

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ СОЧЕТАНИЙ ОБСТОЯТЕЛЬСТВ В УПРАВЛЕНИИ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Е. В. Варюхина\*, В. В. Клочков\*\*

\*\*\*ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н. Е. Жуковского», г. Жуковский,  
\*\*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

\*✉ e.varyukhina@yandex.ru, \*\*✉ vlad\_klochkov@mail.ru

**Аннотация.** Предложен подход к оценке эффективности интеллектуальных технологий выявления опасных сочетаний обстоятельств в авиатранспортных системах. Формализовано влияние таких технологий на безопасность полетов и общую стоимость владения авиационной техникой. Разработана простая модель оценки эффективности внедрения интеллектуальных технологий (для выявления единичной скрытой проблемы). Качественный анализ этой модели позволил выявить роль различных ее параметров – таких как численность и налет парка авиационной техники, длительность и стоимость устранения системной проблемы, ущерб от событий различной степени серьезности. Также предложен подход к моделированию процессов выявления и устранения опасных сочетаний обстоятельств на протяжении жизненного цикла авиатранспортных систем с учетом эффекта обучения. Этот эффект состоит в том, что при накоплении опыта функционирования авиатранспортной системы и постепенном устранении скрытых системных проблем интенсивность их проявления со временем сокращается. Основным параметром, характеризующим интеллектуальные технологии выявления скрытых закономерностей в обстоятельствах инцидентов, является показатель относительного ускорения их выявления. Оба вида моделей позволяют в конечном счете оценить зависимость ожидаемых потерь от данного обобщающего параметра. Также важны зависимости результатов модельных расчетов от прочих параметров предложенных моделей, в том числе от длительности и стоимости устранения выявленных проблем, ущерба от различных событий, численности и налета парка авиационной техники. Показано, что технологии интеллектуального анализа данных максимально эффективны в авиатранспортной системе при малой численности парка воздушных судов и при низких интенсивностях их эксплуатации.

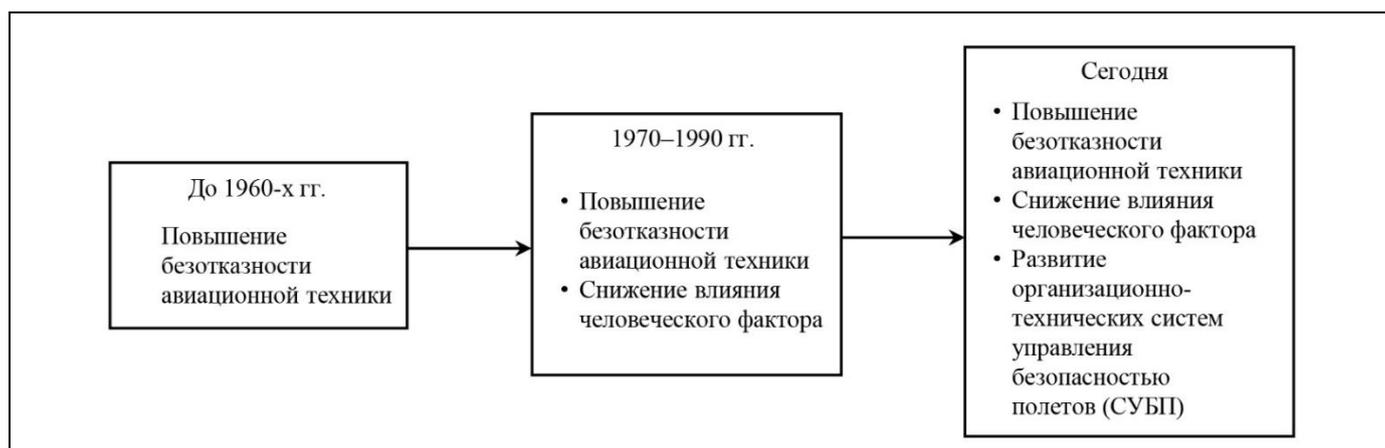
**Ключевые слова:** безопасность полетов, скрытые опасности, интеллектуальные технологии.

## ВВЕДЕНИЕ

Эволюция подходов к управлению безопасностью полетов (БП), отраженная не только в научных работах, но и в поэтапном изменении руководящих документов ИКАО, представляет собой перенос фокуса внимания с повышения безотказности авиационной техники (АТ) в 1950–1960-х гг. к снижению влияния человеческого фактора в 1970–

1980-е гг. (см. рисунок) Приблизительно с начала 2010-х гг., помимо надежности АТ и человеческого фактора, учитываются организационные факторы и в целом сложность больших организационно-технических систем [1, 2].

