структуре которого выявляется подграф изоморфный заданному, т. е. устанавливается наличие взаимно однозначного отображения одного графа на подграф другого, при

котором сохраняется отношение инцидентности [4, 5]. Граф, на изоморфность к которому в составе базового графа геохронологического трекинга определяется подграф, топологически описывает ту или иную определенную гипотезу исследования об устойчивой особенности в перемещениях исторических личностей, объектов или других сущностей в географическом пространстве. Далее определяется степень устойчивости в признании гипотезы исследования о выявляемой особенности в перемещениях с использованием статистического аппарата доверительной вероятности и доверительных интервалов [1].

Вместе с тем, особенности алгоритмизации указанной процедуры геохронотрекинга во многом определяют результативность и точность ее применения в процессе прикладных исследований на базе ГИС. Очевидно, что высокая вычислительная и временная сложность базового алгоритма определения изоморфного вложения в граф предъявляет высокие требования именно к корректной программной реализации указанной процедуры при ее практическом внедрении.

Этот факт определил необходимость задания соответствующей оптимизационной задачи, установления граничных условий ее решения и алгоритмизации поиска соответствующих экстремумов. Постановка такой оптимизационной задачи должна учитывать ограничения, налагаемые реальными условиями объекта исследования – предметной областью ретроспективного исследования, примером формализованного описания которых могут служить [6, 7].

Указанная оптимизация позволяет обеспечить возможность варибельности в применении наилучшим образом алгоритма проверки гипотез ретроспективных исследований на основе геохронологического трекинга для различных комбинаций входных данных и требований к точности, ресурсоемкости и скорости алгоритма получения выходных данных. Такая оптимизация способствует широкому внедрению и автоматизации геохронотрекинга, как прикладного метода научных исследований. Рассмотрение математических и системологических сторон представленной оптимизации описанного алгоритма статистической проверки гипотез ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга в ГИС и есть предмет данной статьи. В рамках такого представления определены основные параметры и условия оптимальности рассматриваемого алгоритма, а также учтены результаты последних разработок по тематике геохронологического трекинга, например, таких как [8, 9].

## Методы и материалы

Методологической основой данного исследования является алгоритм проверки гипотез ретроспективных исследований использования водного

транспорта на базе геохронологического трекинга и соответствующая ему информационная технология. Они детально представлены и описаны в работах [1–3]. В ходе практической апробации программных средств, реализующих указанный алгоритм, был выявлен факт существования диапазона входных переменных, который приводит к трансвычислительному характеру процесса решения. Этот факт указал на необходимость постановки и решения соответствующей задачи оптимизации данного алгоритма для ряда учитываемых параметров. К таковым параметрам, на основании подходов, согласно [10], в ходе исследования были отнесены:

- практическая вычислимость результирующих значений согласно алгоритму, т. е. параметр логически противоположный трансвычислимости алгоритма (далее по тексту он для упрощения наименован как «расчетная вычислимость»);
- ресурсоэкономичность реализуемого согласно алгоритму вычислительного процесса, т. е. эффективность алгоритма при определенных, как правило, объективных ограничениях ресурсов вычислительной системы, которая этот алгоритм реализует в виде соответствующей программы (ресурсы оперативной памяти, быстродействия процессора, базовой системы ввода/вывода и пр.);
- обеспечиваемая точность результатов вычислительного процесса, реализуемого согласно алгоритму, т. е. достигаемый уровень значимой, с точки зрения предметной области, точности расчета и обеспечиваемый уровень статистической значимости получаемых результатов оценки значений соответствующих показателей достоверности исследовательских гипотез.

Указанная совокупность параметров в процессе формализации оптимизационной задачи для алгоритма проверки статистических гипотез ретроспективных исследований на базе геохронологического трекинга была обобщена в составе такого интегрального показателя качества вычислительного процесса, реализуемого согласно тому или иному алгоритму, как «результативность алгоритма». Именно этот комплексный показатель в ходе данной работы был принят за основной при многокритериальной оптимизации.

Таким образом, оптимизация алгоритма проверки статистических гипотез ретроспективных исследований на базе геохронологического трекинга является реализацией процедуры обеспечения вычислительной результативности (расчетной вычислимости) этого алгоритма, а значит, есть неотъемлемая часть и логическое продолжение обобщенной структуры указанных исследований. Именно этот факт вытекает из рассмотрения последовательности этапов указанных ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга (рисунок 1).

