Описание работы

«**Исследования факторов риска выкатывания самолета с ВПП, методов оценки ситуации и прогнозирования ее развития в интересах разработки перспективных бортовых систем ситуационной осведомленности экипажа на посадке»,** выдвинутой на конкурс «Авиастроитель года» по итогам 2019 года.

Ганяк О.И., Лазурин Г.А., Стрелков В.В., Хайруллин Н.Г., (ФГУП «ЦАГИ»),
Бутырин О.А. (АО «Авиакомпания «Аврора»)

Представленная на конкурс работа является результатом 3-х летней программы поисковых исследований, выполненной специалистами нескольких подразделений ФГУП «ЦАГИ» в рамках НИР «РАНВЭЙ-2», и в рамках работ по договорам между ФГУП «ЦАГИ» и АО «ГСС» в период с 2017 по 2019 г.г.

НИР «Ранвэй-2» выполнялась в координации с работами по проекту «Solutions for runway excursions» международной программы Future Sky Safety.

Значительную организационную поддержку данной работе оказала Росавиация. Неоценимый вклад в работу внесла авиакомпания «Аврора», которая открыла доступ к своим первичным полетным данным и вовлекла в работу своих пилотов и специалистов по безопасности полетов. К работам на отдельных этапах были также привлечены специалисты по анализу данных из Школы Прикладной Математики и Информатики МФТИ.

Авторский коллектив, выдвигаемый на премию «Авиастроитель года - 2019», – это непосредственные исполнители работы, которые внесли наибольший вклад в работу.

Представленная работа – это разработка так называемого «проактивного» подхода к обеспечению безопасности полетов и новой технологии оценки текущей полетной ситуации и прогнозирования ее развития применительно к решению одной из приоритетных задач ИКАО - снижение риска грубой посадки и выкатывания самолета с ВПП. Новая технология базируется на применении методов «искусственного интеллекта», который «обучается» на выборке реальных полетных данных и впоследствии позволяет оценивать текущую полетную ситуацию и делать прогноз в отношении вероятности грубой посадки и/или выкатывания самолета с ВПП. Технология разрабатывается в интересах создания перспективных бортовых систем ситуационной осведомленности экипажа самолета на посадке.

Работа носит комплексный характер и включает в себя:

- Обзор материалов и патентные исследования по теме.
- Исследования случаев выкатывания самолетов с ВПП.
- Сбор, предварительную обработку и синхронизацию первичных полетных данных с бортового параметрического регистратора пассажирского самолета и архивов погоды и состояния ВПП (архивы METAR).
- Статистический анализ фактических условий выполнения посадки.
- Разработку технологии оценки текущей полетной ситуации и прогнозирования ее развития на основе анализа репрезентативной выборки посадок самолета с использованием «интеллектуальных» методов анализа разнородной информации.
- Апробацию технологии оценки текущей полетной ситуации и прогнозирования ее развития на реальных полетных данных при анализе факторов риска бокового выкатывания самолета с ВПП и прогнозировании рисков авиационного происшествия на посадке.
- Разработку концепции и алгоритмов бортовой системы ситуационной осведомленности экипажа с функциями «искусственного» интеллекта.

- Разработку мини-стенда - демонстратора бортовой системы ситуационной осведомленности экипажа на посадке.
- Предварительный оценку алгоритмов бортовой системы ситуационной осведомленности экипажа на мини-стенде с участием пилота.

Во ФГУП «ЦАГИ» давно проводятся прикладные исследования движения самолета по ВПП (работы В.Ф. Брагазина, Ю.Ф. Диденко и др.), рассматривается влияние различных факторов на динамику самолета на взлете и посадке, разрабатываются алгоритмы автоматизации управления, в частности, разработан автомат парирования отказа двигателя на взлете, который внедрен на некоторых российских самолетах. В основе этих исследований лежит модель динамики самолета на ВПП.

Предметом изучения настоящей НИР являются, прежде всего, статистические данные о случаях выкатывания самолетов с ВПП, первичные полетные данные с бортовых регистраторов (около 10 000 посадок самолета А-319), информация о погоде и состоянии ВПП. Исследование этих данных с применением «интеллектуальных» методов анализа позволило предложить новую технологию выявления факторов риска и предпосылок к авиационному происшествию на ВПП при посадке.

В работе получены следующие основные результаты:

1. Подготовлен детальный обзор о состоянии дел в области предотвращения авиационных происшествий на ВПП; выполнен анализ нормативных документов, имеющих отношение к рассматриваемой проблеме, включая перспективные документы, которые разработаны ИКАО и будут внедряться в ближайшее время; выполнены патентные исследования разработок по теме работы, в том числе, касающихся методов «интеллектуального» анализа данных для решения задач безопасности полета на посадке.
2. Выполнен экспертный анализ материалов расследования грубых посадок и боковых выкатываний современных самолетов с целью более точного определения предпосылок к инцидентам на ВПП и факторов риска.
3. Разработана анкета и проведено анкетирование линейных пилотов гражданской авиации (более 50 опрошенных). Анкетирование позволило оценить значимость основных факторов риска, уточнить границы «простых» и «сложных» условий полета и подтвердить актуальность задач, решаемых в НИР.
4. Собрана уникальная выборка реальных полетных данных, которая насчитывает около 10 тысяч посадок самолета А-319 в аэропортах дальневосточного региона, что позволяет отрабатывать технологии анализа больших объемов данных и делать статистически значимые выводы.
5. Отработаны технологии работы с первичными полетными данными: расшифровка файлов бортового параметрического регистратора, синхронизация записей бортового регистратора и архивов METAR (погода и состояние ВПП), формирование массивов данных для обработки. Разработано соответствующее ПО.
6. Выполнен анализ фактических условий посадки самолетов в 4-х аэропортах РФ в условиях реальной эксплуатации. Получены оценки вероятности различных сочетаний скорости бокового ветра и коэффициента сцепления на ВПП.
7. Отработана методика восстановления траектории движения самолета в горизонтальной плоскости в координатах ВПП методом интегрирования составляющих вектора путевой скорости. Предложен способ описания траектории дискретным кодом. Преимуществом данного подхода является простота и информативность описания основных особенностей траектории послепосадочного

пробега самолета. Разработано ПО для восстановления и кодировки траектории движения самолета в горизонтальной плоскости по записям бортового параметрического регистратора.

8. Предложена оригинальная методика оценки значимости факторов риска выкатывания самолета за боковую кромку ВПП на основании анализа полетных данных, предполагающая наличие некоторой метрики выполненной посадки. Данная методика позволяет решить поставленную задачу оценки факторов риска и предпосылок выкатыванию самолета с ВПП с использованием выборки успешных посадок. Разработаны метрики послепосадочного пробега.
9. Разработана и апробирована на реальных полетных данных технология анализа факторов риска, выявления предпосылок к грубой посадке и/или выкатыванию самолета с ВПП, оценки текущей полетной ситуации и построения прогноза ее развития. Технология предполагает применение специальных методов анализа больших объемов разнородной информации: критерий Манна-Уитни, оценка коэффициента корреляции Спирмена, линейная регрессия, описание распределения параметров захода на посадку смесью гауссовых распределений и пр.
10. Сформирован функционал перспективной системы ситуационной осведомленности (ССО) экипажа, разработана логика ее работы, несколько вариантов алгоритмов оценки ситуации (алгоритм на базе опережающего моделирования уравнений движения, алгоритм на основе наблюдаемых статистических закономерностей).
11. Разработан комплекс моделирования (мини-стенд) для отработки логики и алгоритмов бортовой ССО экипажа на посадке. Работоспособность и технические характеристики макетного образца бортовой ССО подтверждены соответствующим актом («Акт по результатам апробации»)
12. Разработан эскиз информационной страницы бортовой ССО. Принципиально новым является наличие «индикатора аномальности» в информационном поле. Создан прототип такой страницы в виде программного модуля, который интегрирован в состав ПО мини-стенда.
13. Определены перспективные методы разработки алгоритмов прогнозирования для бортовой ССО, которые основаны на обработке большой выборки первичных полетных данных с использование специальных методов анализа, к которым относятся: метод опорных векторов, метод линейной регрессии, метод градиентного бустинга и др.

Результаты исследований имеют практическую значимость, о чем свидетельствует заинтересованность, которую проявило АО «ГСС» (в 2018 году заключен и выполнен договор на проработку концепции бортовой системы ситуационной осведомленности экипажа самолета SSJ-New на посадке; в 2019 году заключен договор сроком на 3 года, выполнен и сдан первый этап работ по данному договору).

Результаты исследований были высоко оценены Росавиацией (отзыв Росавиации прилагается – см. Приложение 1). В 2017 году по просьбе Росавиации текущие результаты данных исследований докладывались от лица российской делегации на заседание рабочей группы ИКАО по безопасности полетов (выпущен соответствующий информационный бюллетень ИКАО).

Интерес к технологии анализа полетных данных проявляет авиакомпания «Аврора». Выявленные в исследованиях критические параметры в контрольных точках траектории посадки и введенные метрики послепосадочного пробега могут значительно повысить информативность послеполетного объективного контроля и выявить посадки с высоким

риском выкатывания самолета с ВПП (которые сегодня не выявляются существующими инструментами объективного контроля).

