

STATISTICAL ROBUSTNESS SUPPORT OF RETROSPECTIVE SHIPS USE RESEARCH BASED ON THE GEOCHRONOLOGICAL TRACKING

Y. A. Ivakin^{1,2}, S. N. Potapichev^{1,2}, A. E. Pelevin³

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

² — Concern OCEANPRIBOR, JSC, St. Petersburg, Russian Federation

³ — State Research Center of the Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, JSC,
St. Petersburg, Russian Federation

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 networks, transportation logistics, analyzing the facts of population migration and movements of individual historical figures. Dispatching for geospatial processes of maritime transport with implementation of geochronological tracking tools is tightly related with completion of more developed model of data processing in the automated vessel traffic control system. Geochronological tracking is an effective information technology for digital cartographic spatial data sets processing. Software component of geochronological tracking is becoming one of the most popular GIS-integrated applications. A procedure based on the geochronological tracking for statistical verification of research hypotheses about robust trends in the development of various spatiotemporal processes has been developed. 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 retrospective study results based on the geochronological tracking depends on the sufficiency of the considered initial data on the movements of the objects under study. The analysis of this dependence and the development of an algorithm for assessing the specified robustness (or significance) are considered in the paper. The paper is dedicated to the thorough consideration of this feature.

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.

For citation:

Ivakin, Yan A., Sergei N. Potapichev, and Alexander E. Pelevin. "Statistical robustness support of retrospective ships use research based on the geochronological tracking." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 184–196. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-184-196.

УДК 681.1.003

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУДОВ НА ОСНОВЕ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКОГО ТРЕКИНГА

Я. А. Ивакин^{1,2}, С. Н. Потапычев^{1,2}, А. Е. Пелевин³

¹ — Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

³ — ГНИЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предметом исследования в работе является геохронологический трекинг, получивший широкое признание как соответствующий научно-методический инструментальный и эффективная информационная технология ретроспективных исследований использования судов в интересах обоснования и рационализации маршрутных сетей водного транспорта, логистики перевозок, а также анализа фактов переме-

щений отдельных объектов. Отмечается, что в настоящее время процедура геохронологического трекинга используется для анализа логистики современных транспортно-поставочных сетей, оптимизации транспортных потоков, систем диспетчеризации водного и других видов транспорта. Ретроспективные исследования процессов использования судов и других динамических объектов водного транспорта являются основой для обоснованного выстраивания соответствующих маршрутных сетей и логистики перевозок, а также одним из наиболее популярных пользовательских приложений в интегрируемых пакетах прикладных программ геоинформационных систем становятся программные средства геохронотрекинга. На базе геохронотрекинга разработана процедура статистической проверки исследовательских гипотез об устойчивых тенденциях в развитии различных пространственно-временных процессов. Отмечается надежность и достоверность принятия той или иной гипотезы в рамках ретроспективного исследования, определяемая представительностью (репрезентативностью) объема исходных данных о географических перемещениях, рассматриваемых как выборка из генеральной совокупности. При этом статистическая значимость (устойчивость) результатов ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга зависит от достаточности учтенных исходных данных о перемещениях исследуемых объектов. В работе выполнен анализ указанной зависимости и выработан алгоритм оценки указанной устойчивости (значимости), а также определены основные параметры и условия оптимальности рассматриваемого алгоритма, учтены результаты последних разработок по тематике геохронологического трекинга.

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

Для цитирования:

Ивакин Я. А. Обеспечение статистической устойчивости ретроспективных исследований использования судов на основе геохронологического трекинга / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев, А. Е. Пелевин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 184–196. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-184-196.

