



АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БАЗИРУЮЩИХСЯ НА ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКОМ ТРЕКИНГЕ

Я. А. Ивакин^{1,2}, С. Н. Потапычев^{1,2}, В. С. Елагин^{3*}

¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

²АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР»», Санкт-Петербург, 198226, Российская Федерация

³Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: elagin.vas@gmail.ru

Аннотация—Геохронологический трекинг получил широкое признание как соответствующий научно-методический инструментальный и эффективная информационная технология ретроспективных исследований в интересах обоснования и рационализации маршрутных сетей транспорта, логистики перевозок, анализа фактов миграции населения и перемещений отдельных исторических личностей и пр. На базе геохронотрекинга разработана процедура статистической проверки исследовательских гипотез об устойчивых тенденциях в развитии различных пространственно-временных процессов. Надежность и достоверность принятия той или иной гипотезы в рамках ретроспективного исследования определяется представительностью (репрезентативностью) объема исходных данных о географических перемещениях, рассматриваемых как выборка из генеральной совокупности. Статистическая значимость (устойчивость) результатов ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга зависит от достаточности учтенных исходных данных о перемещениях исследуемых объектов. Анализ указанной зависимости и выработке алгоритма оценки указанной устойчивости (значимости) посвящена данная статья.

Ключевые слова—географические информационные системы, ГИС-технологии для ретроспективных исследований, геохронологический трек и трекинг, изоморфизм графов, рациональный алгоритм, междисциплинарные исследования на базе ГИС, статистическая устойчивость выводов.

Информация о статье

УДК 681.1.003

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 27.04.2021, принята к печати 28.07.2021.

Ссылка для цитирования: Ивакин Я. А., Потапычев С. Н., Елагин В. С. Алгоритм оценки и повышения статистической устойчивости результатов ретроспективных исследований базирующихся на геохронологическом трекинге // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Том 9. № 2. С. 95–111. DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-2-95-111.



AN ALGORITHM FOR EVALUATING AND IMPROVING THE STATISTICAL STABILITY OF THE RESULTS OF RETROSPECTIVE STUDIES BASED ON GEOCHRONOLOGICAL TRACKING

Y. Ivakin^{1,2}, S. Potapichev^{1,2}, V. Elagin^{3*}

¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 199178, St. Petersburg, Russian Federation

²AO "Concern "OCEANPRIBOR", 198226, St. Petersburg, Russian Federation

³The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

*Corresponding author: elagin.vas@gmail.ru

Abstract—Geochronological tracking has been accorded wide recognition as an appropriate scientific and methodological toolkit and an effective information technology for retrospective research in the interests of substantiating and rationalizing transport route net-works, transportation logistics, analyzing the facts of population migration and movements of individual historical figures. A procedure based on geochronological tracking for statistical verification of research hypotheses has been developed about robust trends in the development of various spatiotemporal processes. The reliability and validity of accepting a particular hypothesis within the framework of a retrospective study is determined by the representativeness of the initial dataset on geographic movements, considered as a sample from the general population. The statistical significance (robustness) of the results of a retrospective study based on geochronological tracking depends on the sufficiency of the considered initial data on the movements of the objects under study. This article is devoted to the analysis of this dependence and the development of an algorithm for assessing the specified robustness (or significance).

Keywords—geographic information systems, GIS-technologies for historic research, geochronological track and tracking, graphs isomorphism, optimal algorithm, refinement of algorithm, GIS-based interdisciplinary research, statistical inference robustness.

Article info

Article in Russian.

Received 27.04.2021, accepted 28.07.2021.

For citation: Ivakin Y., Potapichev S., Elagin V.: An algorithm for evaluating and improving the statistical stability of the results of retrospective studies based on geochronological tracking // Telecom IT. 2021. Vol. 9. Iss. 2. pp. 95–111 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-2-95-111.



Введение

Ретроспективный статистически-значимый анализ перемещений в географическом пространстве есть база для принятия решений по организации различных пространственно-временных систем. Геохронологический трекинг получил широкое признание как соответствующий научно-методический инструментарий и эффективная информационная технология ретроспективных исследований в интересах обоснования и рационализации маршрутных сетей транспорта, логистики перевозок, анализа фактов миграции населения и перемещений отдельных исторических личностей и пр. Основные принципы, процедуры и алгоритмы геохронологического трекинга описаны в [1, 2, 3, 4, 5]. Его 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 [3]. 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 [4].