Результаты работы широко обсуждались с участниками международного проекта «P3-Solutions for runway excursions», на семинарах комплекса безопасности полетов ФГУП «ЦАГИ» и НТС института (смотри Приложение 2), на встречах с потенциальными потребителями результатов работы, докладывались на НТК (в том числе, международных) и были опубликованы в научно-технических журналах и трудах конференций.

Основные результаты работы за период 2016÷2019 годы изложены в следующих отчетах по НИР «Ранвэй-2»:

1. «Системный анализ первичных полетных данных. Разработка методик и алгоритмов обработки полетной информации». НТО ФГУП «ЦАГИ», инв. №5948, 2017 г.
2. «Отработка алгоритмов выявления предпосылок к авиационному инциденту на ВПП. Отработка технических решений, направленных на предотвращение выкатывания самолета с ВПП». НТО ФГУП «ЦАГИ», инв. № 6006, 2018 г.
3. «Апробация разработанных методик и алгоритмов. Разработка рекомендаций по мерам снижения риска грубой посадки и выкатывания самолета с ВПП». НТО ФГУП «ЦАГИ», инв. № 6078, 2019 г.
4. Мини-стенд – демонстратор для отработки логики и алгоритмов бортовой системы ситуационной осведомленности экипажа. Акт о создании мини-стенда №21-01 от 15.07.2019 г.

Результаты работ содержатся также в следующих отчетах, выполненных ФГУП «ЦАГИ» по договорам с АО «ГСС»:

1. «Разработка материалов в объеме технического предложения по системе предотвращения выкатывания за пределы ВПП (ROPS)». НТО ФГУП «ЦАГИ», инв. № 5992, 2018 г.
2. «Уточнение логики работы и переключения функций ROPS с пульта управления. Формирование требований высокого уровня к системе ROPS в соответствии с требованиями стандартов DO-178C и DO-331». НТО ФГУП «ЦАГИ», инв. № 6062, 2019 г.
3. «Предварительная оценка логики, алгоритмов и информационного поля системы ROPS. Уточнение требований высокого уровня». НТО ФГУП «ЦАГИ», инв. № 6083, 2019 г.

Следует также упомянуть научно-технические отчеты ФГУП «ЦАГИ», инв. №5892, и №5896 от 2016 года, выполненные в рамках НИР «Ранвэй», которые являются отправной точкой и фундаментом работ 2017÷2019 г.г.

Перечисленные выше научно-технические отчеты являются собственностью Заказчика работы (Минпромторг, АО «ГСС») и при необходимости могут быть предоставлены на рассмотрение конкурсной комиссии после согласования с Заказчиком.

Доклады и публикации по теме работы:

- В.В. Стрелков. «Исследования ЦАГИ, направленные на уменьшение риска выкатывания самолета с ВПП» - доклад в Росавиации на совещании руководителей региональных инспекций по безопасности полетов, апрель 2017 г.
- А.А. Павлов. «Новые принципы оценки состояния ВПП и его учета при вычислении взлетных и посадочных дистанций» - доклад в Росавиации на совещании руководителей региональных инспекций по безопасности полетов, апрель 2017 г.

- В.В. Стрелков. «Исследования ЦАГИ, направленные на уменьшение риска выкатывания самолета с ВПП» – доклад на 9-ой рабочей встрече экспертов ИКАО по безопасности полетов, Тбилиси, 13-15 июня 2017 г. (см. Приложение 3).
- Д.С Емельянов, В.В. Стрелков. «Исследования ЦАГИ, направленные на уменьшение риска выкатывания самолета с ВПП» - стендовый доклад на ежегодной встрече участников программы HORIZON-2020 Future Sky Safety, Кельн, 6-7 декабря, 2017 г. (см. Приложение 4).
- В.В. Стрелков, Д.С. Емельянов «Восстановление и кодировка траектории движения самолета на посадке и пробеге по ВПП» - доклад на международной научной конференции по амфибийной и безаэродромной авиации в рамках «Гидроавиасалона-2018», г. Геленджик, 6÷7 сентября 2018 г.
- В.В. Стрелков, Н.Г. Хайруллин «Оценка риска бокового выкатывания на посадке» («Risk Assessment of Veer Off During Landing») – стендовый доклад на ежегодной встрече участников программы HORIZON-2020 Future Sky Safety, Брюссель, 6÷7 ноября 2018 г. (см. Приложение 5).
- В.В. Стрелков, Н.Г. Хайруллин «Применение методов статистического анализа для решения задачи оценки влияния различных факторов на риск выкатывания самолета с ВПП при посадке» - доклад на 61-ой Всероссийской научной конференции МФТИ, г. Жуковский, 19÷25 ноября 2018 г.
- В.В. Стрелков, Д.С. Емельянов, Е.Б. Горский. «Восстановление и кодировка траектории движения самолета на заключительном этапе снижения по глиссаде, выравнивании и пробеге по ВПП» - стендовый доклад на XXX-ой научно-технической конференции по аэродинамике, пос. Володарского, 25÷26 апреля 2019 г. (см. Приложение 6)
- В.В. Стрелков, Н.Г. Хайруллин. «Оценка значимости внешних факторов и выявление предпосылок к выкатыванию самолета с ВПП на посадке» - доклад на XXX-ой научно-технической конференции по аэродинамике, пос. Володарского, 25÷26 апреля 2019 г. (см. Приложение 7).
- «ЦАГИ разрабатывает новые технологии повышения безопасности полета» - пресс-релиз ФГУП «ЦАГИ», апрель 2019 г.
- В.В. Стрелков, Н.Г. Хайруллин, О.А. Бутырин. «Применение методов статистического анализа для решения задачи оценки влияния различных факторов на риск выкатывания самолета со взлетно-посадочной полосы при посадке» - Труды МФТИ, том 11, №3, 2019. (см. Приложение 8).
- В.В. Стрелков, Н.Г. Хайруллин. «Оценка внешних факторов риска и выявление предпосылок к боковому выкатыванию самолета с ВПП на посадке методами статистического анализа» («Assessment of external risk factors and identification of precursors of veer-off event by means of statistical analysis») – доклад на 2-м международном симпозиуме по авиационным технологиям, наземному обслуживанию и эксплуатации (ICSC-ISATECH), 9-11 октября 2019 г., Амстердам, Нидерланды.
- В.В. Стрелков, Н.Г. Хайруллин. «Оценка значимости внешних факторов и выявление предпосылок к выкатыванию самолета с ВПП на посадке» - заметка в годовой технический отчет ФГУП «ЦАГИ», 2019.

Приложения:

1. Отзыв Росавиации – на 1 листе.
2. Презентация на НТС ФГУП «ЦАГИ» - на 6 листах.
3. Презентация к докладу на рабочей встрече в ICAO - на 31 листе.
4. Стендовый доклад (постер) в Кельне – на 1 листе.
5. Стендовый доклад (постер) в Брюсселе – на 2-х листах.
6. Презентация к докладу на XXX-ой НТК по аэродинамике – на 14 листах.
7. Стендовый доклад на XXX-ой НТК по аэродинамике – на 6 листах.
8. Статья в трудах МФТИ – на 12 листах.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Отзыв Росавиации

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНТРАНС РОССИИ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ РУКОВОДИТЕЛЯ

Ленинградский пр-т, д. 37, корп. 2, Москва, ГСП-3, 125993, Телетайп 111495
Тел. (499) 231-50-09, факс (499) 231-55-35
e-mail: rusavia@scaa.ru

11.02.2020 № Исх-5071/02

На № 21/15-10-529 от 27.01.2020

Государственный научный центр
Российской Федерации
ФГУП «Центральный
аэрогидродинамический институт имени
профессора Н.Е. Жуковского»

Начальнику
комплекса безопасности

В.Л. Суханову

Уважаемый Валерий Леонидович!

Федеральное агентство воздушного транспорта считает важным поддерживать постоянное взаимодействие с ФГУП «ЦАГИ» по вопросам научных исследований в сфере безопасности полетов гражданских воздушных судов.

Благодарим Вас за предоставление Росавиации возможности принимать участие в обсуждении результатов научных исследований, проводимых ФГУП «ЦАГИ».

Ежегодно в Российской Федерации происходит 10 – 12 случаев выкатывания самолетов за пределы ВПП и более 20 инцидентов, связанных с превышением нормальной перегрузки при приземлении. Поэтому результаты исследований ФУП «ЦАГИ» по направлению «Разработка комплекса мер, направленных на предотвращение грубых посадок и выкатывания самолета с ВПП» являются актуальными и важными для обеспечения безопасности полетов.

В 2017 году представители ФГУП «ЦАГИ» представляли текущие результаты исследований на проводившемся в Росавиации совещании с начальниками отделов инспекций по безопасности полетов территориальных органов Росавиации и получили высокую оценку участников совещания. Представители ФГУП «ЦАГИ» были приглашены Росавиацией войти в состав российской делегации на очередном заседании Европейской региональной экспертной группы ИКАО по безопасности полетов (IE-REST/09) и выступить с докладом о результатах исследований.

Считаем необходимым отметить, что исследования ФГУП «ЦАГИ» базируются на реальных полетных данных, предоставленных АО «Авиакомпания «Аврора».