Введение (Introduction)

Ретроспективный статистически-значимый анализ перемещений судов в географическом пространстве является базой 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 использования судов в интересах обоснования и рационализации маршрутных сетей водного транспорта, логистики перевозок, анализа фактов перемещений отдельных специализированных объектов и др. Основные принципы, процедуры и алгоритмы геохронологического трекинга описаны в работах [1]–[5]. Его математическая сущность сводится к поиску и оценке статистической значимости изоморфизма соответствующих графов. В частности, 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 судна (класса судов) 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 предмет обеспечения статистической устойчивости (значимости) выводов данных исследований.

Разработка и обоснование математико-статистического аппарата и методики определения необходимого и достаточного (релевантного) числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к итоговым результатам осуществляются при помощи 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 в процессе принятия итоговых решений.

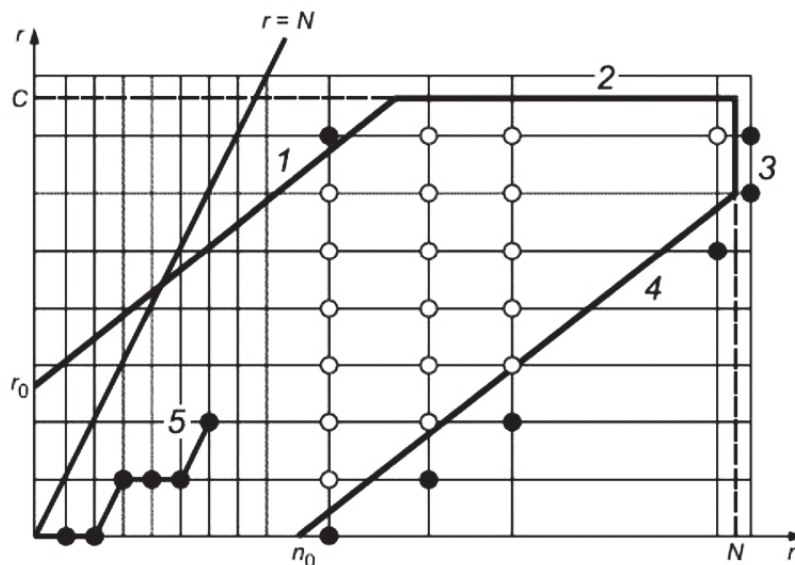
Детализация указанных шагов позволяет раскрыть суть методики определения необходимого и достаточного числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований на основе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к результатам и выводам исследования в целом.

Методы и материалы (Methods and Materials)

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, равное единице. Очевидно, что размер генеральной совокупности при данной постановке теоретически неограничен, однако на практике объем данных, положенных в основу геохронотрека, всегда конечен и ограничен. Тогда частная задача определения релевантного, т. е. необходимого и достаточного, объема выборки из генеральной совокупности данных о перемещениях в географическом пространстве в течение определенного промежутка 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 построение 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, таких как [6]–[10].

Суть теоретического решения данной задачи заключается в построении (оценке) доверительного интервала 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. В работах [7], [8], [10] решение указанной частной математической задачи сведено к построению конкретизированных эллипсов рассеивания выборочных значений исследуемых параметров применительно к назначаемым величинам доверительной вероятности.

Очевидно, что в условиях гехронологического трекинга, т. е. дискретного прироста объема значений данных по итогам разовых испытаний, а также объективной ограниченности генеральной совокупности, в силу конечности учитываемых данных о географических перемещениях анализируемых объектов, сводная теоретическая картина решения указанной частной математической задачи может быть преобразована к дискретному варианту представления. В частности, отношение числа r выбросов в экспериментально полученных значениях параметра вне обоснованного эллипса среднеквадратического отклонения к общему числу единичных испытаний (наблюдений) эксперимента N в рамках эксперимента позволяет формализовать решение указанной частной задачи (для дискретного варианта) в виде, приведенном на рисунке. Так, фигура, ограниченная линиями 1–2–3–4, является дискретной интерпретацией эллипса среднеквадратического отклонения, определяемого доверительным интервалом и интервалом допуска, соответствующими задаваемой доверительной вероятности правильного принятия решения в ретроспективном исследовании на базе геохронотрекинга. Соответственно линии 1 и 2 обозначают границы зоны, за которыми регистрируемые экспериментальные значения параметра нельзя считать соответствующими теоретическому значению. Линии 3 и 4 обозначают границы зоны избыточного числа единичных испытаний при обоснованном принятии решения с заданной доверительной вероятностью того, что принимаемые значения параметра геохронотрека следует считать соответствующими теоретическому значению. Линия 5 обозначает дискретный процесс накопительного учета выбросов в экспериментально полученных 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 полученных значениях исследуемого параметра не может попадать в область, расположенную на рисунке выше границы $r = N$.