Работы, касающиеся повышения БП путем развития организационных аспектов, активно ведутся рядом ученых. Например, в статьях [3, 4] рассматривается применение модели «дерева развития



#### Эволюция подходов к обеспечению безопасности полетов в гражданской авиации

авиационного события» для превентивного управления риском. В работе [5] для учета информации из добровольных сообщений сотрудников, связанных со спецификой деятельности конкретной авиакомпании, применение модели «дерева развития авиационного события» дополняется байесовским подходом. Разрабатываются системы прогнозирования авиационных происшествий, основанные на описанных выше методах [6].

В работах [7–9] предлагается рассматривать аварии как следствия критических сочетаний событий, которые могут быть вызваны отказами воздушных судов (ВС), преднамеренными нарушениями инструкций персоналом, внешними воздействиями. Сами по себе данные события могут быть не опасны, но их совокупность может быть критичной. Используются модели деревьев событий, минимальные сечения которых рассматриваются как модели критических сочетаний событий, для которых определяют вероятности реализации тех или иных сочетаний. Разрабатываются подходы для обеспечения БП в авиатранспортных системах (АТС), которые анализируют вероятности возникновения критических сочетаний событий [10]. Проведенный в работе [11] анализ показал, что причины авиационных происшествий (АП) как следствие ошибок персонала и отказов техники имеют системный, а не случайный характер. Исследуются возможности расширения использования звукового канала для ввода и вывода информации, в том числе для систем навигации и управления самолета, а также контроля его состояния [12].

Однако АТС (которая включает в себя такие взаимодействующие элементы, как изделия АТ, объекты инфраструктуры гражданской авиации, авиационный персонал) – крупномасштабная, сложная и многосвязная система. Поэтому ее не-

возможно точно смоделировать и изначально оптимально спроектировать (с учетом критериев БП и целевой эффективности). В любой реальной АТС в той или иной степени имеют место системные проблемы обеспечения безопасности авиационной деятельности, в том числе:

- конструктивно-производственные недостатки (КПН) АТ и объектов инфраструктуры;
- системные недостатки в сфере подготовки и поддержания квалификации авиационного персонала (т. е. аналоги КПН в этой сфере);
- системные недостатки в сфере организации эксплуатации АТ и объектов инфраструктуры, организации работы авиационного персонала.

Потенциально они могут быть причинами возникновения инцидентов различной степени серьезности и АП. В то же время указанные проблемы носят системный характер и непосредственно далеко не всегда очевидны. Сначала они являются скрытыми, поскольку изначально при создании элементов АТС все-таки учитывались требования обеспечения безопасности, поэтому очевидно неэффективные конструктивные, технологические, организационные решения просто не были бы приняты. Неочевидные проблемы и противоречия в части обеспечения безопасности выявляются уже в процессе функционирования АТС, эксплуатации АТ и т. п. Опыт развития авиации и авиастроения во всем мире, опыт реальной работы по повышению безопасности авиационной деятельности свидетельствует о том, что это повышение и достигается в значительной степени благодаря постепенному выявлению и устранению скрытых проблем. Причем в идеале это выявление должно происходить по возможности не в ответ на уже реализовавшиеся опасности с последствиями серьезного уровня (реактивный принцип управления безопасностью), а наоборот, на основе превентивного ана-

лиза предпосылок к таким опасным ситуациям (проактивный принцип, более эффективный с точки зрения сохранения жизни и здоровья людей, а также с экономической точки зрения).

В 2000-е гг. происходит бурное развитие интеллектуальных технологий, нацеленных на повышение безопасности полетов. Это связано с ускоряющимся развитием интеллектуальных методов анализа данных и тенденцией повышения требуемого уровня БП. На сегодняшний день актуальными задачами, которые можно решать с помощью интеллектуальных технологий, являются следующие задачи для повышения БП:

- распознавание элементов взлетно-посадочных полос, рулежных дорожек;
- распознавание объектов в воздухе;
- обнаружение конфликтных ситуаций в воздушном движении;
- формирование индикации закабинной обстановки в кабине без остекления;
- мониторинг состояния и действий пилота;
- обработка данных для предиктивной диагностики состояния авиационной техники;
- виртуальные помощники пилота / виртуальный второй пилот / виртуальный пилот;
- задачи управления.

Интеллектуальный анализ больших массивов данных о состоянии совокупностей объектов АТС (изделий АТ, объектов инфраструктуры, авиационного персонала) позволяет обнаруживать скрытые закономерности изменения состояния, в том числе обуславливающие опасности. На внедрение таких технологий возлагают основные надежды специалисты в области управления безопасностью полетов и авиационной деятельности в целом.

Например, разработана интеллектуальная система сбора и анализа полетных данных авиационных двигателей, куда входит программный комплекс «Аналитик», используемый для оперативного анализа послеполетных параметров двигателя и его систем [13]. Как указано в данной работе, средства диагностирования технического состояния ВС требуют анализа большой базы данных и, следовательно, длительного времени на их обработку. Указанный программный комплекс позволяет значительно сократить время анализа полетной информации благодаря созданию такого инструмента, как формализованный запрос.