Безусловный интерес представляет выполненный на первом этапе работ детальный обзор вопросов снижения риска выкатывания самолета за пределы ВПП, нормативных документов, регулирующих деятельность разработчиков самолетов, авиакомпаний и операторов аэродромов, а также анализ фактических условий посадки самолетов в ряде аэропортов Российской Федерации. В частности, для Росавиации особый интерес представляют материалы, связанные с подготовкой и вводом в действие с 2020 года новых стандартов оценки состояния ВПП и информирования экипажей.

Заслуживает внимания проведенный в рамках этих исследований опрос пилотов гражданской авиации. Подобные исследования не проводились в гражданский авиации в течение последних 10 - 15 лет. Сформированный в ходе исследований опросный лист

затрагивает много важных вопросов, касающихся рассматриваемой проблемы (оценка состояния ВПП, аквапланирование, уход на второй круг, критерии оценки техники пилотирования и т.д.). Обращает на себя внимание полученный результат, согласно которому 30% опрошенных пилотов сталкивалась с ситуацией, когда им с трудом удалось удержать самолет на ВПП после приземления.

Интересными являются приведенные в работах ФГУП «ЦАГИ» результаты исследования больших объемов неоднородных данных. Аналогичная задача решалась в исследованиях, проводившихся в 2015 году по заданию Росавиации в Государственном центре «Безопасность полетов на воздушном транспорте».

При этом исследования ФГУП «ЦАГИ» отличаются использованием сложных современных математических методов анализа данных, которые позволяют сформировать понятие «типового» (базового) полета, выявить аномалии в полетных данных (потенциально опасные отклонения-триггеры, требующие профилактических действий) и скрытые закономерности. С точки зрения практической значимости результатов исследований для авиакомпаний, стоит обратить внимание на, так называемые, «метрики послепосадочного пробега», которые при анализе полетных данных позволяют выявить посадки с высоким риском выкатывания самолета за пределы ВПП. Это является важным результатом исследований в связи с необходимостью решения задачи проактивного подхода к обеспечению безопасности полетов.

Предотвращение выкатываний за пределы ВПП не может обеспечиваться исключительно мерами «эксплуатационного» характера (профессиональная подготовка пилотов, содержание аэродромов, разработка процедур и правил). При этом на сегодняшний день ни один самолет отечественного производства не оборудован системами предотвращения выкатывания за пределы ВПП, подобными используемым на самолетах иностранных разработчиков. Считаем, что научный задел в данном направлении, сделанный ФГУП «ЦАГИ», следует в дальнейшем использовать при создании и совершенствовании отечественных самолетов транспортной категории.

Анализ материалов исследований ФГУП «ЦАГИ» позволяет сделать вывод о высокой степени готовности к практическому применению полученных результатов. Результаты исследований могут быть востребованы как при разработке автоматизированных систем для реализации программ анализа полетных данных в авиакомпаниях, так и при разработке бортового оборудования.

Готовы в дальнейшем оказывать комплексу безопасности ФГУП «ЦАГИ» возможную поддержку при проведении исследований, направленных на повышение безопасности полетов воздушных судов российской гражданской авиации.

С уважением,

Подлинник электронного документа, подписанного ЭП, хранится в Межведомственной системе электронного документооборота Федерального агентства воздушного транспорта

СВЕДЕНИЯ О СЕРТИФИКАТЕ ЭП

Сертификат: 00E1036E1B07E0FB80EA11C31C9AE08F08
Владелец: Сторчевой Олег Георгиевич
Действителен с 12-12-2019 до 12-12-2020

О.Г. Сторчевой

Лучинин Валерий Владимирович
(495) 645 85 55, доб. 5232

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Презентация на НТС ФГУП «ЦАГИ»

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МЕР, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ГРУБЫХ ПОСАДОК И ВЫКАТЫВАНИЯ САМОЛЕТА С ВПП

Шифр «РАНВЕЙ-2»

Продолжительность НИР – 3 года (2017 ÷ 2019 г.г.)
Отв. исполнитель: ФГУП «ЦАГИ».
Соисполнители: МФТИ, МАИ

Работа выполнялась в кооперации с партнерами по проекту HORIZON 2020 Future Sky Safety при участии Росавиации и АО «Авиакомпания «Аврора».

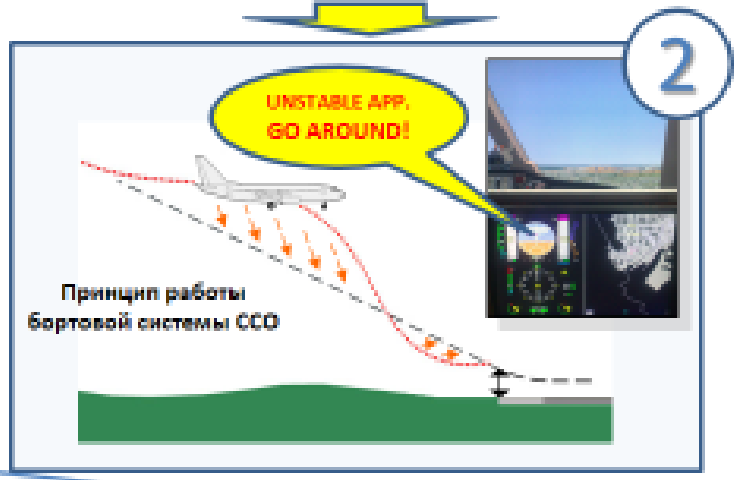
Цели исследований:

1. **Разработка технологий прогнозирования риска авиационного происшествия на основании «интеллектуального» анализа больших объемов полетных данных и информации о сопутствующих факторах.**
2. **Разработка новых технических решений для бортовой авионики.**

Ожидаемые результаты:

1. **Методы и алгоритмы выявления предпосылок к выкатыванию самолета с ВПП на основании «интеллектуального» анализа больших объемов разнородной информации.**
2. **Демонстратор бортовой системы ситуационной осведомленности экипажа на режиме захода на посадку (TRL 4÷5).**

Схема сбора и анализа данных



Принцип работы бортовой системы ССО

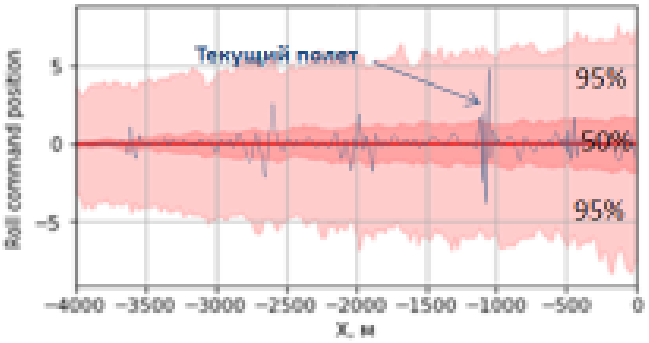
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Отработаны технологии работы с файлами бортового регистратора и архивами METAR.
2. Выполнен анализ фактических условий посадки самолетов в реальной эксплуатации.
3. Предложена методика восстановления и способ описания траектории пробега самолета по ВПП дискретным кодом.
4. Предложена методика оценки факторов риска выкатывания самолета за боковую кромку ВПП на основании анализа выборки успешных посадок.
5. Разработаны методы выявления предпосылок к грубой посадке и/или выкатыванию самолета с ВПП.
6. Сформирован функционал перспективной системы ситуационной осведомленности (ССО) экипажа, разработана логика ее работы.
7. Разработан комплекс моделирования для отработки логики и алгоритмов бортовой ССО.
8. Разработан эскиз информационной страницы бортовой ССО.

ЦАГИ
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
БАЗА ПЕРВИЧНЫХ ПОЛЕТНЫХ ДАННЫХ
10 000 полетов А-319
Состав выборки посадок
Всего полётов: 7705
Код Аэропорта
UNKL 63
UBI 101
UNNT 108
RKPK 201
UHMM 214
RKSI 689
UHPP 694
UHSS 888
UHWW 2212
UHHH 2333
Количество полётов
Количество полётов
780
925
483
178
70
29
3
3
0-2
2-4
4-6
6-8
8-10
10-12
12-14
14-16
Боковой ветер, м/с
границы применимости результатов:
Wz ≤ 6÷8 м/с;
Состояние ВПП в Хабаровске
укатанный снег 6%
иней или изморось 2%
мокро или вода местами 9%
сухой снег 6%
лёд 2%
мокрый снег 1%
влажно 4%
Чисто и сухо 70%
Сформированная выборка данных открывает возможности для дальнейших исследований в области безопасности полетов
02.04.2020
3

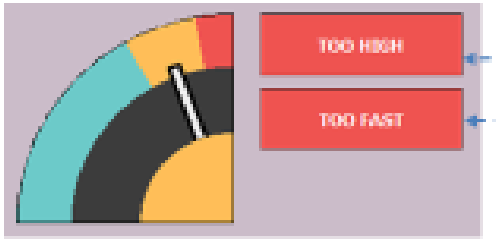
ОТРАБОТКА МЕТОДОВ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ В ПАРАМЕРАХ РЕЖИМА ЗАХОДА НА ПОСАДКУ

Построение вероятностной модели посадки
(по выборке полетов)