Вместе с тем, надежность и достоверность принятия той или иной гипотезы в рамках ретроспективного исследования определяется представительностью (репрезентативностью) объема исходных данных о географических перемещениях, рассматриваемых как выборка из генеральной совокупности. Статистическая значимость (устойчивость) результатов ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга зависит от достаточности учтенных исходных данных о перемещениях исследуемых объектов. Иными словами, для принятия исследовательских гипотез ретроспективного исследования на базе геохронотрекинга с заданной доверительной вероятностью должно быть обеспечено необходимое и достаточное (релевантное) число учтенных единичных геопространственных перемещений, рассматриваемых как единичные статистические испытания. Обоснованная выработка математико-статистического аппарата и методики увязывания доверительной вероятности принятия гипотез исследований на базе геохронотрекинга с исходным числом учитываемых перемещений составляет существо обеспечения статистической устойчивости (значимости) выводов указанных исследований.

Разработка и обоснование математико-статистического аппарата и методики определения необходимого и достаточного числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к итоговым результатам осуществлено путем последовательной реализации следующих логических шагов:



1. Теоретическая разработка и адаптация к условиям исследования математико-статистических основ определения необходимых и достаточных объемов выборки из генеральной совокупности данных о единичных перемещениях в географическом пространстве для обеспечения заданного значения доверительной вероятности получаемых выводов проводимого ретроспективного исследования.

2. Интерпретация выделенного математико-статистического аппарата, как аппарата обеспечения требуемого уровня надежности получаемых выводов проводимого ретроспективного исследования, применительно к подходам и моделям геохронотрекинга.

3. Конкретизация и описательное представление алгоритма расчета релевантного числа учитываемых перемещений объектов- единичных испытаний в ходе ретроспективных исследований методом геохронотрекинга для обеспечения приемлемого уровня рисков при принятии итоговых решений.

Детализация существа указанных шагов позволяет раскрыть существо методики определения необходимого и достаточного числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований на основе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к результатам и выводам исследования, в целом.

Методы и материалы

В рамках постановки ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга в работах [4, 5] в качестве генеральной совокупности данных рассматривается теоретическое число выборочных значений учитываемых перемещений рассматриваемых объектов, обеспечивающее доверительную вероятность принятия решений о выводе частного исследования равным 1. Очевидно, что размер генеральной совокупности, при данной постановке, теоретически не ограничен, однако на практике объем данных положенных в основу геохронотрека всегда конечен и ограничен. Тогда, частная задача определения необходимого и достаточного объема выборки из генеральной совокупности данных о перемещениях в географическом пространстве за заданный промежуток времени для обеспечения заданного уровня доверия к выводам исследования сводится к математическому увязыванию значения доверительной вероятности правильного вывода в оценке исследуемого параметра с таким числом единичных испытаний, которое обеспечивает оценку требуемого доверительного интервала в разбросе искомого параметра. В своей информационно-логической сущности данная задача детально рассмотрена и теоретически решена в работах, посвященных информационным технологиям компьютерного моделирования, трудах по теории вероятности и прикладной статистике. Например, в таких как Sigma Knowledge Engineering Environment¹ [6, 7, 8, 9]. Существо теоретического решения данной задачи заключается в построении (оценке) доверительного интервала для исследуемого параметра, обусловленного заранее заданной доверительной вероятностью, как некоторого двумерного функционала, определяемого разницей между теоретическим значением искомого параметра и выборочным значением накопленной статистики его оценок.

¹ Sigma Knowledge Engineering Environment. URL: <http://sigmakee.sourceforge.net>.



что принимаемые значения параметра геохронотрека следует считать соответствующими теоретическому значению. Линия 5 обозначает дискретный процесс накопительного учета выбросов в экспериментально получаемых значениях исследуемого параметра вне обоснованного эллипса среднеквадратического отклонения при геохронотрекинге в зависимости от текущего суммарного числа одиночных испытаний (наблюдений) в ходе исследования. При этом, очевидно, что линия дискретного учета выбросов 5 в экспериментально получаемых значениях исследуемого параметра не может попадать в область, расположенную на рис. 1 выше границы

$$r = N. \quad (1)$$

Приведенная на рис. 1 интерпретация решения логико-математической задачи определения релевантного объема выборки из генеральной совокупности данных многократных испытаний – перемещений для обеспечения заданного уровня доверия к выводам ретроспективного исследования позволяет рассматривать указанный объем выборки как ключевой показатель обеспечения требуемой надежности выводов проводимого исследования. То есть, релевантным является такое не избыточное число единичных испытаний (учитываемых перемещений в географическом пространстве), которое обеспечивает заданную, в виде доверительной вероятности, надежность результатов проведения ретроспективных исследований. Именно такое понимание задачи определения релевантного объема выборки из генеральной совокупности данных геохронотрекинга для обеспечения заданного уровня доверия к выводам исследования позволило интерпретировать её в рамках подходов к определению надежности статистических выводов в рамках эксперимента на базе ГИС.