## Результаты

Из описаний рассматриваемого алгоритма [1–3] не трудно установить, что системологически ретроспективное исследование на основе геохронологического трекинга есть процесс обоснованного выдвигания, статистического ранжирования по уровню достоверности и принятия гипотезы о наличии/отсутствии закономерности в перемещениях объектов определенного класса из соответствующего множества гипотетических предположений. У данного процесса возможны различные алгоритмы его итеративно-расчетной реализации, один из которых ( $S^V$ ) будет являться оптимальным, т. е. наилучшим с точки зрения многокритериальной оптимизации:

$$S^V \in \{S_{j_i}\}_{j \in J^*, i \in I^*}, \quad (1)$$

где:  $I^*$  – мощность множества рассматриваемых и оцениваемых к принятию гипотез ретроспективного исследования;  $J^*$  – общее количество итераций процесса исследований на основе геохронологического трекинга.

Таким образом, становится возможной следующая постановка связанной оптимизационной задачи: цель оптимизации – выработка такого алгоритма расчетной процедуры ретроспективного статистического исследования на основе геохронологического трекинга, который при своей реализации обеспечивает максимизацию результативности соответствующего вычислительного процесса при установленных требованиях к точности получаемых расчетно-логических результатов и при существующих (т. е. объективных) ресурсных ограничениях программно-аппаратной платформы. При обозначенной цели постановка задачи оптимизации алгоритма проверки гипотез ретроспективных исследований на базе геохронологического трекинга сводится к следующим базисным, нижеприведенным логико-математическим положениям.

В частности, если на семействе (здесь и далее под семейством, согласно [11], понимается проиндексированное множество) альтернативных вариантов алгоритмов итеративно-расчетных реализаций  $\{S_j\}$  процедуры рассматриваемого процесса необходимо выявить и установить оптимальный алгоритм  $S^V$ , по некоторому интегральному показателю результативности  $R$ , то тогда постановка оптимизационной задачи будет формализована так:

$$R_{S_{j_i}} = f(\bar{b}_{S_{j_i}}, \bar{d}_{S_{j_i}}, \bar{r}_{S_{j_i}}), \quad (2)$$

где:  $bS$  – практическая вычислимость результирующих значений согласно алгоритму  $S_j$  при значениях входных переменных в установленных областях определения (т. е. при корректном учете граничных условий, для которых определяется  $S_j$ );  $dS$  – оценка обеспечиваемой точности результатов вычислительного процесса согласно алгоритму  $S_j$  в

определенном диапазоне области значений;  $r_s$  – оценка ресурсоэкономичности реализуемого согласно алгоритму вычислительного процесса (временных затрат, затрат ресурсов процессора, оперативной и кэш-памяти и пр.) реализации алгоритма  $S_j$ . Тогда формализованная цель оптимизации есть выявление:

$$R^* = \max(R_{S_{0_{\text{м}}}}(\bar{b}_{S_{j_i}}, \bar{d}_{S_{j_i}}, \bar{r}_{S_{j_i}})). \quad (3)$$

Иными словами,  $R^*$  – максимальное значение  $Rs(d, b, r)$ , получаемое на семействе альтернативных вариантов алгоритмов итеративно-расчетных реализаций  $\{S_j\}$  процедуры ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга. Математическая форма аналитического представления (2) и соответствующие ограничения на отдельные параметры вытекают из условий данного конкретного варианта проводимого ретроспективного исследования. Устойчиво выделяются три основных варианта (случая) оптимизации, уточняющих соотношение (3):

1) при ограниченных ресурсах вычислительного процесса (моральное устаревание вычислительной платформы, нехватка ресурсов процессора или памяти и пр.) инициированного реализовать алгоритм:

$$(\bar{b}_{S_{j_i}}, \bar{d}_{S_{j_i}})_{S \in \{S_j\}} \Rightarrow \max, \quad (4)$$

$$\bar{r}_{S_{ij}} \in r^{\Sigma}, \quad (5)$$

где  $r^{\Sigma}$  – предельное множество ресурсных характеристик текущей вычислительной платформы;