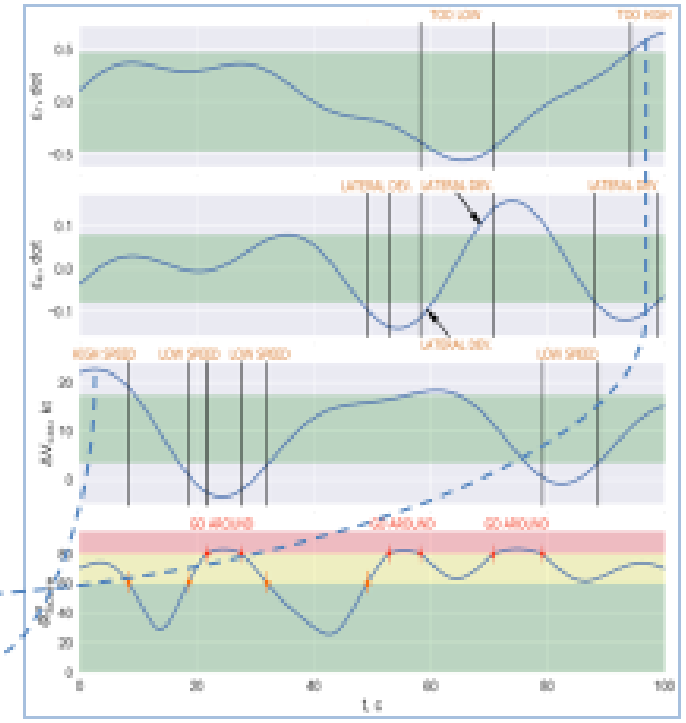


Score
показатель уровня аномальности

Индикатор аномальности



Оценка уровня аномальности текущей ситуации



Выявление и определение характера аномалии текущей ситуации – часть функционала бортовой ССО

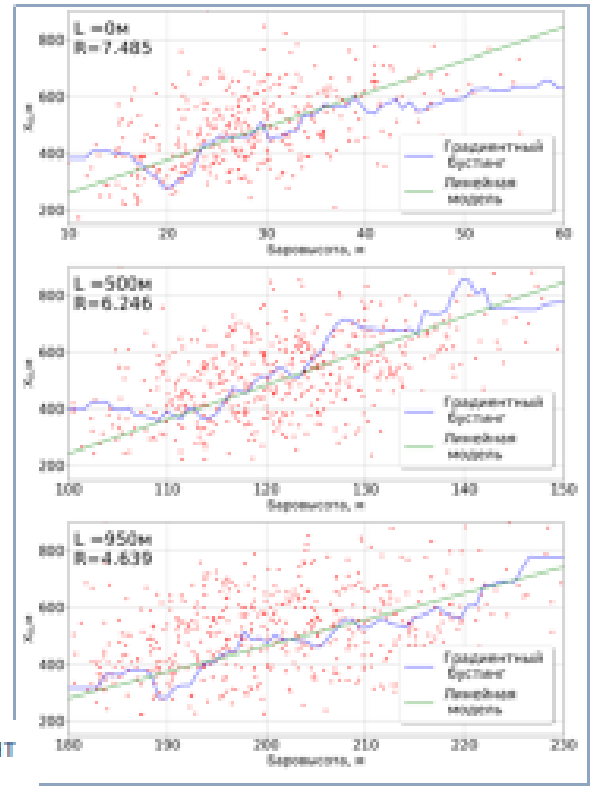
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ И МЕТОДОВ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗА ТОЧКИ ПРИЗЕМЛЕНИЯ

1. Линейная регрессия

Хкас (t) = Хкас0 + R1*(H-Hном)+R2*(Vпр-Vзп)+ . . .

2. Градиентный бустинг

Пример дерева решений



Применение методов регрессии позволяет в каждый момент времени делать прогноз координаты точки приземления

СИСТЕМА СИТУАЦИОННОЙ ОСВЕДОМЛЕННОСТИ ЭКИПАЖА НА ПОСАДКЕ

Назначение системы:

1. Предупреждение продольного выкатывания за торец ВПП при посадке (аналог ROPS от Airbus и Smart Landing от Honeywell).
2. Снижение риска грубой посадки и/или выкатывания самолета за боковую кромку ВПП (расширение функционала, не имеет аналогов).

Принцип работы:

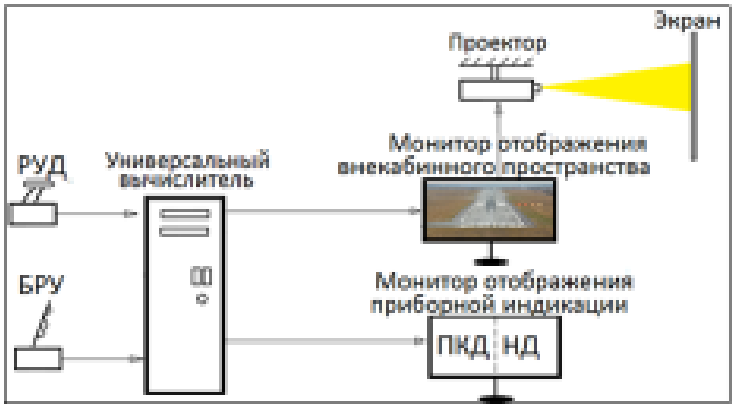
1. On-line прогноз точки остановки самолета на ВПП на основании анализа текущих полетных данных.
2. Выявление повышенного риска грубой посадки и выкатывания самолета за боковую кромку ВПП на основании текущих полетных данных и предшествующего опыта.
3. Информирование экипажа, формирование рекомендаций по пилотированию ВС.

Состояние разработок:

Разработан комплекс моделирования – демонстратор бортовой ССО. **TRL = 4.**

ДЕМОНСТРАТОР БОРТОВОЙ ССО НА МИНИ-СТЕНДЕ

Схема оборудования мини-стенда



Страница ССО на ND

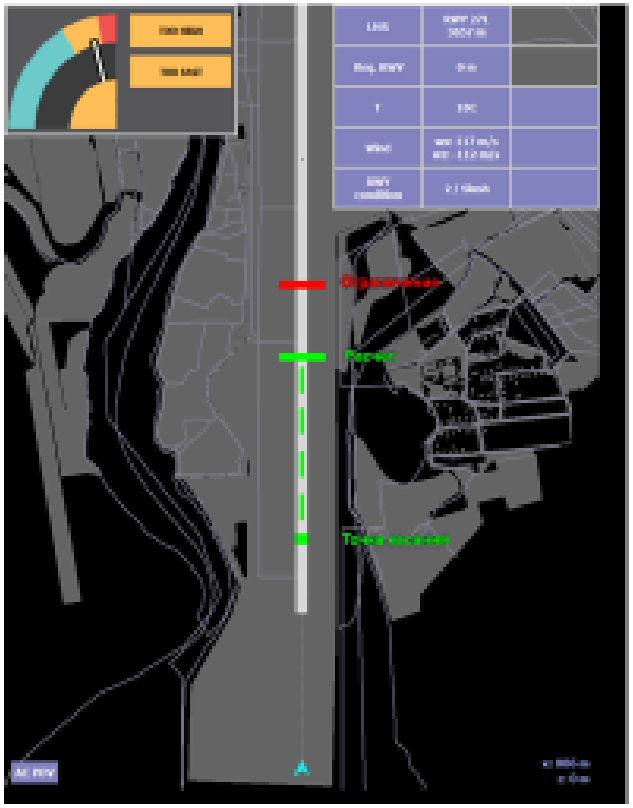
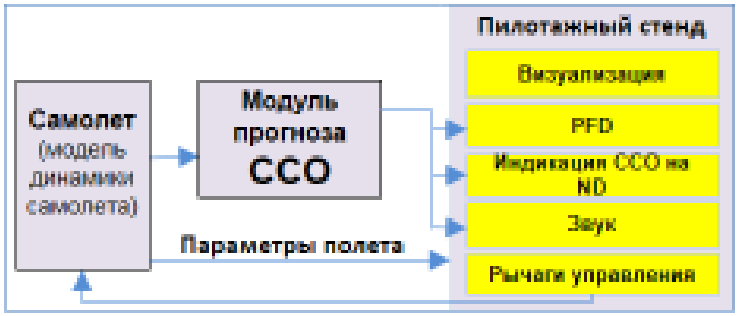


Схема ПО мини-стенда



Одно из авторитетных ОКБ проявило заинтересованность во внедрении результатов НИР в проекте нового самолета

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Презентация к докладу на рабочей встрече в ICAO

CENTRAL AEROHYDRODYNAMIC INSTITUTE n. a. professor N.E. Zhukovsky

TsAGI RESEARCH AIMED AT MITIGATING RISK OF RUNWAY EXCURSIONS

Presented by Vladimir Strelkov

The research was carried out with the support of Rosaviacia and the direct participation of "Aurora" airlines

Tbilisi, Georgia, 13-15 June 2017

CONTENT

1. Introduction.
2. Assessment of the main risk factors for veer off event based on METAR data and accident statistics.
3. What do pilots think about hard landing and veer off problem?
4. Flight data analysis to improve flight safety at landing.
5. Onboard smart system for landing task – new technology for flight safety.
6. Development of software applications for flight data processing.