Американское космическое агентство (NASA) отрабатывает разработанные технологии на данных авиакомпании Southwest [14]. Так, с их помощью были найдены текстовые описания посадок в добровольных сообщениях, которые прямо не указывают на нестабильный заход на посадку, однако соответствуют ему с большой долей вероятности.

Результат исследования позволил повысить качество заходов на посадку.

Организация Smith's Aerospace с поддержкой Федерального управления гражданской авиации США (FAA) разработала технологию, основанную на алгоритмах data mining, и продемонстрировала ее применение на базе данных British Airways о происшествиях и данных из системы FDM (flight data monitoring) [15]. Использование технологии позволило выявить определенные закономерности по датам, взлетам, посадкам, экипажам и пр.

В 2017 г. было проведено исследование по прогнозированию задержек рейсов с помощью методов data mining в авиакомпаниях США [16], в 2019 г. в Индии [17].

Также исследователи занимаются задачей повышения осведомленности экипажа через слуховой канал воздействия путем создания слуховых интерфейсов [18].

Создание и внедрение таких технологий могут быть весьма дорогостоящими и – при неоптимальном применении – не принести ожидаемого повышения показателей безопасности полетов. Поэтому необходимы объективные оценки влияния новых интеллектуальных технологий на уровень безопасности полетов и целевой и экономической эффективности применения авиации.

---

## **1. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ СОЧЕТАНИЙ В АВИАТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ**

---

С формальной точки зрения описываемые здесь интеллектуальные технологии позволяют раньше выявлять скрытые системные проблемы обеспечения безопасности полетов и авиационной деятельности. Практически это достигается благодаря возможности быстрой автоматизированной обработки больших массивов данных, содержащих в себе «расширенные векторы» показателей состояния объектов, сопоставления сочетаний таких компонент этих векторов, которые ранее не подвергались анализу. Причем этот анализ проводится в режиме реального времени или близком к нему – на основе полетных данных с бортовых регистраторов или портативных устройств, или даже письменных и устных донесений авиационного персонала о различных событиях, поступающих в централизованную информационную систему (по возможности, охватывающую всю АТС), по крайней мере по окончании каждого полета. Именно в таких «расширенных векторах показателей состояния» элементов АТС могут выявляться схожие со-



четания, паттерны, которые и свидетельствуют об общности обстоятельств зарегистрированных событий (преимущественно – предпосылок к событиям с более тяжелыми последствиями). Это, в свою очередь, и является основанием для дальнейшего углубленного анализа проблем обеспечения безопасности – уже нередко не поддающегося автоматизации.

Важно, что более раннее выявление скрытых системных проблем обеспечения безопасности достигается на основе информации об инцидентах, т. е. событий с последствиями низкого уровня серьезности. Такие события не приносят непосредственного ущерба с точки зрения безопасности, но могут приносить экономический ущерб, связанный с изменением плана полета (обозначим его  $c_{инц}$ , ден. ед. в среднем на один инцидент). Обозначим их интенсивность  $\lambda_{инц}$ , инцидентов на летный час (л. ч.) или полетный цикл (п. ц.), среднегодовой налет ВС в тех же единицах обозначим  $\eta$ , л. ч. или п. ц. в год, а численность рассматриваемого парка  $N$  ВС. Таким образом, если системная проблема не будет выявлена и устранена, в среднем за период длительностью  $T$  лет таких инцидентов в рассматриваемой системе происходит

$$Q(T) = N \eta T \lambda_{инц}.$$

В то же время инциденты с низким уровнем серьезности, будучи внешними проявлениями скрытых системных проблем, могут быть предпосылками к событиям с более серьезными последствиями, вплоть до АП. В целях приближенного моделирования можно принять предположение о том, что отношение вероятности АП к вероятности инцидента ( $p_{АП}/p_{инц}$ ) сохраняется постоянным. При этом АП уже приносят ущерб с точки зрения безопасности полетов, вплоть до человеческих жертв (предположим, что он может быть выражен в некоторых единицах как  $d_{АП}$  в среднем на одно АП), а также весьма существенный экономический ущерб  $c_{АП} \gg c_{инц}$ , ден. ед. в среднем на одно происшествие.