2) при ограничении требований к точности результатов вычислительного процесса, реализуемого согласно алгоритму (обеспечиваемой статистической значимости получаемых результатов оценки значений соответствующих показателей достоверности исследовательских гипотез) для достижения практических целей ретроспективного исследования:

$$(\bar{b}_{S_{j_i}}, \bar{r}_{S_{j_i}})_{S \in \{S_j\}} \Rightarrow \max, \quad (6)$$

$$\bar{d}_{S_{ij}} \in D, \quad (7)$$

где  $D$  – нижнее предельное значение достигаемого уровня значимой, с точки зрения предметной области, точности расчета;

3) при ограниченных ресурсах и ограниченной точности вычислительного процесса, реализующего алгоритм ретроспективного исследования на базе геохронотрекинга:

$$(\bar{b}_{S_{j_i}})_{S \in \{S_j\}} \Rightarrow \max, \quad (8)$$

$$\bar{r}_{S_{ij}} \in r^{\Sigma}, \quad (9)$$

$$\bar{d}_{S_{ij}} \in D. \quad (10)$$

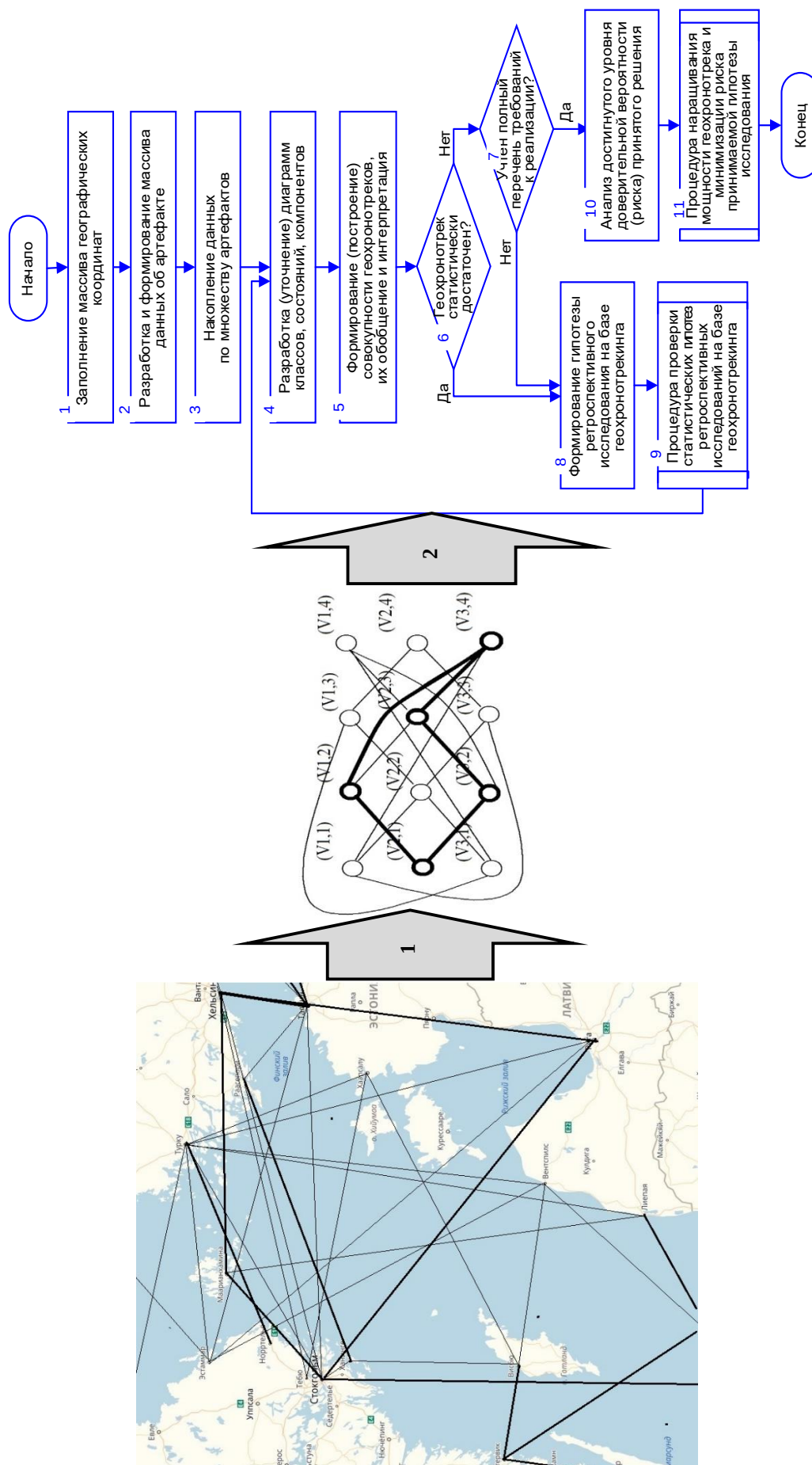


Рис. 1. Обобщенное представление этапов ретроспективных исследований на базе геохронологического трекинга: а) геохронологический трекинг предметной области исследования; б) формализация задачи и выдвижение гипотезы исследования; в) обеспечение оптимальной результативности (расчетной вычислимости) алгоритма