Результаты

В общенаучном смысле, надежность выводов исследования – это свойство такого объекта инфосферы, как вновь полученное знание, устойчиво и неизменно вырабатывать функционально пригодные и достоверные результаты при заданных начальных данных и входных условиях [10]. Применительно к условиям проведения ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга показателем с количественной мерой для оценки указанной надежности выступает доверительная вероятность истинности результатов частного испытания, исследования. При этом доверительная вероятность истинности результатов задается априорно и обеспечивается в ходе проведения ретроспективных исследований путем проведения достаточного числа элементарных испытаний.

Вышеописанный вариант рассмотрения статистической сущности проводимого исследования позволил интерпретировать её в рамках стандартизированного аппарата обеспечения и расчета показателей надежности в технике [11]. Указанный аппарат разработан, апробирован и рекомендован к применению в рамках действующей национальной системы нормативно-технического регулирования. Он применим к предметной области ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга в ГИС.



Интерпретация математико-статистического аппарата, обеспечения требуемого уровня доверительной вероятности к получаемым выводам проводимого исследования на базе геохронотрекинга сводится к определению основных входных и выходных переменных указанного аппарата в категориях проводимого в ГИС анализа перемещений исследуемых сущностей (объектов), а также заданию общих граничных условий его применения. В частности, объемы испытаний N (общее число одиночных учитываемых перемещений в составе трека (наблюдений)) установленные в разработанной методике, основаны на предположении, что единичные испытания являются статистически независимыми и значение доверительной вероятности истинности получаемых выводов является постоянным.

По результатам полного объема испытаний N по каждой из исследуемых характеристик геохронотрека принимается одно из следующих альтернативных исследовательских решений:

А. Регистрируемое и осредненное по N единичным актам испытаний значение численного параметра (качественного проявления) геохронотрека принимается истинным с доверительной вероятностью P (т. е. принятие значения как истинного, с определенным уровнем доверия);

Б. Регистрируемое и осредненное по N единичным актам испытаний значение численного параметра (качественного проявления) геохронотрека не принимается истинным (т. е. отклонение значения как истинного, с определенным уровнем доверия).

В рамках геохронотрекинга альтернатива Б. означает необходимость либо снижения априорного уровня требуемой доверительной вероятности правильного принятия исследовательского решения, либо дальнейшего наращивания общего числа N одиночных испытаний (учитываемых перемещений) для подтверждения надежности принимаемых исследовательских решений. В отдельных случаях – изменения постановки организации ретроспективного исследования.

Применительно к методике определения необходимого и достаточного числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к итоговым результатам приняты следующие обозначения входных и выходных величин, переменных используемого научно-методического аппарата:

P – апостериорная, т. е. накопленная в треке доверительная вероятность истинности частного результата ретроспективного исследования, значения численного параметра (качественного проявления) той или иной дуги трека;

P_α – априорный уровень вероятности доверительного принятия значения численного параметра (качественного проявления) той или иной дуги трека;

P_β – априорный уровень вероятности доверительного отклонения (несоответствия, непризнания истинности) значения численного параметра той или иной дуги трека;

Q – апостериорное значение вероятности риска некорректного принятия частного результата ретроспективного исследования, значения численного параметра (качественного проявления) дуги геохронотрека;



Q_α – априорное значение вероятности-дополнения до единицы уровня вероятности доверительного принятия значения численного параметра (качественного проявления) той или иной дуги трека, т. е.

$$Q_\alpha = 1 - P_\alpha; \quad (2)$$

Q_β – априорное значение вероятности дополнений до единицы уровня вероятности доверительного отклонения (несоответствия, непризнания истинности) значения численного параметра той или иной дуги трека, т. е.