И если ранее углубленный анализ общих обстоятельств различных событий в АТС предпринимался лишь после серии авиационных происшествий с тяжелыми последствиями (и то лишь в лучшем случае, поскольку чаще всего участники расследований авиационных происшествий и инцидентов были ограничены в детальной доступной информации и в охвате АТС, даже в масштабах одной страны), то благодаря новым информационным технологиям появляется возможность с

приемлемыми затратами времени и других ресурсов автоматически анализировать и «расширенные векторы показателей состояния» элементов АТС для менее серьезных и гораздо более частых событий – что на несколько порядков расширяет доступную статистическую базу. Благоприятные возможности для проактивного управления безопасностью открывает то обстоятельство, что массив данных об инцидентах намного обширнее, чем массив данных об авиационных происшествиях, которые в современной авиации уже относятся к редким событиям, поскольку  $(p_{АП}/p_{инц}) \ll 1$ . С учетом современных условий развития российской гражданской авиации и авиастроения такое расширение доступной эмпирической базы для анализа особенно актуально. При относительно малочисленных парках АТ, по сравнению с численностью парка крупнейших мировых авиационных держав, в российской авиации и авиастроении (что неизбежно при их автономном, автаркическом развитии) исключительно важным становится фактор ускорения обнаружения скрытых проблем. Важно подчеркнуть, что это ускорение касается изначально не столько календарного времени, сколько суммарного налета парка АТ или, еще точнее, накопленного количества предпосылок к авиационным происшествиям, по достижении которого в среднем искомые системные проблемы будут выявлены.

Можно считать, что для выявления скрытой проблемы требуется некоторая «критическая масса» однородных инцидентов с низким уровнем серьезности. Обозначим это минимально необходимое количество инцидентов  $Q_{инц}^{min}$  (разумеется, его следует понимать как ожидаемое, усредненное). Изучаемые здесь интеллектуальные технологии позволяют снизить этот порог, причем, многократно, до некоторого уровня  $Q_{инц}^{minAI} < Q_{инц}^{min}$ . Существуют конкретные детальные математические модели выявления скрытых закономерностей в больших массивах данных с учетом размерности анализируемых «векторов показателей состояния». Причем, здесь имеются в виду не конкретные методы их выявления (представляющие собой разновидности методов многомерного статистического анализа), а именно модели связи количества анализируемых событий, точности и достоверности статистических выводов, влияния на них размерности «вектора показателей состояния» и т. п.

После выявления скрытых закономерностей начинается углубленное изучение выявленных системных проблем, выработка и реализация соответствующих решений, направленных на снижение

либо вероятности появления опасных сочетаний, либо серьезности их проявлений (причем решений также системных – например, изменение конструкции АТ, принципов и программ подготовки авиационного персонала, организации эксплуатации АТ и организации работы персонала). Это может быть весьма длительным и дорогостоящим процессом, включающим в себя НИР, ОКР, комплекс практических мероприятий в сфере производства, эксплуатации АТ и др. Можно считать, что комплекс мероприятий по устранению или минимизации влияния выявленных системных проблем имеет определенную стоимость  $C_{устр}$  и длительность  $T_{устр}$ , причем его длительность выражается уже в календарном времени – в годах, а не в летных часах или полетных циклах. В то же время за период выявления и устранения скрытой проблемы успевают произойти некоторое количество инцидентов, влекущих за собой лишь экономический ущерб. Кроме того, сохраняется и возможность перерастания этих инцидентов в реальные авиационные происшествия, сопряженные не только с экономическими потерями, но также с потерей жизни и здоровья людей.

## 2. ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ СОЧЕТАНИЙ В АВИАТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Таким образом, для оценки эффективности внедрения интеллектуальных технологий выявления системных проблем обеспечения безопасности на основе анализа больших массивов данных необходимо сопоставить для исходной «критической массы» событий с низкой серьезностью и для нового ее значения, многократно уменьшенного благодаря интеллектуальному анализу больших массивов данных о состоянии объектов АТС:

- ожидаемые (за период до выявления и устранения системной проблемы) экономические затраты и потери, связанные с возникновением инцидентов разной степени серьезности;

- ожидаемые за тот же период потери жизни и здоровья людей.

Ожидаемые экономические и неэкономические потери за период моделирования можно выразить следующими формулами:

$$C(T) = C_{устр} + (N \eta \lambda_{инц} T_{устр} + Q_{инц}^{min}) \times \left( c_{инц} + \frac{P_{АП}}{P_{инц}} c_{АП} \right);$$

$$D(T) = (N \eta \lambda_{инц} T_{устр} + Q_{инц}^{min}) \frac{P_{АП}}{P_{инц}} d_{АП},$$

где  $T$  – длительность периода моделирования, лет, которая заведомо должна превосходить ожидаемые длительности выявления и устранения системной проблемы (здесь для простоты считается, что она устраняется полностью):

$$T \geq T_{устр} + \frac{Q_{инц}^{min}}{N \eta \lambda_{инц}}.$$

Внедрение интеллектуальных технологий выявления системных проблем обеспечения безопасности на основе анализа больших массивов данных позволяет уменьшить значение содержащегося в этих формулах параметра  $Q_{инц}^{min}$  до уровня  $Q_{инц}^{min AI} < Q_{инц}^{min}$  (причем предполагается, что сокращение этой «критической массы» событий окажется многократным). Зависимость ущерба, как экономического, так и неэкономического, от этого ключевого параметра – линейная, но не прямо пропорциональная, поскольку в ней присутствуют и постоянные члены, связанные с устранением системной проблемы. И с качественной точки зрения важно соотношение двух слагаемых ожидаемого времени до выявления и устранения системной проблемы – собственно ожидаемых длительностей ее выявления  $Q_{инц}^{min} / N \eta \lambda_{инц}$  и устранения  $T_{устр}$ . Если превалирует первое слагаемое, тогда основной вклад в величину ущерба вносит именно «критическая масса» инцидентов, по которым и будет выявлена системная проблема в обеспечении безопасности.