EUROPEAN INITIATIVE OF JOINT RESEARCH IN THE FIELD OF AVIATION - «FUTURE SKY»

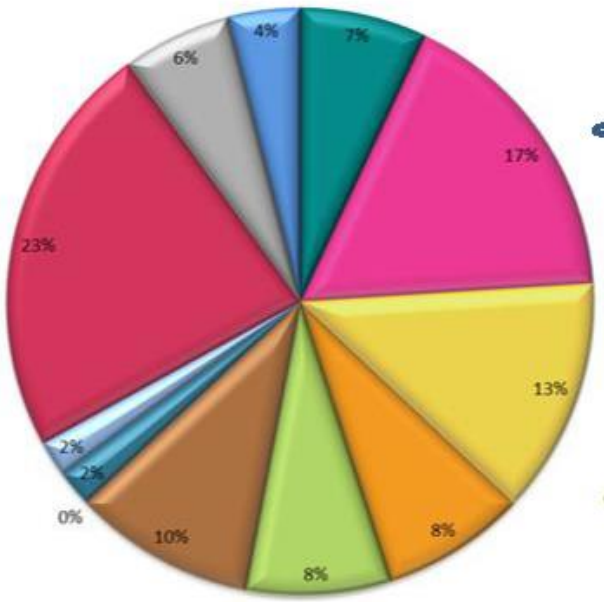
Goals:

1. **Reducing the number of aviation accidents in certain categories by 80% and in general the probability of accidents to the level < 10^{-7};**
2. **Reducing the influence of atmospheric factors;**
3. **Ensuring an integrated approach for solving safety issues.**

PREVENTING OF RUNWAY EXCURSIONS

AT AVERAGE 2 CASES OF RUNWAY EXCURSION HAPPEN WEEKLY IN THE WORLD

WORLD AVIATION INCIDENTS STATISTICS FOR THE PERIOD 2009-2013



- 7% CFIT
- 17% Landing gear malfunction
- 13% Damage on the ground
- 8% Hard Landings
- 8% Inflight failures
- 10% Loss of control (LOC-I)
- 0% Mid-air collision
- 2% Emergency landing
- 2% Other landing incidents
- 23% Runway excursions
- 6% Tail strikes
- 4% Undershooting landing

RESEARCH GOALS

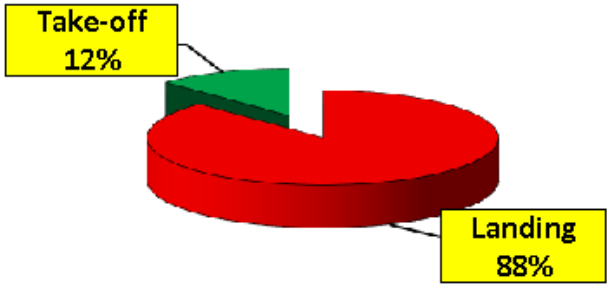
1. Development of risk prediction technology based on analysis of flight data and other relevant information.
2. Development of new technical solutions in onboard avionics.

THE RESULTS OF THE WORK ARE ADDRESSED TO AIRLINES, AVIATION AUTHORITIES AND AVIATION INDUSTRY

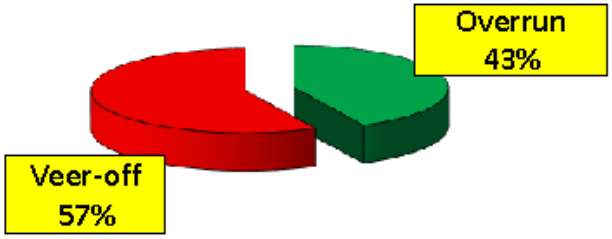
RUNWAY EXCURSIONS IN RUSSIA (2002-2015)