$$Q_\beta = 1 - P_\beta; \quad (3)$$

Наличие заданных параметров ретроспективного исследования (2) и (3) на базе геохронотрекинга согласно [12] определяет т. н. разрешающий коэффициент D , равный отношению значений дополнений до единицы уровня вероятности доверительного принятия наблюдаемого значения в исследовании к уровню вероятности отклонения:

$$D = Q_\beta / Q_\alpha = (1 - P_\beta) / (1 - P_\alpha); \quad (4)$$

N – общее (суммарное) число единичных испытаний (объем учитываемых перемещений объектов или артефактов в составе геохронотрека);

n – учитываемое, апостериорное число фактов корректной реализации единичных испытаний и успешного принятия наблюдаемого значения, результата каждого единичного испытания;

r – учитываемое, апостериорное число фактов отклонения, в силу различных причин, наблюдаемого значения, результата каждого единичного испытания т. е. из числа учитываемых перемещений объектов, артефактов и пр.;

При этом, очевидно, что в каждый конкретный момент учета данных в составе геохронотрека верно соотношение:

$$N = n + r; \quad (5)$$

c – предельное (максимально допустимое, пороговое) суммарное учитываемое число фактов отклонений, в силу различных причин, результата каждого единичного перемещения, учитываемого в процессе ретроспективного исследования;

α – априорное (директивно заданное, исходное для ретроспективного исследования) значение риска некорректного принятия наблюдаемого значения, результата геохронотрекинга;

α_1 – апостериорное (фиксируемое в ходе исследования) значение риска некорректного принятия результата геохронотрекинга;



β – априорное (директивно заданное, исходное для ретроспективного исследования) значение риска некорректного отклонения при необходимости принятия наблюдаемого значения;

β_1 – апостериорное (фиксируемое в ходе эксперимента) значение риска некорректного отклонения при необходимости принятия результата геохронотрекинга;

P_3 – заданная в нормативных (априорная для всей гаммы исследований) документах требуемая доверительная вероятность обеспечения надежности результатов ретроспективного исследования на базе геохронотрекинга.

Исходными априорными данными для определения релевантного объема испытаний N с целью подтверждения вероятностных показателей надежности выводов ретроспективного исследования, их составляющих параметров являются:

– значения априорных уровней вероятности доверительных принятия P_α и отклонения P_β наблюдаемых значений численного параметра (качественного проявления) той или иной дуги геохронотрека, которые определяют собой разрешающий коэффициент D .

– априорные значения рисков некорректного принятия значений, результатов ретроспективного исследования α и некорректного отклонения при необходимости принятия значения или качественных результатов указанного исследования β .

В общем случае методика определения необходимого и достаточного числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к итоговым результатам включает три основных (обобщенных) этапа:

I. Подготовка исходных данных для расчета необходимого и достаточного числа единичных испытаний в ходе геохронотрекинга ретроспективного исследования;

II. Расчет и оценка доверительного интервала для принятия наблюдаемого значения, результата каждого единичного испытания (перемещения) при назначенных (априорных) значениях риска (или доверительной вероятности);

III. Принятие итогового исследовательского решения по релевантному числу (объему) единичных испытаний.

Последовательное описание каждого из указанных этапов позволяет раскрыть содержание предлагаемой методики в целом.

I.) Подготовка и подбор исходных данных для определения объема испытаний необходимо осуществлять в следующей последовательности:

i. На основании анализа ранее полученного опыта экспериментирования с аппаратом геохронологического трекинга, а также исходя из объективной ограниченности ресурсов ретроспективных исследований априорно устанавливаются значения вероятности доверительного принятия P_α и доверительного отклонения (несоответствия, непризнания истинности) P_β наблюдаемого значения параметров анализируемого или синтезируемого геохронотрека;



ii. Априорно устанавливаются значения рисков некорректного принятия значения, результата ретроспективного исследования α и некорректного отклонения при необходимости принятия значения β . Значения указанных уровней P_α и P_β изначально устанавливаются, исходя из предельных возможностей накопления пространственно-временной информации о перемещениях объектов, учитываемых в процессе геохронотрекинга. Рекомендуется P_α и P_β устанавливать таким образом, чтобы значение P_3 находилось в интервале $[(P_\beta + P_\alpha)/2, P_\alpha]$ ближе к априорному уровню P_α вероятности доверительного принятия наблюдаемого значения параметра (качественного проявления) геохронотрека. Уровни допускается устанавливать двумя равнозначными способами: (P_α и P_β) или (P_α и D). При втором способе значение разрешающего коэффициента D рекомендуется выбирать из ряда: 1,5; 1,75; 2,0; 3,0.