Интерпретация наблюдаемых выборочных значений исследуемого параметра при накоплении его статистики в ходе геохронотрекинга

Приведенная графическая 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. Т. е. релевантным является такое неизбыточное 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 ее в рамках подходов к определению надежности статистических выводов в рамках эксперимента на базе ГИС.

Результаты (Results)

В общенаучном смысле надежность выводов исследования — это свойство такого объекта инфосферы, как вновь полученное знание, позволяющее устойчиво и неизменно вырабатывать функционально пригодные и достоверные результаты при заданных начальных данных и входных условиях [11]. Применительно к условиям проведения ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга показателем количественной меры 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 выполнения релевантного (прежде всего достаточного) числа элементарных испытаний.

Описанный в работе вариант рассмотрения статистической сущности проводимого исследования позволил интерпретировать ее в рамках стандартизированного аппарата обеспечения и расчета показателей надежности в технике [12]. Указанный аппарат разработан, апробирован и рекомендован к применению в рамках действующей национальной системы нормативно-технического регулирования и 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 ходе 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 о том, что единичные испытания являются статистически независимыми и значение доверительной вероятности истинности получаемых выводов является постоянным.

На основе результатов полного объема испытаний N по каждой из исследуемых характеристик геохронотрека принимается одно из следующих альтернативных исследовательских решений:

1. Наблюдаемое (регистрируемое) и осредненное по N единичным актам испытаний значение численного параметра (качественного проявления) геохронотрека принимается истинным с доверительной вероятностью P (принятие значения как истинного с определенным уровнем доверия).
2. Наблюдаемое (регистрируемое) и осредненное по N единичным актам испытаний значение численного параметра (качественного проявления) геохронотрека не принимается истинным (отклонение значения как истинного с определенным уровнем доверия).

В рамках геохронотрекинга вторая альтернатива 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 необходимо изменение постановки организации ретроспективного исследования.

Применительно к методике определения необходимого и достаточного (релевантного) 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:

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

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

$$Q_\beta = 1 - P_\beta. \quad (2)$$

Наличие заданных параметров ретроспективного исследования (1) и (2) на базе геохронотрекинга, согласно [13], определяет так называемый *разрешающий коэффициент* D , равный отношению значений дополнений до единицы уровня вероятности доверительного принятия наблюдаемого значения в исследовании к уровню вероятности отклонения:

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

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

n — учитываемое апостериорное число фактов корректной реализации единичных испытаний, т. е. учитываемых перемещений объектов, артефактов и др., 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 из числа учитываемых перемещений объектов, артефактов и др.

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

$$N = n + r; \quad (4)$$

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 и 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 , т. е. объема учитываемых перемещений объектов или артефактов в составе геохронотрека, 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 (релевантного) числа разовых испытаний (учитываемых перемещений объектов или артефактов) в ходе ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к итоговым результатам включает три основных обобщенных этапа:

1-й этап — подготовка и подбор исходных данных для расчета необходимого и достаточного числа единичных испытаний в ходе геохронотрекинга ретроспективного исследования;

2-й этап — расчет и оценка доверительного интервала для принятия наблюдаемого значения, а также результата каждого единичного испытания (перемещения) при назначенных (априорных) значениях риска (или доверительной вероятности);

3-й этап — принятие итогового исследовательского решения по релевантному числу (объему) единичных испытаний.