Total number of runway excursions - 187

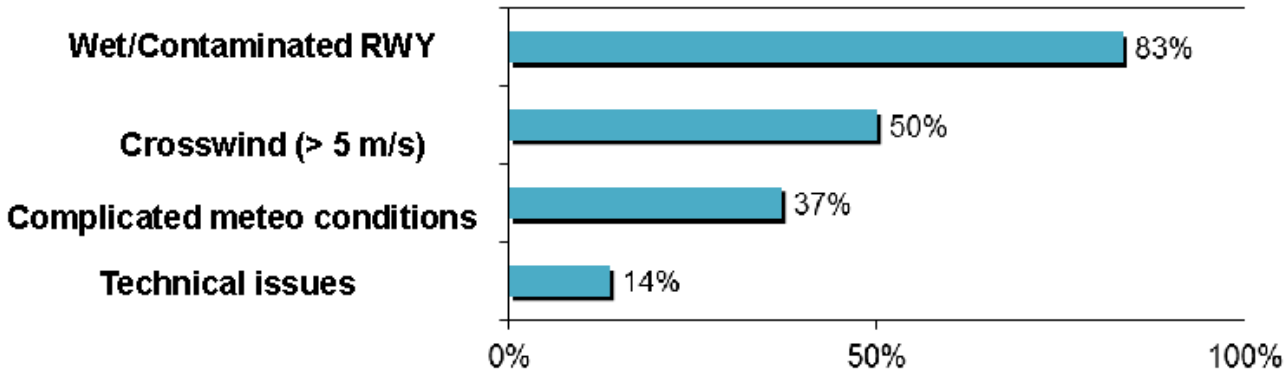
Flight phases



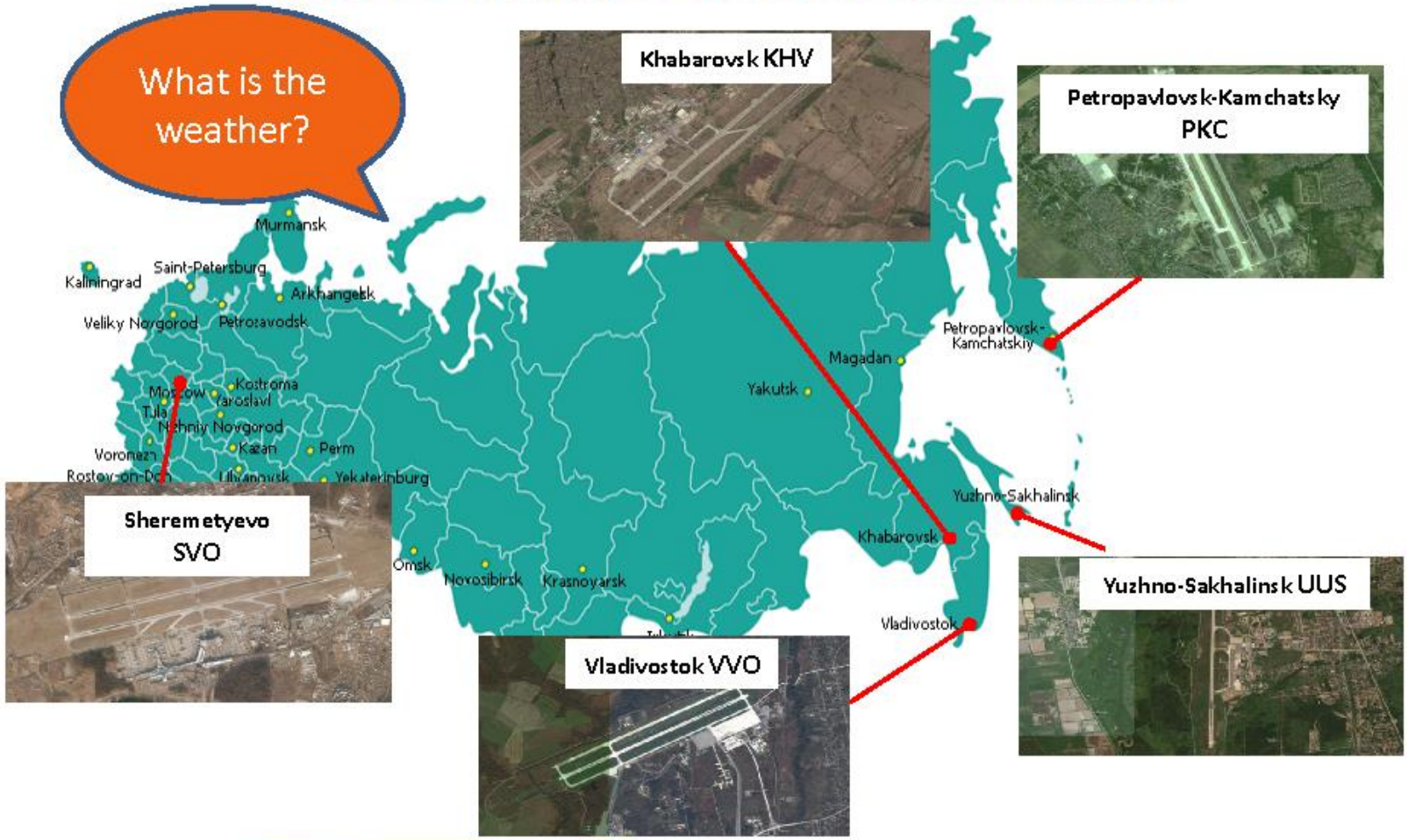
Types of excursions



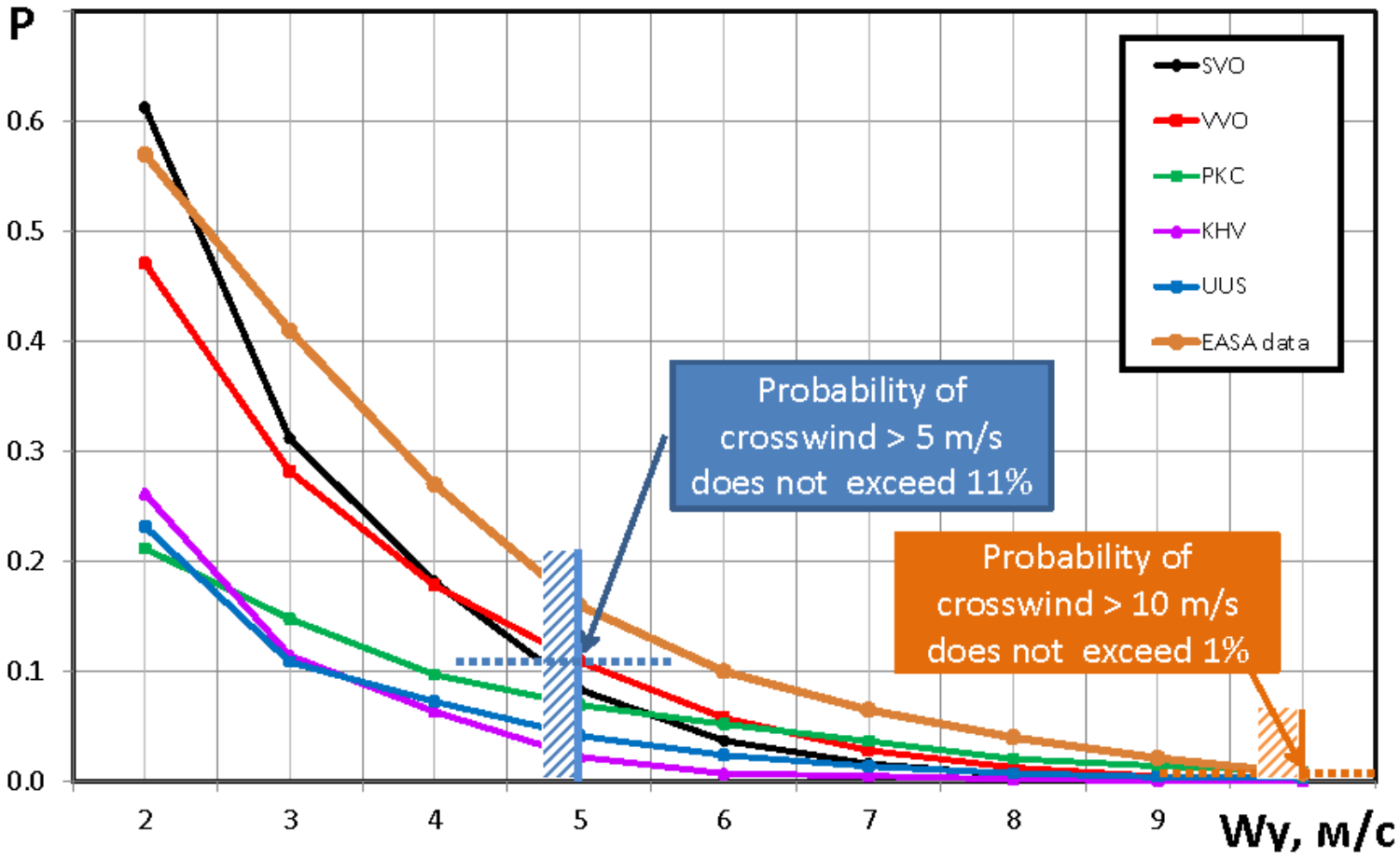
Main external contributing factors in veer-off events



RUSSIAN AIRPORTS UNDER CONSIDERATION

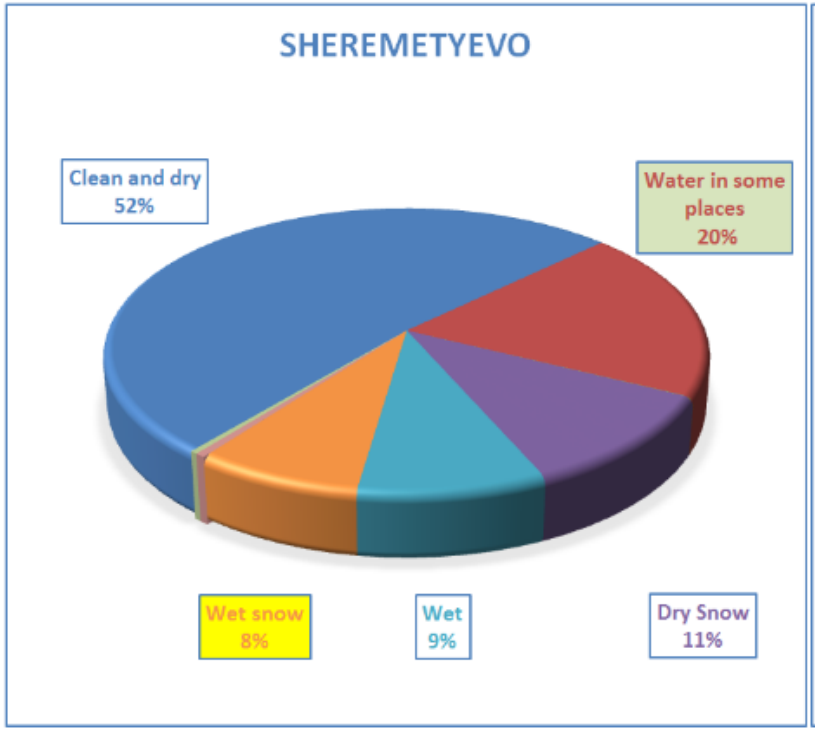


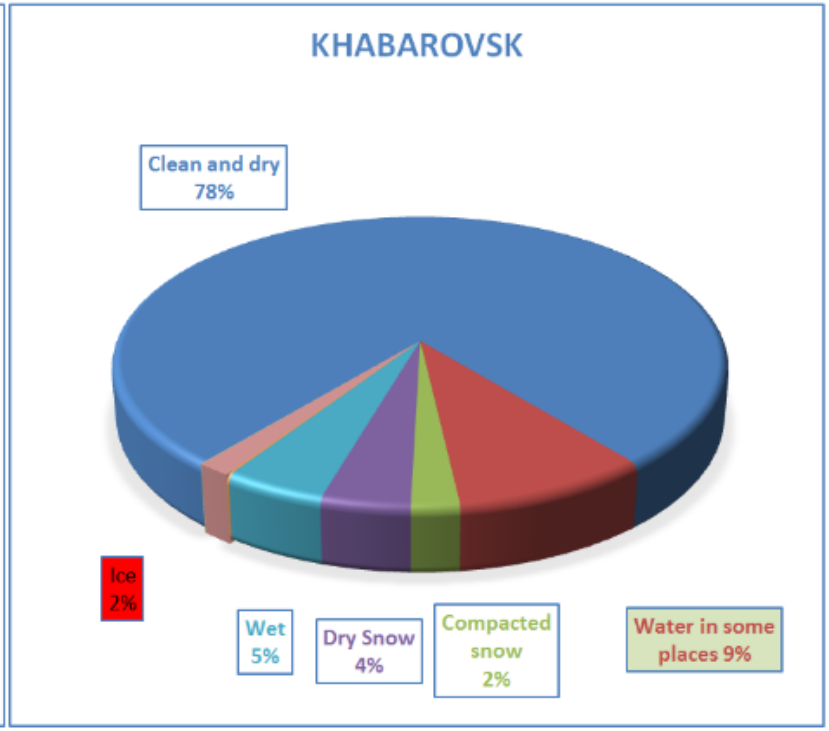
PROBABILITY OF CROSSWIND VALUE



RUNWAY CONDITIONS

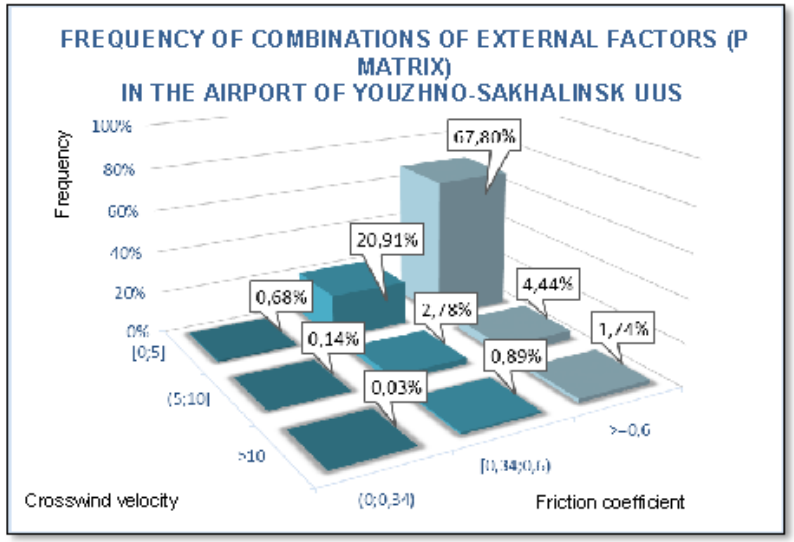
(according to METAR at http://rp5.ru from 16.09.2015 to 16.09.2016)