Fig. 1. A generalized Representation of the Stages of Retrospective Research Based on Geochronological Tracking: а) Geochronological Tracking of the Subject Field of Study; б) Formalization of the Problem and Research Hypothesizing; в) Ensuring Optimal Performance (Computability) of the Algorithm

Вариант 3 в наибольшей степени отражает реальность текущего состояния предметной области вычислительной оптимизации алгоритмов [12]: возможности ресурсоэффективности и обеспечения большой вычислительной точности почти всегда ограничены для высоко итеративных алгоритмов, но при этом необходимо добиться максимальной практической вычислимости результирующих значений. В силу того, что количество возможных вариантов алгоритма процедуры ретроспективного исследования  $S_j$ , формирующих семейство  $\{S_j\}$ , как правило, невелико, то при решении оптимизационной задачи значение  $RS(d, b, r)$  на основании предварительных оценок выявляется для каждого из них.

На базе анализа указанных значений фиксируется оптимальный вариант алгоритма процедуры ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга, для которого  $RS(d, b, r)$  достигает максимума вычислительной результативности  $R^*$ . Такая обобщенно описанная оптимизация есть элемент системного совершенствования алгоритмики процедур интеллектуальной поддержки процессов управления и логистики в различных предметных областях.

### Обсуждение

Решение выше обозначенной оптимизационной задачи заключается в определении наилучшей, с точки зрения результативности, логико-математической формы вычислительной реализации алгоритма ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга. При решении указанной задачи для разных входных условий определяется функция временной сложности. Именно эта функция дает возможность получить сводный показатель результативности алгоритма, связанного с геохронологическим трекингом. Традиционно это экспоненциальный или полиномиальный алгоритм определения изоморфизма подграфа в составе результирующего геохронологического трека, как полно связного графа.

Разница между экспоненциальным или полиномиальным типом алгоритмов явно выражена именно при геохронотрекинге большой размерности. Полиномиальные алгоритмы более предпочтительны для поиска изоморфизма на геохронотреке по сравнению с экспоненциальными в силу того, что большинство экспоненциальных алгоритмов есть варианты последовательного перебора, в то время как полиномиальные алгоритмы возможно построить тогда, когда удастся строго формализовать суть исследуемой предметной области, т.е. ретроспективное исследование строго формализовано, если для ее реализации создан полиномиальный алгоритм [13–16]. Однозначно не оптимальные параметры у алгоритмов, использующих математический метод полного прямого перебора.

Граничные условия для полученного решения оптимизационной задачи определены как границы множества вещественных чисел с назначенной над ней совокупностью алгебраических и логико-функциональных действий.

Дальнейшие направления совершенствования алгоритма проверки гипотез исследования на базе геохронологического трекинга связаны с заданием и типизацией основных инвариантов, упрощающих процедуру поиска и упорядочения соответствующих изоморфных вложений-гипотез в граф-базис геохронологического трека. В соответствии с разнообразием выбора однотипных фрагментов графа различают три класса инвариантов: локальные, квазиглобальные и глобальные.

Примером локального инварианта является кортеж степеней вершин, квазиглобального – кортеж степеней пар вершин, а канонический вид матрицы смежности графа является примером глобального инварианта. В этом случае, оптимально найти такой инвариант, который бы алгоритмически вычислялся по заданному графу, и при этом определял граф однозначно с точностью до изоморфизма. Развитие указанных направлений согласуется с подходами современной алгоритмики и методов интеллектуальной обработки данных, согласно [17,18].