Заметим, что указанная дробь  $Q_{инц}^{min} / N \eta \lambda_{инц}$  будет при прочих равных условиях тем больше, чем ниже численность и среднегодовой налет парка АТ, а также интенсивность проявления предпосылок к авиационным происшествиям. Иначе говоря, именно в таких условиях (характерных для возможного автаркического сценария развития российской гражданской авиации и авиастроения) будут наиболее значимы и эффективны исследуемые здесь интеллектуальные технологии выявления скрытых закономерностей на основе анализа больших массивов данных об инцидентах.

Что касается абсолютного выигрыша в ожидаемых затратах и потерях, он может быть выражен в виде

$$\Delta C^{AI}(T) = C(T) - C^{AI}(T) = (Q_{инц}^{min} - Q_{инц}^{min AI}) \left( c_{инц} + \frac{P_{АП}}{P_{инц}} c_{АП} \right),$$



где  $C^{AI}(T)$  – дополнительные затраты собственно на внедрение изучаемых здесь технологий интеллектуального анализа больших массивов данных. Строго говоря, они создаются и внедряются отнюдь не для выявления единственной системной проблемы. Основа соответствующей «сквозной» интеллектуальной технологии вообще универсальна для всех отраслей экономики и видов деятельности.

На первый взгляд, абсолютный выигрыш вообще не зависит от большей части параметров предложенной модели. Однако его относительный «вес» (по отношению к начальному значению), как показано выше, зависит от соотношения ожидаемых длительностей обнаружения и устранения системных проблем до и после внедрения указанных технологий, а оно, в свою очередь, зависит от среднегодового налета и размера парка АТ, от интенсивности проявления предпосылок к авиационным происшествиям, от длительности устранения системной проблемы.

На основе введенных здесь категорий такая «внешняя» модель оценки эффективности интеллектуальных технологий повышения безопасности авиационной деятельности может быть построена и исследована в виде простых арифметических формул. Она названа здесь «внешней», поскольку собственно параметры изучаемых технологий входят в нее как исходные данные. Она оперирует результирующим параметром – достигаемым благодаря интеллектуальным технологиям сокращением «критической массы» предпосылок к АП, которой достаточно для выявления скрытой проблемы. Тем не менее даже качественный анализ такой простой модели уже позволяет выявить роль различных ее параметров – таких как численность и налет парка АТ, длительность и стоимость устранения системной проблемы, ущерб от событий различной степени серьезности.

Рассмотрим

**Пример.** Опасные сочетания событий переходят в инциденты с вероятностью 0,1. До внедрения технологии удавалось выявить опасную закономерность после того, как произошло 100 инцидентов, что соответствует тому, что произошло 1000 опасных сочетаний. После этого внедряется интеллектуальная авиационная технология выявления опасных сочетаний, которая анализирует не инциденты (по крайней мере, не только), а полетные данные. Появляется возможность выявлять опасные сочетания на основе анализа такого количества данных, в которых встречается, например, 100 опасных сочетаний (зависит от конкретной технологии). Таким образом,  $Q_{\text{инц}}^{\text{мин}} = 1000$ ,  $Q_{\text{инц}}^{\text{мин AI}} = 100$ .

Теперь сравним значение показателя эффективности технологии  $\Delta C(T)/C(T)$  при разных значениях численности парка  $N$  и среднегодового налета ВС  $\eta$ . Рассмотрим два значения численности и два значения налета. Результаты представлены в таблице.

### Расчетный пример сравнения эффективности технологии для различных парков и налетов

Показатель эффективности	Численность парка $N$ и среднегодовой налет ВС $\eta$			
	$N = 5000,$ $\eta = 3000$	$N = 100,$ $\eta = 3000$	$N = 5000,$ $\eta = 1000$	$N = 100,$ $\eta = 1000$
$\Delta C(T)/C(T)$	19 %	84 %	40 %	88 %

Таким образом, максимальное сокращение затрат на повышение БП будет достигаться при малых значениях количества ВС определенного типа (что характерно для нашей страны) и их налета.