iii. Значения рисков α и β устанавливаются следующим образом: Значение риска некорректного отклонения при необходимости принятия наблюдаемого значения β устанавливается субъективно, применительно к особенностям реализуемой архитектуры геохронотрека, в соответствии с принятыми нормативами или стандартами предметной области будущего применения результатов ретроспективного исследования. Традиционно значение риска некорректного принятия наблюдаемого значения, результата испытания α априорно устанавливаются по субъективному усмотрению, равным значению β или больше него. В настоящей методике, на основании принципа равной вероятности несмещенных статистических ошибок, принято

$$\alpha = \beta. \quad (6)$$

На основании (6) далее приняты (приведены ниже в таблицах 1 и 2) значения рисков α и β равными. Значения рисков в соответствии с [13] рекомендуется выбирать из ряда: 0,05; 0,1; 0,2; 0,3.

Согласно [13] не рекомендуется устанавливать исходные данные, сочетающие большие значения разрешающего коэффициента D с малыми значениями рисков α и β . Такие исходные данные следует изменять путем уменьшения значения разрешающего коэффициента D и увеличения значений рисков α и β . Соответственно, рекомендуемые соотношения исходных данных для определения объема испытаний приведены в таблице 1.

II.) Расчет и оценка доверительного интервала для принятия значений, результатов каждого единичного перемещения при назначенных (априорных) значениях риска (или доверительной вероятности) необходимо осуществлять в следующей последовательности:

а) В силу несмещенного характера оценки P_α относительно значения P_3 , в качестве точечной оценки для апостериорной доверительной вероятности ис-



тинности частного результата ретроспективного исследования, значения параметра (качественного проявления) геохронотрека принимается частота P , определяемая как

$$P = n / N; \quad (7)$$

Таблица 1.

Рекомендуемые соотношения исходных данных для анализа геохронотрека

№ п/п	D	P_α	$\alpha = \beta$
1	1,50-1,75	0,9995	0,05
2		0,9990	0,10
3		0,9950	0,20
4	1,75-2,00	От 0,99 до 0,90 с шагом 0,01	0,10
5			0,20
6			0,30
7	2,00-2,50	0,8500	0,20
8			0,30
9	3,00	0,8000	0,20

б) Объем единичных испытаний N для подтверждения выводов ретроспективного исследования является параметром, определяющим размер доверительного интервала I для вероятности P , т. е. задача расчета N достаточного для подтверждения априорно требуемой надежности оценки истинности частного результата ретроспективного исследования, значения численного параметра (качественного проявления) геохронотрека сводится к типовой математической задаче построения доверительного интервала и оценки надежности некоторой вероятности по частоте события, наблюдаемого в процессе итеративного ретроспективного исследования. Детализированное математическое решение данной задачи приведено в [6, 11, 13].

с) В общем виде, при N испытаниях доверительный интервал I , в который с доверительной вероятностью $1 - \alpha$ (при $\alpha = \beta$) попадет несмещенная оценка истинности частного результата ретроспективного исследования, значения параметра (качественного проявления) геохронологического трека определяется из сводного соотношения:

$$I = \frac{P + \frac{D}{2N} \pm D \sqrt{P \frac{1-P}{N} + \frac{D^2}{4N^2}}}{1 + \frac{D^2}{N}}. \quad (8)$$



d) Указанные соотношения (7) и (8) позволили в рамках данной частной методики алгоритмически связать общее (суммарное) число единичных перемещений объектов (общий объем единичных испытаний) N и предельное (максимально допустимое, пороговое) суммарное учитываемое число фактов отклонения, в силу различных причин, анализируемого значения, результата каждого единичного испытания-перемещения, наблюдаемых в процессе геохронотрекинга c с исходными данными, описанными в таблице 1. Принимая значение уровня вероятности P_α доверительного принятия наблюдаемого значения параметра (качественного проявления) геохронотрека за априорно соответствующее целям подтверждения уровня требуемой доверительной вероятности обеспечения надежности результатов в комплексном ретроспективного исследования P_3 , заданного для всей гаммы исследований, определены соотношения выше указанных значений испытаний для подтверждения искомых характеристик геохронотрекинга. Некоторые результаты этого определения приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Значения объема учитываемых перемещений объектов (артефактов) в геохронотреке с обеспечиваемой доверительной вероятностью результатов ретроспективных исследований