Таким образом, концептуально описанный вариант решения поставленной оптимизационной задачи в виде определения соответствующего инварианта позволяет считать ассоциированный с таким инвариантом алгоритм оптимальным в системе выбранных сводных показателей: практическая вычислимость результирующих значений, ресурсоэкономичность реализуемого вычислительного процесса и обеспечиваемая точность результатов (именно эти показатели интегрируются в интегральный показатель вычислительной результативности (расчетной вычислимости) алгоритма). Такая оптимизация, в конечном итоге, позволяет расширить применимость математического аппарата проверки гипотез ретроспективных исследований на основе геохронологического трекинга для самых различных предметных областей и новых объектов изучения, добиться более эффективной его интеграции в соответствующие программные приложения для геоинформационных систем.

Следует заметить, что наиболее результативным направлением дальнейшего совершенствования алгоритма статистической проверки гипотез ретроспективных исследований на основе геохронологического трекинга за счет экспликации на него расчетных методов, моделей и методик такого раздела современной математики как мягкие вычисления, включая использование нечетких множеств (нечетких чисел), функций лингвистической переменной, расчетных схем потоковой обработки и др.

Это значительно расширит предметную область применения рассматриваемого алгоритма в исследовании социологических, политологическо-статистических, исторических и других процессов с использованием специализированных пакетов прикладных программ и геоинформационных приложений. Указанная перспектива совершенствования уже сегодня активно прорабатывается и развивается специалистами и ведущими учеными статистической математики, современной информатики и теоретической логики, о чем свидетельствуют публикации [12, 13, 19].

### Заключение

Основным практическим приложением разработанного аппарата проверки ретроспективных исследований на основе геохронологического трекинга является установление (выявление, прослеживание и пр.) неочевидных закономерностей в распределении перемещений изучаемых объектов, в приоритетности тех или иных маршрутов в пространственных сетях размещения артефактов, в обеспечении необходимых объемов трафика для поддержания устойчивых коммуникаций и пр. Эффективная алгоритмизация указанного аппарата значительно упрощает процесс его практиче-

ского внедрения в программное обеспечение соответствующих аналитико-управляющих систем.

Оптимизация алгоритма реализации проверки гипотез ретроспективных исследований на основе геохронологического трекинга позволяет добиться роста результативности и точности ее применения в процессе прикладного анализа на базе ГИС эффективности транспортно-поставочных сетей, планирования перевозок, систем логистико-пространственной организации инфраструктуры транспорта и пр. Также очевидна перспективность дальнейших усилий по развитию методологических средств и прикладной алгоритмики именно геохронологического трекинга, к которым можно отнести внедрение и интеграцию соответствующих информационных технологий искусственной интеллектуальности (технологии экспертных систем, систем нечеткой логики, технологий интеллектуального анализа данных и другие) в соответствующие ГИС-приложения. Указанная перспективность дает основание прогнозировать дальнейшее расширение области применения аппарата геохронологического трекинга в программных инструментах поддержки управленческих решений базирующихся на анализе накопленных фактов применения соответствующих объектов (артефактов).

### БЛАГОДАРНОСТИ

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №19-07-00006).*

### Список используемых источников

1. Ивакин Я.А., Потапычев С.Н., Ивакин Р.Я. Рациональный алгоритм проверки гипотез ретроспективных исследований использования водного транспорта на базе геохронологического трекинга // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11. № 3. С. 448–460. DOI:10.21821/2309-5180-2019-11-3-448-460
2. Ивакин Я.А., Потапычев С.Н. Геохронологический трекинг – специализированный ГИС-инструментарий исторического исследования // Историческая информатика. Информационные технологии и математические методы в исторических исследованиях и образовании. 2016. № 1–2. С. 3–11.
3. Ивакин Я.А., Потапычев С.Н. Информационная технология геохронологического трекинга для проверки гипотез ретроспективных исследований использования водного транспорта // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2018. Т. 10. № 2. С. 452–461. DOI:10.21821/2309-5180-2018-10-2-452-461.
4. Зыков А.А. Основы теории графов. М: Вузовская книга, 2004. 664 с.
5. Печенкин В.В., Королёв М.С., Дмитров Л.В. Прикладные аспекты использования алгоритмов ранжирования для ориентированных взвешенных графов // Труды СПИИРАН. 2018. № 6(61). С. 94–119. DOI:10.15622/sp61.4
6. Воротников В.И., Вохмянина А.В. Метод линеаризующей обратной связи в задаче управления по части переменных при неконтролируемых помехах // Труды СПИИРАН. 2018. № 6(61). С. 61–93. DOI:10.15622/sp61.3
7. Коваленко В.В. Состояние и мировые тенденции развития систем подводного наблюдения // Морские информационно-управляющие системы. 2016. № 2(10). С. 18–33.
8. Коваленко В.В. Океанологическое обеспечение распределенных систем подводного наблюдения // Морские информационно-управляющие системы. 2016. № 2(10). С. 68–79.
9. Deepak A., Tobias F. Average-case analysis of incremental topological ordering // Discrete Applied Mathematics. 2016. Vol. 158. Iss. 4. PP. 240–250.
10. Ammar A.B. Query Optimization Techniques in Graph Databases // International Journal of Database Management Systems (IJDBMS). 2016. Vol. 8. Iss. 4.
11. ISO/IEC 15504: Information Technology – Software Process Assessment. URL: <http://www.iese.fhg.de/SPICE> (дата обращения 3 марта 2019)
12. Steve McConnell. Software Estimation: Demystifying the Black Art (Developer Best Practices). New York: MicrosoftPress, 2006. 610 p.
13. Steve McConnell. Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction. New York: MicrosoftPress, 2004. 889 p.