Что касается больших парков (в мировом масштабе), в них хорошо работают вероятностные законы и просто в силу большего общего налета опасные сочетания выявляются раньше. Для больших парков технологии выявления опасных сочетаний также будут иметь эффект, однако в относительных значениях этот эффект будет меньше.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫЯВЛЕНИЯ И УСТРАНЕНИЯ ОПАСНЫХ СОЧЕТАНИЙ НА ПРОТЯЖЕНИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АВИАТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Помимо выявления и устранения (или минимизации влияния до некоторого достижимого уровня) отдельной системной проблемы в обеспечении безопасности, можно рассмотреть и долгосрочный процесс выявления и устранения таких проблем в целом. Это тем более целесообразно, поскольку дополнительные затраты на внедрение технологий интеллектуального анализа больших массивов данных  $C^{AI}(T)$ , даже применительно к авиации, скорее всего осуществляются отнюдь не в расчете на выявление и устранение единственной проблемы в области безопасности полетов.

Рассматривая обнаружение и устранение различных системных проблем обеспечения безопасности в АТС как единый длительный процесс, а не разовый акт (как в рассмотренной выше элементарной модели), можно предположить, например, что вначале обнаруживаются и устраняются наиболее значимые проблемы (создающие наибольшие угрозы для безопасности) – и потому, что они, вероятнее всего, проявятся раньше других (в силу высокой частоты проявления), и потому, что их устранение становится приоритетным (поскольку они несут угрозы наибольшего ущерба). Тогда можно рассмотреть процесс выявления и

устранения системных проблем на долгосрочных интервалах – на протяжении жизненного цикла всего технологического уклада, на базе которого построена данная АТС, – подобно процессу обучения learning-by-doing, широко известному в сфере производства сложной продукции. Можно ввести темп обучения  $\gamma$ , показывающий, насколько сильно сократится вероятность проявления системных проблем (или, например, риск их проявления, т. е. произведение вероятности на ожидаемый ущерб), к примеру, при удвоении опыта функционирования АТС. Тогда текущий – при накопленном опыте анализа инцидентов в объеме  $Q$  событий – уровень интенсивности проявления системных проблем в АТС (в расчете на единицу ее работы – на рейс, на летный час, на пассажиро- или тонно-километр) может быть выражен логарифмической формулой следующего вида:

$$\lambda_{\text{инц}}(Q) = \lambda_{\text{инц}}^{\infty} + (\lambda_{\text{инц}}^0 - \lambda_{\text{инц}}^{\infty}) (1 - \gamma)^{\log_2 \frac{Q}{Q_{\text{инц}}^{\text{min}}}}$$

Здесь  $\lambda_{\text{инц}}^0$  – интенсивность инцидентов при нулевом опыте функционирования АТС. Логарифмическая модель процесса обучения и накопления опыта фактически отражает то, что процесс устранения системных проблем, начинаясь с выявления и устранения самых значимых и весомых проблем, далее замедляется. Кроме того, введенный в эту модель «неснижаемый остаток»  $\lambda_{\text{инц}}^{\infty}$  показывает, что повышение безопасности имеет естественные пределы, обусловленные законами природы и возможностями технологий данного технологического уклада. Процесс обучения, т. е. выявления и устранения системных проблем, лишь позволяет приблизиться к этому пределу.

Что касается влияния интеллектуальных технологий выявления скрытых закономерностей, в рамках такой модели оно фактически может быть представлено как эквивалентное «ускорение» обучения, т. е. умножение накопленного опыта на некоторый постоянный коэффициент, соответствующий относительно сокращению потребного (для выявления скрытой проблемы) количества инцидентов  $Q_{\text{инц}}^{\text{min}} / Q_{\text{инц}}^{\text{min AI}}$ .

При этом, как и в модели устранения единичной системной проблемы, можно учесть задержку в устранении системных проблем обеспечения безопасности, введя лаг  $T_{\text{устр}}$  лет (или иных календарных периодов) между накоплением опыта анализа инцидентов и внедрением найденных решений в практику работы АТС.

Для обеих разновидностей моделей – выявления и устранения единичной проблемы либо про-