P_α	D	$\alpha = \beta = 5 \%$		$\alpha = \beta = 10 \%$		$\alpha = \beta = 20 \%$		$\alpha = \beta = 30 \%$	
		N	c	N	c	N	c	N	c
0,9	1,5	474	58	288	35	134	16	53	6
	1,75	227	30	138	18	64	8	27	3
	2	135	19	86	12	39	5	18	2
	3	41	7	23	4	14	2	8	1
0,85	1,5	294	54	181	33	79	14	35	6
	1,75	141	28	87	17	42	8	18	3
	2	85	18	53	11	21	4	12	2
	3	26	7	16	4	9	2	5	1
0,8	1,5	204	50	127	31	55	13	26	6
	1,75	98	26	61	16	28	7	13	3
	2	60	17	36	10	19	5	9	2
	3	17	6	9	3	4	1	4	1

III.) Принятие исследовательского решения по релевантному числу (объему) единичных испытаний – учитываемых перемещений объектов в геохронотреке, осуществляется путем выполнения следующих логических шагов:

1) На основании трактовки сущности дуг геохронотрека и накопительного характера учета единичных перемещений производится определение и предмет-



ная интерпретация исходных данных для определения релевантного объема учитываемых перемещений. При этом рекомендуется придерживаться соотношений исходных данных, представленных в таблице 1.

2) По выбранным параметрам исходных данных осуществляется вход в таблицу 2 настоящей методики, из которой становится возможным определить общее (суммарное) число единичных испытаний N и предельное (максимально допустимое, пороговое) суммарное учитываемое число фактов отклонения, в силу различных причин, результата каждого единичного испытания, наблюдаемых в процессе ретроспективных исследований c , недостижение которого в процессе реализации всего объема единичных испытаний означает факт принятия альтернативы А.) (наблюдаемое и осредненное по N единичным актам испытаний-перемещений значение параметра (качественного проявления) геохронотрека принимается истинным с доверительной вероятностью P); а достижение или превышение текущего значения C над табулированным значением означает факт принятия альтернативного исследовательского решения Б.) (наблюдаемое и осредненное по N единичным актам испытаний-перемещений значение параметра (качественного проявления) геохронотрека не принимается истинным).

3) Для многоэтапных ретроспективных исследований оценка уровня доверия к апостериорным значениям параметров геохронотреков проводится применительно для каждого этапа такого исследования. Далее сводная оцененная доверительная вероятность к результатам многоэтапного ретроспективного исследования, соотносимая с априорной для всей гаммы исследований, т. е. требуемой, доверительной вероятностью обеспечения надежности результатов в серии однотипных этапов-испытаний комплексного исследования P_3 , рассчитывается согласно формулам условной и полной вероятностей. Существо задачи указанного расчета детально раскрыто в работах [14, 15].

Обсуждение

Решение задачи достижения необходимой статистической значимости (устойчивости) результатов ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга заключается в обеспечении достаточности учтенных исходных данных о перемещениях исследуемых объектов при построении соответствующего геохронотрека. При решении указанной задачи введена понятная и традиционная мера указанной значимости (устойчивости) результатов ретроспективного исследования в виде доверительной вероятности. Для различных градаций указанной вероятности и уровня риска в её принятии определен объем учитываемых перемещений объектов или артефактов в составе геохронотрека, рассматриваемый как суммарное число единичных испытаний, которое должно быть обеспечено при синтезе соответствующего указанного трека. При непревышении выявленного соотношения указанного объема и числа фактов отклонений тех или иных единичных перемещений, гипотеза ретроспективного исследования принимается с искомой доверительной вероятностью.



Граничные условия для полученного решения задачи достижения статистической устойчивости результатов ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга определены как границы применимости приложений теории вероятности и математической статистики.

Дальнейшие направления совершенствования методики определения необходимого и достаточного числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований на основе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к результатам и выводам исследования связаны с её алгоритмизацией и автоматизацией, интеграцией в состав современных геоинформационных систем, ориентированных на прикладные исследования и решение пространственно-временных, аналитических задач в смежных областях [16, 17, 18, 19, 20].

Таким образом, приведенный вариант методики решения задачи достижения статистической устойчивости результатов ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга позволяет обеспечить и значительно расширить применимость научно-методического аппарата геохронологического трекинга на новые классы приложений. В свою очередь, данный факт позволяет расширить применимость математического аппарата проверки гипотез ретроспективных исследований на основе геохронологического трекинга для различных предметных областей и новых объектов изучения, добиться более эффективной его интеграции в соответствующие программные приложения для геоинформационных систем.