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

1-й этап — подготовка и подбор исходных данных для определения объема испытаний — необходимо осуществлять в приведенной последовательности:

1. 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.

2. 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_β 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 допускаются 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.

3. 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 β или больше него. В настоящей методике, на основании принципа равной вероятности несмещенных статистических ошибок, принято $\alpha = \beta$. На основании этого допущения в табл. 1 и 2 приняты значения $\alpha = \beta$. Значения рисков, в соответствии с [14], рекомендуется выбирать из ряда: 0,05; 0,1; 0,2; 0,3. Согласно [14], 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, т. е. объема учитываемых перемещений объектов или артефактов в составе геохронотрека, приведены в табл. 1.

2-й этап — расчет и оценка доверительного интервала для принятия значений и результатов каждого единичного перемещения при назначенных (априорных) значениях риска (или доверительной вероятности) — необходимо осуществлять в указанной далее последовательности:

1. В силу несмещенного характера оценки P_α относительно значения P_3 в качестве точечной оценки для апостериорной доверительной вероятности истинности частного результата ретроспективного исследования значения параметра (качественного проявления) геохронотрека принимается частота P , определяемая в виде

$$P = n / N. \quad (5)$$

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	0,99–0,90 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

2. Объем единичных испытаний, т. е. учитываемых перемещений объектов или артефактов в составе геохронотрека 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], [12], [14].

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

$$I = \frac{P + \frac{D}{2N} \pm D \sqrt{P \frac{1-P}{N} + \frac{D^2}{4N^2}}}{1 + \frac{D^2}{N}}. \quad (6)$$

4. Соотношения (5), (6) позволяют 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, наблюдаемого в процессе геохронотрекинга (c), с исходными данными, указанными в табл. 1. Принимая значение уровня вероятности P_α качественного проявления геохронотрека за априорно соответствующее целям подтверждения уровня требуемой доверительной вероятности обеспечение надежности результатов в комплексном ретроспективном исследовании P_3 , заданное для всей гаммы исследований, определены соотношения ранее указанных значений

испытаний для подтверждения искомых характеристик геохронотрекинга. Некоторые результаты этого определения приведены в табл. 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

3-й этап — принятие исследовательского решения по релевантному числу (объему) единичных испытаний (учитываемых перемещений объектов (артефактов) в геохронотреке) — осуществляется при помощи выполнения следующих логических шагов:

1. На основании трактовки смыслового значения дуг геохронотрека и накопительного характера учета единичных перемещений выполняется определение и предметная интерпретация исходных данных для расчета релевантного объема учитываемых перемещений. При этом рекомендуется придерживаться соотношений исходных данных, приведенных в табл. 1.

2. По выбранным параметрам исходных данных осуществляется вход в табл. 2 настоящей методики, на основе которой появляется возможность определить общее (суммарное) число единичных испытаний (объем учитываемых перемещений объектов (артефактов) в геохронотреке) 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 первой альтернативы. При этом наблюдаемое и осредненное по N единичным актам испытаний-перемещений значение параметра (качественного проявления) геохронотрека принимается истинным с доверительной вероятностью P . Достижение или превышение текущего значения c над табулированным значением означает факт принятия второго альтернативного исследовательского решения, при котором наблюдаемое и осредненное по N единичным актам испытаний-перемещений значения параметра (качественного проявления) геохронотрека не принимаются истинными.

3. Для многоэтапных ретроспективных исследований оценка уровня доверия к апостериорным значениям параметров геохронотреков проводится применительно к каждому этапу 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. Суть задачи указанного расчета детально раскрыта в работах [15], [16].