14. Попович В.В. Теория обнаружения и поиска подвижных объектов. СПб.: Наука, 2016. 424 с.
15. Лаверов Н.П., Попович В.В., Ведешин Л.А., Коновалов В.Е. Современные методы и возможности системы освещения обстановки в Арктике в интересах обеспечения безопасности Северного морского пути // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 141–157. DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-3-141-157
16. Потапычев С.Н., Ивакин Я.А. Использование геопространственных данных для интеллектуальной поддержки принятия диспетчерских решений // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2018. № 2. С. 24–32.
17. Codescu M., Horsinka G., Kutz O., Mossakowski T., Rau R. DO-ROAM: Activity-Oriented Search and Transport Navigation with OpenStreetMap / GeoSpatial Semantics // Proceedings of the 6th International Conference on GeoSpatial Semantics (GeoS 2011). Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6631. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. PP. 88–107. DOI:10.1007/978-3-642-20630-6\_6
18. Sigma Knowledge Engineering Environment. URL: <http://sigmakee.sourceforge.net> (дата обращения 03.03.2020)
19. Cooper R.G. Winning at new products. Accelerating the process from idea to launch. Cambridge (MA): Perseus Publishing, 2001. 227 p.

\* \* \*

## Refinement Algorithm of Hypotheses Testing Research Based on Geochronological Tracking

R.Y. Ivakin<sup>1</sup>, Y.A. Ivakin<sup>2, 3</sup> , S.N. Potapichev<sup>2, 3</sup> 

<sup>1</sup>The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

<sup>2</sup>St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences  
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

<sup>3</sup>JSC "Concern "OCEANPRIBOR"  
St. Petersburg, 198226, Russian Federation

### Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-86-93

Received 17th January 2020

Accepted 2nd March 2020

**For citation:** Ivakin R.Y., Ivakin Y.A., Potapichev S.N. Refinement Algorithm of Hypotheses Testing Research Based on Geochronological Tracking. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(1):86–93. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-86-93

**Abstract:** *Geochronological tracking is an effective information technology for digital cartographic spatial data sets processing. It is widely known in retrospective patterns research about geographic relocation of figures, or any other units for a given time interval. Software component of geochronological tracking is becoming one the most popular GIS-integrated applications. The article presents the basic provisions for the algorithmization of the geochronological tracking procedure for statistical testing of retrospective studies hypotheses. We can observe the results of solving this optimization problem in a general form and in a number of the most typical variants. The obtained results of solving the optimization problem are interpreted in terms of the retrospective studies subject area. There are shown the ways of further practical application of the optimized algorithm in the tasks of modern logistics, data mining and formalized knowledge.*

**Keywords:** *Geographic information systems, GIS-technologies for historic research, geochronological track and tracking, graphs isomorphism, optimal algorithm, refinement of algorithm, GIS-based interdisciplinary research, refinement tasking.*