цесса устранения системных проблем на протяжении жизненного цикла всего технологического уклада – требуется в конечном счете оценить зависимость ожидаемых потерь (экономических и неэкономических) от основного обобщающего параметра, характеризующего интеллектуальные технологии выявления скрытых закономерностей в предпосылках к летным происшествиям – показателя относительного ускорения их выявления. Также, разумеется, важны зависимости результатов модельных расчетов от прочих параметров предложенных моделей, в том числе от длительности и стоимости устранения выявленных проблем, ущерба от различных событий, численности и налета парка АТ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Параметрический анализ показывает, что интеллектуальные технологии выявления системных проблем обеспечения безопасности на основе анализа больших массивов данных принесут наибольший эффект (наиболее сильное относительное сокращение материального и нематериального ущерба) при относительно малочисленных парках АТ, малой интенсивности ее эксплуатации и малых масштабах АТС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. Управление безопасностью полетов. – Монреаль: ИКАО, 2013. – 44 с. [Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation. Safety Management. – Montreal: ICAO, 2013. – 44 p.]
2. Руководство по управлению безопасностью полетов. Doc 9859. Издание 4. – Монреаль: ИКАО, 2018. – 300 с. [Safety Management Manual. Doc 9859. Iss. 4. – Montreal: ICAO 2018. – 182 p.]
3. Шаров В.Д., Макаров В.П. Методология применения комбинированного метода FMEA-FTA для анализа риска авиационного события // Научный вестник МГТУ ГА. – 2011. – № 174. – С. 18–24. [Sharov, V.D., Makarov, V.P. Using a Combination of FMEA – FTA Techniques in Airline Safety Risk Analysis Methodology // The Civil Aviation High Technologies (Nauchnyi Vestnik MGTU GA). – 2011. – No. 174. – P. 18–24. (In Russian)]
4. Бутов А.А., Шаров В.Д., Макаров В.П., Орлов А.И. Прогнозирование и предотвращение авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 5 (36). – С. 309–313. [Butov, A.A., Sharov, V.D., Makarov, V.P., Orlov, A.I. Aviation Accidents Forecasting and Prevention at the Organization and Performance of Flights // Vestnik of the Samara State Aerospace University. – 2012. – No. 5 (36). – P. 309–313. (In Russian)]



5. Шаров В.Д. Применение байесовского подхода для уточнения вероятностей событий в автоматизированной системе прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий // Управление большими системами. – 2013. – Вып. 43. – С. 240–253. [Sharov, V.D. Application of Bayesian Approach to Update Events' Probabilities in Automated System of Aviation Accidents Forecasting and Prevention // Large-Scale Systems Control. – 2013. – Iss. 43. – P. 240–253. (In Russian)]
6. Бутов А.А., Волков М.А., Макаров В.П. и др. Автоматизированная система прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок // Изв. Самарского науч. центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 4(2). – С. 380–385. [Butov, A.A., Volkov, M.A., Makarov, V.P., et al. The Automated System of Aviation Accidents Forecasting and Prevention at the Organization and Performance of Flights // Journal of the Samara Research Center of the Russian Academy of Sciences. – 2012. – Vol.14, no. 4 (2). – P. 380–385. (In Russian)]
7. Богомолов А.С. Анализ путей возникновения и предотвращения критических сочетаний событий в человеко-машинных системах // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика. – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 219–230. [Bogomolov, A.S. Analysis of the Ways of Occurrence and Prevention of Critical Combinations of Events in Man-Machine Systems // Saratov University News. New Series. Series Mathematics. Mechanics. Informatics. – 2017. – Vol. 17, no. 2. – P. 219–230. (In Russian)]
8. Филимонок Л.Ю. Проблема критических сочетаний событий в сложных системах // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2014. – Вып. 9 (68). – С. 241–243. [Filimonuk, L.Y. Critical Combination of Events Problem in Complex Systems // Mathematical Methods in Technique and Technologies – ММТТ. – 2014. – Iss. 9 (68). – P. 241–243. (In Russian)]
9. Новожилов Г.В., Резчиков А.Ф., Неймарк М.С. и др. Проблемы критических сочетаний событий в системе «Экипаж – Воздушное судно – Диспетчер» // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2015. – Вып. 2. – С. 10–16. [Novozhilov, G.V., Rezchikov, A.F., Neymark, M.S., et al. The Problem of Events' Critical Combination in «Crew – Airplane – Air-Traffic Controller» Systems // All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" ("Flight"). – 2015. – Iss. 2. – P. 10–16. (In Russian)]
10. Богомолов А.С., Иващенко В.А., Кушников В.А. и др. Моделирующий комплекс для анализа критических сочетаний событий в авиационных транспортных системах // Проблемы управления. – 2018. – № 1. – С. 74–79. [Bogomolov, A.S., Ivashchenko, V.A., Kushnikov, V.A., et al. Modeling Complex for Critical Events Combinations Analysis in Aviation Transport Systems // Control Sciences. – 2018. – No. 1. – P. 74–76. (In Russian)]
11. Новожилов Г.В., Резчиков А.Ф., Неймарк М.С. и др. Человеческий фактор в авиационно-транспортных системах // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2013. – № 5. – С. 3–10. [Novozhilov, G.V., Rezchikov, A.F., Neymark, M.S., et al. Human Factor in Aviation Transport Systems // All-Russian Scientific-Technical Journal «Polyot» («Flight»). – 2013. – No. 5. – P. 3–10. (In Russian)]
12. Носуленко И. А., Басюл И. А., Зыбин Е. Ю., Леликов М. А. Пространственное разделение информации в самолетном переговорном устройстве // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – №7 (224). – С. 109–119. [Nosulenko, V.N., Basul, I. A., Zybin, E. Yu., Lelikov, M.A. Spatial Separation of Information in the Aircraft Communication Device // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. – 2021. – No. 7 (224). – P. 109–119. (In Russian)]
13. Добрянский Г.В., Мельникова Н.С., Мовила В.Н. и др. Интеллектуальная система сбора и анализа полетных данных авиационного двигателя // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2022. – Т. 26. – № 3 (97). – С. 100–112. [Dobryanskiy, G.V., Melnikova, N.S., Movila, V.N., et al. Intelligent System for Collecting and Analyzing Aircraft Engine Flight Data // Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University. – 2022. – Vol. 26, no. 3 (97). – P. 100–112. (In Russian)]
14. Data Mining Tools Make Flights Safer, More Efficient // NASA Spinoff. – 2013. – URL: [https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2013/t\\_3.html](https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2013/t_3.html) (дата обращения 07.12.2023). [Accessed December 7, 2023.]
15. Larder, B. and Summerhayes, N. Application of Smiths Aerospace Data Mining Algorithms to British Airways 777 and 747 FDM Data. A Technology Demonstration. – Washington, DC: Global Aviation Information Network, 2004. – URL: [https://flightsafety.org/files/FDM\\_data\\_mining\\_report.pdf](https://flightsafety.org/files/FDM_data_mining_report.pdf) (дата обращения 07.12.2023). [Accessed December 7, 2023.]
16. Baluch, M., Bergstra, T., El-Hajj, M. Complex Analysis of United States Flight Data Using a Data Mining Approach // 2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). – Las Vegas, NV, USA, 2017. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/CCWC.2017.7868414.
17. Chakrabarty, N. A Data Mining Approach to Flight Arrival Delay Prediction for American Airlines // 2019 9th Annual Information Technology, Electromechanical Engineering and Microelectronics Conference (IEMECON). – Jaipur, India, 2019. – P. 102–107. – DOI: 10.1109/IEMECONX.2019.8876970.
18. Devansh, Sh., Ayushi, L., Danish, J., Lynette, D. Airline Delay Prediction using Machine Learning and Deep Learning Techniques // International Journal of Recent Technology and Engineering. – 2020. – Vol. 9. – Iss. 2. – P. 1049–1054.