Заключение

Разработка математико-статистического аппарата и методики определения необходимого и достаточного числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга позволит развить соответствующий научно-методический инструментарий и вытекающие из него информационные технологии ретроспективных и исторических геопространственных исследований в интересах инженерии, логистики, а также гуманитарных наук. Также очевидна перспективность работ по развитию прикладной алгоритмики геохронотрекинга, как такового. К указанным работам следует отнести внедрение и интеграцию соответствующих информационных технологий искусственной интеллектуальности, интеграции и слияния информации, виртуализации и пр. в соответствующие геоинформационные приложения.

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

Литература

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 имени адмирала С. О. Макарова. 2019. Т. 11. № 3. С. 448–460. doi: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-448-460.
2. Потапычев С. Н., Ивакин Я. А. Геохронологический трекинг – специализированный ГИС-инструментарий исторического исследования гипотез // Журнал «Историческая информатика. Информационные технологии и математические методы в исторических исследованиях и образовании». 2016. № 1-2. С. 3–11.



3. Ивакин Я. А., Потапычев С. В. Информационная технология геохронологического трекинга для проверки 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. 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. No. 1. С. 86–93. doi: 10.31854/1813-324X-2020-6-1-86-93.
5. Ивакин Я. А., Потапычев С. Н. Информационная технология исследований особенностей применения изделий гидроакустической техники на основе геохронологического трекинга // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. No 2. С. 109–119. doi 10.31854/2307-1303-2020-8-2-109-119.
6. 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, GeoS 2015. 2015. pp. 88–108.
7. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. 7-е изд. Москва: Издательство Юрайт, 2019. 343 с.
8. Юсупов Р. М., Заболотский В. П. Концептуальные и научно-методологические основы информатизации. СПб.: Наука, 2009. 541 с.
9. Советов Б. Я., Цехановский В. В. Информационные технологии. 6-е изд., перераб. Москва: Издательство Юрайт, 2016. 263 с.
10. Шмид А. В. Революция в области философии и технологиях принятия корпоративных решений. URL: http://4cio.activetextbook.com/active_textbooks/34#page642
11. Хлебенских Л. В., Зубкова М. А., Саукова Т. Ю. Автоматизация производства в современном мире // Молодой ученый. 2017. № 16 (150). С. 308–311. URL: <https://moluch.ru/archive/150/42390/>
12. McConnel, Steve. Code Complete: A Practical Handdook of Software Construction. NewYork, MicrosoftPress, 2004. 889 p.
13. Фаулер, М., Бек, К., Брант, Д., Опдаик, У., Робертс, Д. Рефакторинг: улучшение проекта. СПб.: «Диалектика», 2019. 448 с. ISBN 978-5-9909445-1-0.
14. Макконнелл С. Совершенный код. Мастер-класс / Пер. с англ. М.: Издательство «Русская редакция», 2010. 896 с.
15. McConnel, Steve. Software Estimation: Demystifying the Black Art (Developer Best Practices). NewYork, MicrosoftPress, 2006. 610 p.
16. Шатохин А. В. Информационно-сопроводительная сеть – новый подход к эксплуатации гидроакустического вооружения // Национальная оборона. 2020. № 1 (82). С. 62–67.
17. Коротков А. В., Кристальный Б. В., Курносов И. Н. Государственная политика Российской Федерации в области развития информационного общества. М.: ООО «Трейн», 2007. 472 с. ISBN 978-5-903652-01-3.
18. Потапычев С. Н., Ивакин Я. А. Использование геопространственных данных для интеллектуальной поддержки принятия диспетчерских решений // Вестник СПбГУТиД. Серия 1. Естественные и технические науки. 2018. № 2. С. 24–32.
19. Шатохин А. В., Ивакин Я. А., Нештенко В. С. Координирование услуг предприятий морского приборостроения в интересах системы эксплуатации гидроакустического вооружения ВМФ // Морской сборник. 2020. № 11. С. 39–47.
20. Шатохин А. В., Ивакин Я. А. Современный подход к участию предприятий морского приборостроения в поддержании технической готовности гидроакустического вооружения ВМФ // Морская радиоэлектроника. 2020. № 4 (21). С. 56–67.

References

1. Ivakin Y. A., Potapychev 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. Vol. 11. No 3. pp. 448–460 (in Russian). doi: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-448-460.