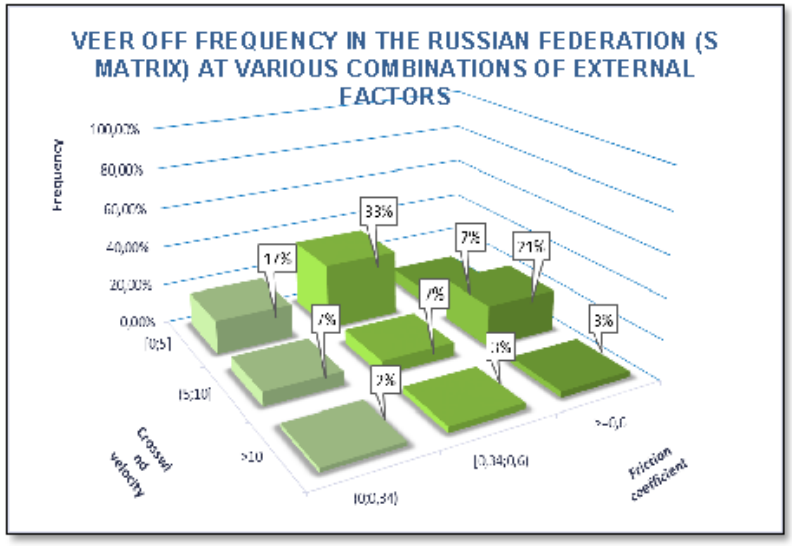




Based on 5 airports:		
Clean and dry runway	–	48%÷78%
Contaminated/Wet runway	–	22%÷52%
among them: ice, slash, wet snow	–	0%÷8%

FREQUENCY OF EXTERNAL FACTORS COMBINATIONS FOR VEER OFF EVENTS IN RUSSIA (2002-2015)



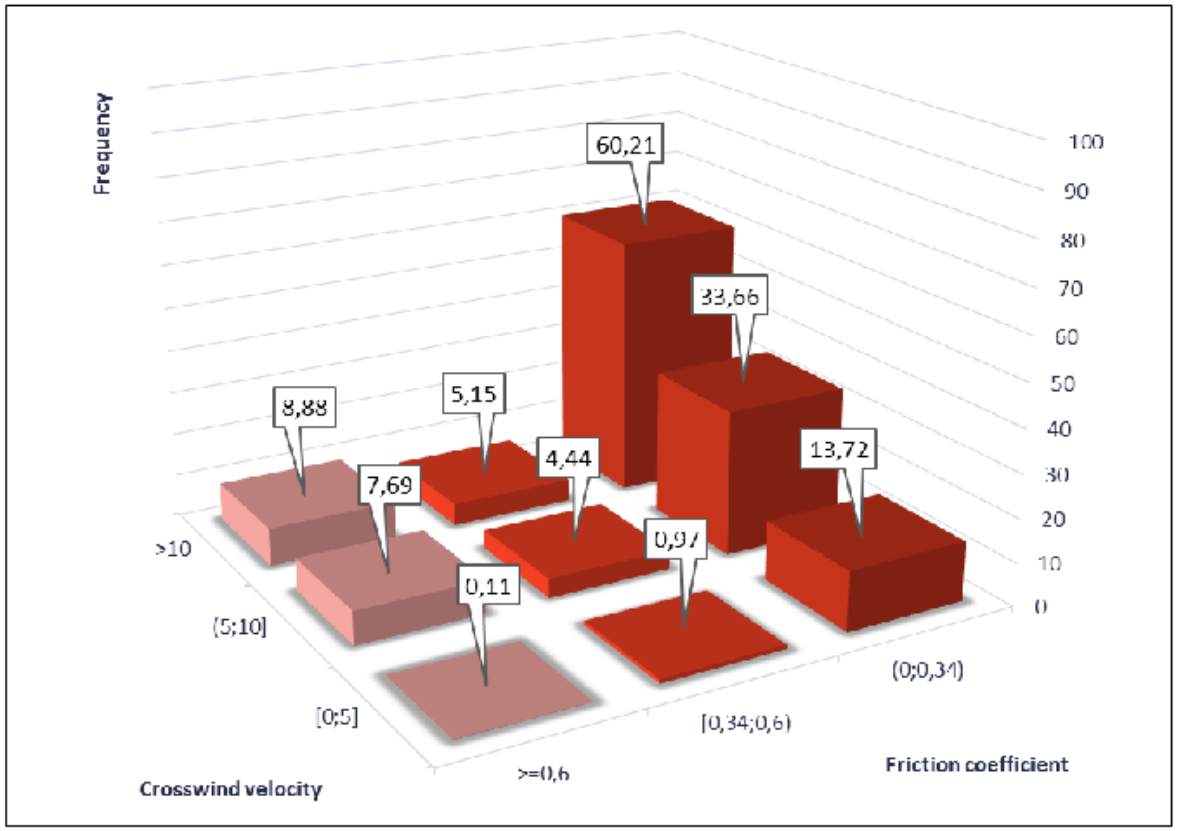


Crosswind	> 5 м/с	> 10 м/с
Probability	< 10 %	< 1÷2 %

Factors combination	Crosswind **> 5** м/с Friction coefficient < 0,6	**Crosswind >** 10 м/с Friction coefficient < 0,6
Probability	< 5 %	< 1 %

COMPLEXITY LEVEL (CL) OF LANDING TASK

CL = Function(S,P) = a*S/P



WHAT DO PILOTS THINK ABOUT VEER OFF PROBLEM?

QUESTIONNARIE

30

QUESTIONS

ON VEER OFF PROBLEM

55

PILOTS

Pilot age categories

Below 35 years old	18 %
36 – 55 years old	68 %
Above 55 years old	13 %

Aircraft types

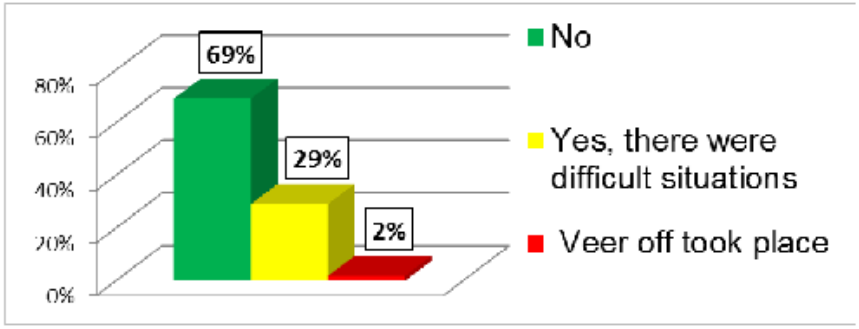
Turbojet	40 %
Turboprop	60 %

Questionnaire goals:

1. **Identification of the most significant factors and precursors of hard landing and runway excursions from the pilot's point of view .**
2. **Shortcomings identification concerning:**
   - **Information on weather and runway conditions;**
   - **Airlines activity on SOP implementation and crew trainings.**

SOME RESULTS OF QUESTIONING

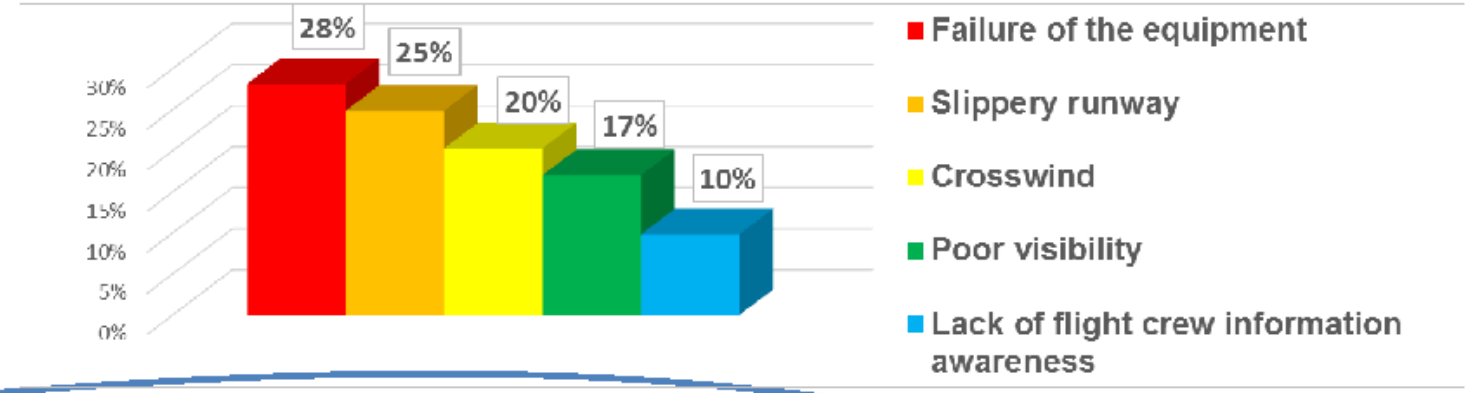
Have you ever encountered situations when it was hard job to keep the plane on the runway during landing or takeoff?



What were the flight phases the first risk precursors appear at ?