Статья представлена к публикации руководителем  
PPC В. А. Кушниковым.

Поступила в редакцию 18.09.2023,  
после доработки 07.12.2023.  
Принята к публикации 24.01.2024.

**Варюхина Екатерина Витальевна** – канд. техн. наук, ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н. Е. Жуковского», г. Жуковский,  
✉ [e.varyukhina@yandex.ru](mailto:e.varyukhina@yandex.ru)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5156-316X>

**Клочков Владислав Валерьевич** – д-р экон. наук, канд. техн. наук, ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н. Е. Жуковского», г. Жуковский; Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,  
✉ [vlad\\_klochkov@mail.ru](mailto:vlad_klochkov@mail.ru)  
ORCID iD <https://orcid.org/0000-0003-4149-7562>

© 2024 г. Варюхина Е. В., Клочков В. В.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

# ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF INTELLECTUAL TECHNOLOGIES FOR IDENTIFYING HAZARDOUS COMBINATIONS OF EVENTS IN CIVIL AVIATION FLIGHT SAFETY MANAGEMENT

E. V. Varyukhina\* and V. V. Klochkov\*\*

\*National Research Center Zhukovsky Institute, Zhukovsky, Russia

\*\*National Research Center Zhukovsky Institute, Zhukovsky, Russia;  
Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*✉ e.varyukhina@yandex.ru, \*\*✉ vlad\_klochkov@mail.ru

**Abstract.** This paper proposes an approach to assessing the effectiveness of intellectual technologies (artificial intelligence and machine learning) for identifying hazardous combinations of events in air transport systems. The influence of such technologies on flight safety and the aircraft's total cost of ownership is formalized. A simple model is developed to assess the effectiveness of implementing intellectual technologies when identifying a single hidden problem. This model is qualitatively analyzed to reveal the role of its parameters (the size and flight hours of the aircraft fleet, the duration and cost of systemic problem elimination, and damage from events of different severity). In addition, we model the identification and elimination of hazardous combinations of events during the life cycle of air transport systems considering the learning effect. According to this effect, the intensity of hidden systemic problems decreases over time with the accumulation of experience in the operation of an air transport system and the gradual elimination of such problems. The relative acceleration in the identification of hidden patterns is the main indicator that characterizes intellectual technologies for identifying such patterns in incidents. Both types of models can be used to estimate the dependence of expected losses on this indicator. It is also important to consider the dependences of model calculation results on other parameters of the models, including the duration and cost of eliminating the identified problems, damage from various events, and the size and flight hours of the aircraft fleet. As is demonstrated below, intellectual technologies are most effective in an air transport system with a small aircraft fleet and a low intensity of aircraft operation.

**Keywords:** flight safety, hidden hazards, intellectual technologies.