Обсуждение (Discussion)

Решение задачи достижения необходимой статистической значимости (устойчивости) результатов ретроспективного исследования использования судов 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 ее принятия определен объем (релевантное количество) 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 (релевантного) числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований на основе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к результатам и выводам исследования связаны с ее алгоритмизацией и автоматизацией, интеграцией в состав современных геоинформационных систем, ориентированных на прикладные исследования и решение пространственно-временных аналитических задач в смежных областях [17]–[21].

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, проведенное исследование 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 (Conclusion)

Разработка математико-статистического аппарата и методики определения необходимого и достаточного (релевантного) числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований использования судов на базе геохронотрекинга позволит развить соответствующий научно-методический инструментарий и соответствующие информационные технологии ретроспективных и исторических геопространственных исследований в интересах развития и оптимизации транспортных сетей, логистики, а также систем поддержки диспетчерских служб. Также очевидна перспективность работ в области развития прикладной алгоритмики геохронотрекинга как такового. К указанным работам следует отнести внедрение и интеграцию соответствующих информационных технологий искусственной интеллектуальности, интеграции и слияния информации, виртуализации и других механизмов в соответствующие геоинформационные приложения.

Благодарности (Acknowledgements)

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивакин Я. А. Рациональный алгоритм проверки гипотез ретроспективных исследований использования водного транспорта на базе геохронологического трекинга / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев, Р. Я. Ивакин // 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. Ивакин Я. А. Геохронологический трекинг — специализированный ГИС-инструментарий исторического исследования / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев // Историческая информатика. Информационные

технологии и математические методы в исторических исследованиях и образовании. — 2016. — № 1–2 (15–16). — С. 3–11.

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

5. *Ивакин Я. А.* Информационная технология исследований особенностей применения изделий гидроакустической техники на основе геохронологического трекинга / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2020. — Т. 8. — № 2. — С. 109–119. DOI: 10.31854/2307-1303-2020-8-2-109-119.

6. *Codescu M.* DO-ROAM: Activity-Oriented Search and Navigation with OpenStreetMap / M. Codescu, G. Horsinka, O. Kutz, T. Mossakowski, R. Rau // International Conference on GeoSpatial Semantics. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. — Pp. 88–107. DOI: 10.1007/978-3-642-20630-6_6.

7. Sigma Knowledge Engineering Environment [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://sigmakee.sourceforge.net> (дата обращения: 01.01.2020).

8. *Советов Б. Я.* Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. — 7-е изд. — М.: ООО «Издательство Юрайт», 2019. — 343 с.

9. *Юсупов Р. М.* Концептуальные и научно-методологические основы информатизации / Р. М. Юсупов, В. П. Заболотский. — СПб.: Наука, 2009. — 541 с.

10. *Советов Б. Я.* Информационные технологии / Б. Я. Советов, В. В. Цехановский. — 6-е изд., перераб. — М.: ООО «Издательство Юрайт», 2016. — 263 с.

11. *Шмид А. В.* Big Data: Революция в области философии и технологиях принятия корпоративных решений [Электронный ресурс] / А. В. Шмид. — Режим доступа: <http://docplayer.ru/26545900-Big-data-revoluciya-v-oblasti-filosofii-i-tehnologiy-prinyatiya-korporativnyh-resheniy.html> (дата обращения: 19.02.2021).

12. *Хлебенских Л. В.* Автоматизация производства в современном мире / Л. В. Хлебенских, М. А. Зубкова, Т. Ю. Саукова // Молодой ученый. — 2017. — № 16 (150). — С. 308–311.

13. *McConnel S.* Code Complete: A Practical Handdook of Software Construction / S. McConnel. — NewYork: MicrosoftPress, 2004. — 889 p.

14. *Фаулер М.* Рефакторинг: улучшение проекта существующего кода / М. Фаулер [и др.]. — СПб.: Диалектика, 2019. — 448 с.

15. *Макконнелл С.* Совершенный код. Мастер-класс / С. Макконнелл; пер. с англ. — М.: Изд-во «Русская редакция», 2010. — 896 с.