## References

1. Ivakin Ya.A., Potapychiev S.N., Ivakin R.Ya. Optimal Algorithm of Hypotheses Testing at the Ship Use Research Based on the Geochronological Tracking. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2019;11(3):448–460. DOI:10.21821/2309-5180-2019-11-3-448-460 (in Russ.)
2. Ivakin Ya.A., Potapychiev S.N. Geochronology Tracking – Specialized Gis-Tool for History Researches. *Istor. inform.* 2016;1–2:3–11. (in Russ.)
3. Ivakin Ya.A., Potapychiev S.N. Information Technology of Geochronological Tracking for Hypotheses Testing in Research of Ship Use. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2018;10(2):452–461. (in Russ.) DOI:10.21821/2309-5180-2018-10-2-452-461
4. Zykov A.A. *Graph Theory Basis*. Moscow: Vuzovskaya kniga; 2004. 664 p. (in Russ.)
5. Pechenkin V.V., Korolev M.S., Dimitrov L.V. Applied Aspects of Ranking Algorithms for Oriented Weighted Graphs (on the Example of Social Network Graphs). *SPIIRAS Proceedings*. 2018;6(61):94–119. (in Russ.) DOI:10.15622/sp61.4
6. Vorotnikov V.I., Vokhmyanina A.V. Feedback Liniarization Method for Problem of Control of a Part of Variables in Uncontrolled Disturbances. *SPIIRAS Proceedings*. 2018;6(61):61–93. (in Russ.) DOI:10.15622/sp61.3
7. Kovalenko V.V. Status and global trends in the development of underwater surveillance systems. *Morskiye informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2016;2(10):18–33. (in Russ.)
8. Kovalenko V.V. Oceanological support of distributed underwater observation systems. *Morskiye informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2016;2(10):68–79. (in Russ.)
9. Deepak A., Tobias F. Average-case analysis of incremental topological ordering. *Discrete Applied Mathematics*. 2016;158(4):240–250. DOI:10.1016/j.dam.2009.07.006
10. Ammar A.B. Query Optimization Techniques in Graph Databases. *International Journal of Database Management Systems (IJDBMS)*. 2016;8(4).
11. ISO/IEC 15504: Information Technology – Software Process Assessment. URL: <http://www.iese.fhg.de/SPICE> [Accessed 3rd March 2019]
12. Steve McConnell. *Software Estimation: Demystifying the Black Art (Developer Best Practices)*. New York: Microsoft Press, 2006. 610p.
13. Steve McConnell. *Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction*. New York: Microsoft Press, 2004. 889 p.
14. Popovich V.V. *The Theory of Detection and Search for Moving Objects*. St. Petersburg: Nauka; 2016. 424 p.
15. Laverov N.P., Popovich V.V., Vedeshin L.A., Konovalov V.E. Modern approaches and capabilities of the Arctic monitoring system for maritime safety of the Northern Sea Route. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017;14(3):141–157. (in Russ.) DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-3-141-157
16. Potapychiev S.N., Ivakin Ya.A. Using Geophysical Data for Intelligent Support of Acceptance of Control Board Decisions. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design*. 2018;2:24–32. (in Russ.)
17. Codescu M., Horsinka G., Kutz O., Mossakowski T., Rau R. DO-ROAM: Activity-Oriented Search and Transport Navigation with OpenStreetMap / GeoSpatial Semantics. *Proceedings of the 6th International Conference on GeoSpatial Semantics, GeoS 2011. Lecture Notes in Computer Science*. vol.6631. Berlin, Heidelberg: Springer; 2011. p.88–107. DOI:10.1007/978-3-642-20630-6\_6
18. Sigma Knowledge Engineering Environment. URL: <http://sigmakee.sourceforge.net> [Accessed 3rd March 2019]
19. Cooper R.G. *Winning at new products. Accelerating the process from idea to launch*. Cambridge (MA): Perseus Publishing; 2001. 227 p.

## Сведения об авторах:

|                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ИВАКИН Роман Янович</b>         | инженер-исследователь НИИ «Технологии связи» Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, <a href="mailto:romanivakin2018@yandex.ru">romanivakin2018@yandex.ru</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>ИВАКИН Ян Альбертович</b>       | доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по инновациям и проектам гражданского назначения АО «Концерн «Океанприбор», ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук, <a href="mailto:yan_a_ivakin@mail.ru">yan_a_ivakin@mail.ru</a><br> <a href="https://orcid.org/0000-0002-1297-7404">https://orcid.org/0000-0002-1297-7404</a> |
| <b>ПОТАПЫЧЕВ Сергей Николаевич</b> | кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории АО «Концерн «Океанприбор», старший научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук, <a href="mailto:potapychiev@mail.ru">potapychiev@mail.ru</a><br> <a href="https://orcid.org/0000-0002-2899-8154">https://orcid.org/0000-0002-2899-8154</a>                                                 |