2. Potapychev S. N., Ivakin Ya. A. Geohronologicheskij treking – specializirovannyj GIS-instrumentarij istoricheskogo issledovaniya gipotez // ZHurnal «Istoricheskaya informatika. Informacionnye tekhnologii i matematicheskie metody v istoricheskikh issledovaniyah i obrazovanii». 2016. № 1-2. S. 3–11 (in Russian).
3. Ivakin Y. A., Potapychev 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. Vol. 11. No 2. pp. 452–461. (in Russian). doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-452-461.
4. 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 Russian). doi: 10.31854/1813-324X2020-6-1-86-93.
5. Ivakin Y., Potapychev S.: Information Technology of Research of the Features of the Use of Products of Hydroacoustic Equipment Based on Geochronological Tracking // Telecom IT. 2020. Vol. 8. Iss. 2. pp. 109-119 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-2-109-119.
6. 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, GeoS 2015. 2015. pp. 88–108.
7. Sovetov B. YA., YAKovlev S. A. Modelirovanie sistem. 7-e izd. Moskva: Izdatel'stvo YUrajt, 2019. 343 s. (in Russian).
8. Yusupov R. M., Zabolotskij V. P. Konceptual'nye i nauchno-metodologicheskie osnovy informatizacii. SPb.: Nauka, 2009. 541 s. (in Russian).
9. Sovetov B. Ya., Cekhanovskij V. V. Informacionnye tekhnologii. 6-e izd., pererab. Moskva: Izdatel'stvo YUrajt, 2016. 263 s. (in Russian).
10. Shmid A. V. Revolyuciya v oblasti filosofii i tekhnologiyah prinyatiya korporativnyh reshenij. URL: http://4cio.activetextbook.com/active_textbooks/34#page642 (in Russian).
11. Hlebenskih L. V., Zubkova M. A., Saukova T. Yu. Avtomatizaciya proizvodstva v sovremennom mire // Young Scientist. 2017. No. 16 (150). pp. 308–311. URL: <https://moluch.ru/archive/150/42390/> (in Russian).
12. McConnel, Steve. Code Complete: A Practical Handdook of Software Construction. NewYork, MicrosoftPress, 2004. 889 p.
13. Fowler M. Refactoring: improving the design of existing code. – Addison-Wesley Professional, 2018. ISBN 978-0-201-48567-7.
14. McConnell S. Code complete. – Pearson Education, 2004.
15. McConnel, Steve. Software Estimation: Demystifying the Black Art (Developer Best Practices). NewYork, MicrosoftPress, 2006. 610 p.
16. Shatohin A. V. Informacionno-soprovoditel'naya set' – novyj podhod k ekspluatácii gidroakusticheskogo vooruzheniya // Nacional'naya oborona. 2020. № 1 (82). S. 62–67 (in Russian).
17. Korotkov A. V., Kristal'nyj B. V., Kurnosov I. N. Gosudarstvennaya politika Rossijskoj Federacii v oblasti razvitiya informacionnogo obshchestva. M.: OOO «Trejn», 2007. 472 s. (in Russian). ISBN 978-5-903652-01-3.
18. Potapychev S. N., Ivakin Y. A. Using geophysical data for intelligent support of acceptance of control board decisions // Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical science. 2018. No. 2. pp. 24–32 (in Russian).
19. Shatohin A., Ivakin Ya., Potapychev S. Coordination of sea appliance manufacturing services // Morskoy sbornik. 2020. No. 2. pp. 39–47 (in Russian).
20. Shatohin A., Ivakin Ya. A Modern approach to the participation of marine instrumentation enterprises in maintaining the technical readiness of the Russian navy's hydroacoustic weapons // Marine Radio electronics. 2020. No. 4 (21). pp. 56–67 (in Russian).

**Ивакин Ян Альбертович**

доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник СПИИРАН Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук; АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР», ivakin@oogis.ru

Ivakin Yan A.

Doctor of engineering sciences, professor, leading researcher, SPIIRAS, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Concern OCEANPRIBOR JSC, ivakin@oogis.ru

Потапычев Сергей Николаевич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник СПИИРАН Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук; АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР», potapychev@mail.ru

Potapychev Sergei N.

Candidate of engineering sciences, senior researcher, SPIIRAS, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; Concern OCEANPRIBOR JSC, potapychev@mail.ru

Елагин Василий Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, elagin.vas@gmail.ru

Elagin Vasilij S.

Candidate of engineering sciences, docent, associate professor, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, elagin.vas@gmail.ru