16. *McConnel S.* Software Estimation: Demystifying the Black Art (Developer Best Practices) / S. McConnel. — NewYork, Microsoft Press, 2006. — 610 p.

17. *Шатохин А. В.* Информационно-сопроводительная сеть — новый подход к эксплуатации гидроакустического вооружения / А. В. Шатохин // Национальная оборона. — 2020. — № 1 (28). — С. 81–88.

18. *Коротков А. В.* Государственная политика Российской Федерации в области развития информационного общества / А. В. Коротков, Б. В. Кристальный, И. Н. Курносов. — М.: ООО «Трейн», 2007. — 472 с.

19. *Потапычев С. Н.* Использование геопространственных данных для интеллектуальной поддержки принятия диспетчерских решений / С. Н. Потапычев, Я. А. Ивакин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. — 2018. — № 2. — С. 24–31.

20. *Шатохин А. В.* Координирование сервисных услуг предприятий морского приборостроения / А. В. Шатохин, Ян. А. Ивакин, В. С. Нештенко // Морской сборник. — 2020. — № 11 (2084). — С. 39–47.

21. *Шатохин А. В.* Современный подход к участию предприятий морского приборостроения в поддержании технической готовности гидроакустического вооружения ВМФ / А. В. Шатохин, Я. А. Ивакин // Морская радиоэлектроника. — 2020. — № 2 (72). — С. 2–9.

REFERENCES

1. Ivakin, Yan A., Sergei N. Potapychiev, and Roman Y. Ivakin. "Optimal algorithm of hypotheses testing at the ship use research based on the geochronological tracking." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.3 (2019): 448–460. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-448-460.
2. Ivakin, Yan A., and Sergey N. Potapichev. "Geochronology tracking — specialized GIS-tool for history researches." *Istoricheskaya informatika. Informatsionnye tekhnologii i matematicheskie metody v istoricheskikh issledovaniyakh i obrazovanii* 1–2 (15–16) (2016): 3–11.
3. Ivakin, Yan A., and Sergei N. Potapichev. "Information technology of geochronological tracking for hypotheses testing in research of ship use." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.2 (2018): 452–461. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-452-461.
4. Ivakin, R. Y., Y. A. Ivakin, and S. N. Potapichev. "Refinement algorithm of hypotheses testing research based on geochronological tracking." *Proceedings of Telecommunication Universities* 6.1 (2020): 86–93. DOI: 10.31854/1813–324X-2020-6-1-86-93.
5. Ivakin, Y., and S. Potapychiev. "Information technology of research of the features of the use of products of hydroacoustic equipment based on geochronological tracking." *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii* 8.2 (2020): 109–119. DOI: 10.31854/2307-1303-2020-8-2-109-119.
6. Codescu, Mihai, Gregor Horsinka, Oliver Kutz, Till Mossakowski, and Rafaela Rau. "DO-ROAM: Activity-oriented search and navigation with OpenStreetMap." *International Conference on GeoSpatial Semantics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. 88–107. DOI: 10.1007/978-3-642-20630-6_6.
7. Sigma Knowledge Engineering Environment. Web. 1 Jan. 2020 <<http://sigmakee.sourceforge.net>>.
8. Sovetov, B. Ya., and S. A. Yakovlev. *Modelirovanie sistem*. 7th ed. M.: Izdatel'stvo Yurait, 2019.
9. Yusupov, R. M., and V. P. Zabolotskii. *Kontseptual'nye i nauchno-metodologicheskie osnovy informatizatsii*. SPb.: Nauka, 2009.
10. Sovetov, B. Ya., and V. V. Tsekhanovskii. *Informatsionnye tekhnologii*. 6th ed. M.: Izdatel'stvo Yurait, 2016.
11. Shmid, A. V. Big Data: Revolyutsiya v oblasti filosofii i tekhnologiyakh prinyatiya korporativnykh reshenii. Web. 19 Feb. 2021 <<http://docplayer.ru/26545900-Big-data-revolyuciya-v-oblasti-filosofii-i-tehnologiy-prinyatiya-korporativnyh-resheniy.html>>.
12. Khlebenskikh, L. V., M. A. Zubkova, and T. Yu. Saukova. "Avtomatizatsiya proizvodstva v sovremennom mire." *Molodoi uchenyi* 16(150) (2017): 308–311.
13. McConnell, Steve. *Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction*. New York: Microsoft Press, 2004.
14. Fowler, Martin, Kent Beck, John Brant, William Opdyke, and Don Roberts. *Refactoring: Improving the Design of Existing Code*. Addison-Wesley Professional, 1999.
15. McConnell, Steve. *Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction*. Second Edition. Microsoft Press, 2004.
16. McConnell, Steve. *Software Estimation: Demystifying the Black Art (Developer Best Practices)*. New York, Microsoft Press, 2006.
17. Shatokhin, A. V. "Informatsionno-soprovoditel'naya set' — novyi podkhod k ekspluatatsii gidroakusticheskogo vooruzheniya." *Natsional'naya oborona* 1(28) (2020): 81–88.
18. Korotkov, A. V., B. V. Kristal'nyi, and I. N. Kurnosov. *Gosudarstvennaya politika Rossiiskoi Federatsii v oblasti razvitiya informatsionnogo obshchestva*. M.: ООО «Трейн», 2007.
19. Potapychiev, S. N., and Ya. A. Ivakin. "Using geophysical data for intelligent support of acceptance of control board decisions." *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series I. Natural and technical science* 2 (2018): 24–31.
20. Shatohin, A., Ya. Ivakin, and V. Neshtenko. "Coordination of sea appliance manufacturing services." *Morskoi sbornik* 11(2084) (2020): 39–47.
21. Shatokhin, A. V., and Ya. A. Ivakin. "A modern approach to the participation of marine instrumentation enterprises in maintaining the technical readiness of the Russian navy's hydroacoustic weapons." *Morskoi sbornik* 2(72) (2020): 2–9.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ивакин Ян Альбертович —

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский Центр Российской академии
наук (СПб ФИЦ РАН)
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
14-я линия В. О., 39
АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР»
198226, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Чкаловский пр., 46
e-mail: yan_a_ivakin@mail.ru

Потапычев Сергей Николаевич —

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский Центр Российской академии
наук (СПб ФИЦ РАН)
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
14-я линия В. О., 39
АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР»
198226, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Чкаловский пр., д. 46
e-mail: potapychev@mail.ru

Пелевин Александр Евгеньевич —

доктор технических наук, профессор,
начальник сектора
ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
197046, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург,
ул. Малая Посадская, 30
e-mail: aepelevin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivakin, Yan A. —

Dr. of Technical Sciences, professor,
leading researcher
St. Petersburg Federal Research Center
of the Russian Academy of Sciences
39 14th Line V. O., St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
Concern OCEANPRIBOR, JSC
46 Chekalovskiy Ave.,
St. Petersburg, 198226,
Russian Federation
e-mail: yan_a_ivakin@mail.ru

Potapychev, Sergei N. —

PhD,
senior researcher
St. Petersburg Federal Research Center
of the Russian Academy of Sciences
39 14th Line V. O.,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation
Concern OCEANPRIBOR, JSC
46 Chekalovskiy Av.,
St. Petersburg, 198226,
Russian Federation
e-mail: potapychev@mail.ru

Pelevin, Alexander E. —

Dr. of Technical Sciences, professor,
head of sector
State Research Center of the Russian Federation —
Concern CSRI Elektropribor, JSC
30 Malaya Posadskaya Str.,
St. Petersburg, 197046, Russian Federation
e-mail: aepelevin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2021 г.

Received: February 20, 2021.