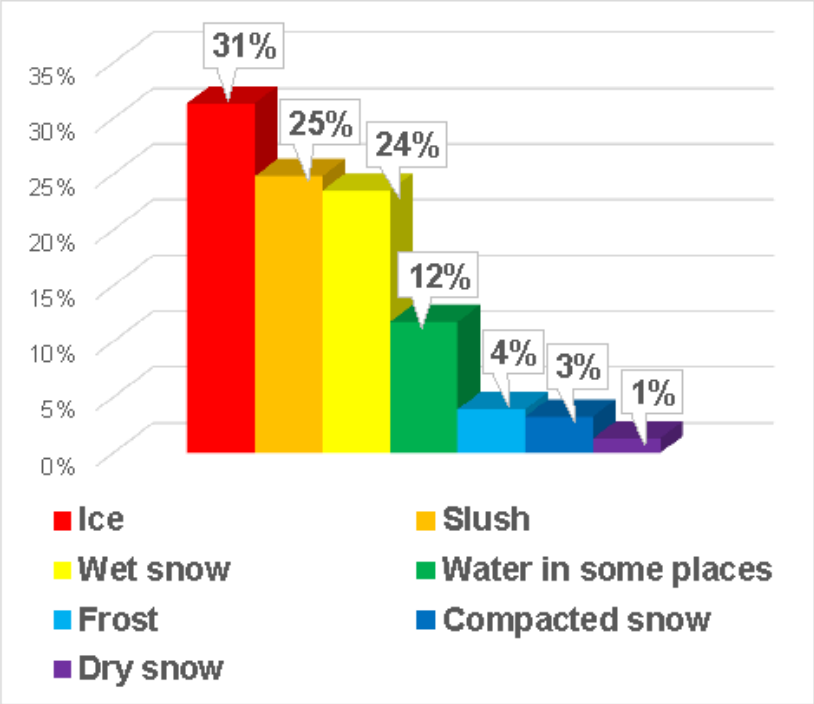
Already during the final approach there were deviations from the "normal" flight	0%
During the flare and touchdown	23%
During landing run	77%

Which of the external factors affects flight safety most substantially?

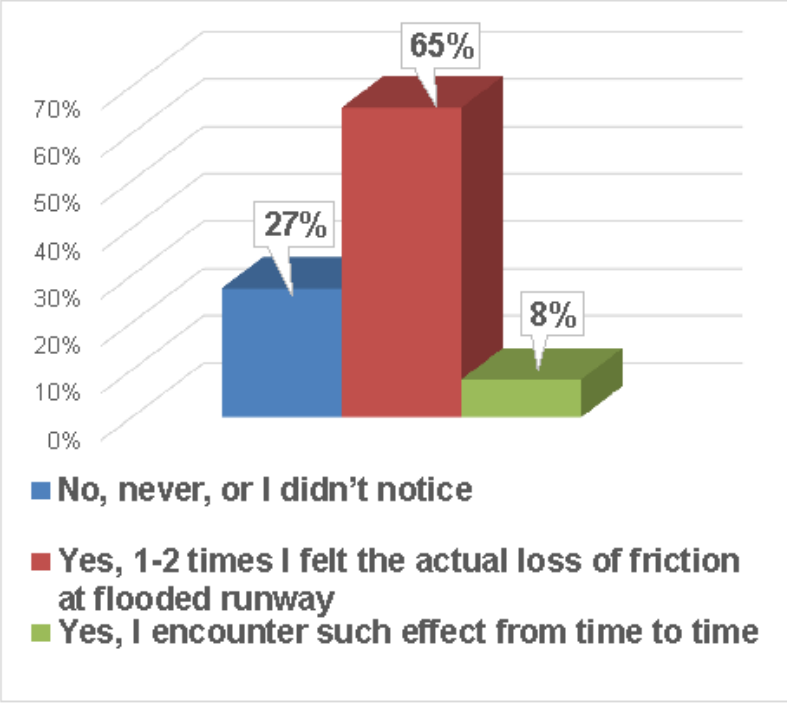


SOME RESULTS OF QUESTIONING

The most dangerous type of runway contamination in relation to veer off risk?

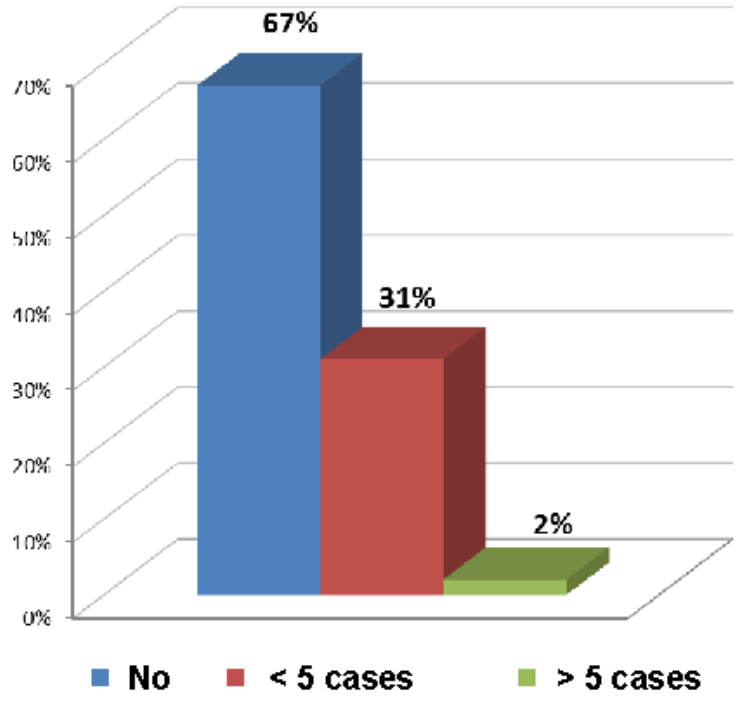


Have you ever dealt with the aquaplaning while landing at flooded runway?



SOME RESULTS OF QUESTIONING

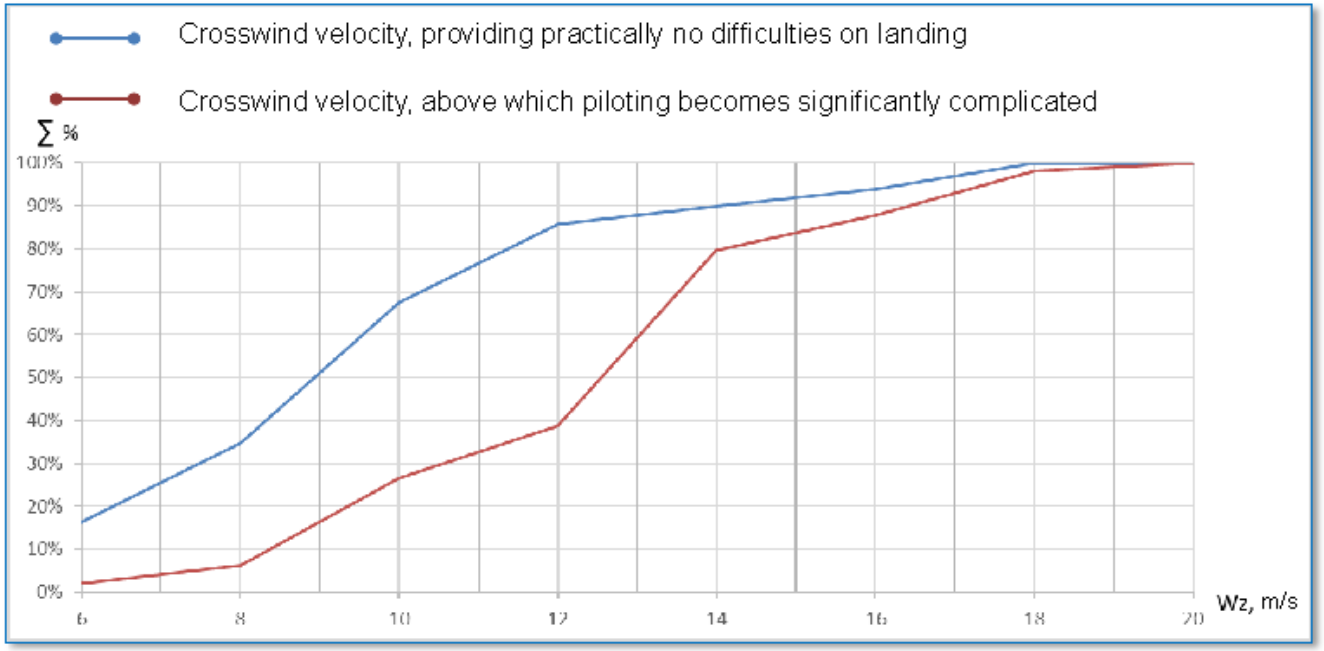
Had you landings with a load factor more than 1.8g in your flight practice (according to objective control)?



Your opinion concerning the criteria of the airline's assessment of landing quality on the value of the maximum load factor at touchdown?

Completely support, gentle landing is an indicator of the pilot's skill	31 %
I support in general, but believe that bigger values of permitted load factors will contribute to improving flight safety	33 %
The criterion should take into account both the value of load factor and the coordinate of the landing touchdown point on the runway	36 %

ESTIMATION OF THRESHOLD VALUES OF CROSSWIND



Crosswind value, at which there is practically no difficulty in landing - <9 m / s

Crosswind value, above which the piloting is significantly more complicated -> 12.5 m / s.

ANALYSIS OF FLIGHT DATA RELATED TO FLIGHT SAFETY

«Traditional post-flight analysis of flight information».

- Control of flight operating limits;
- Control of the execution of prescribed procedures by flight crew;
- Control of aircraft health status.

/ Verification of compliance with FCOM/

«Parametric monitoring».

- "Traditional analysis" + pilot quality assessment.

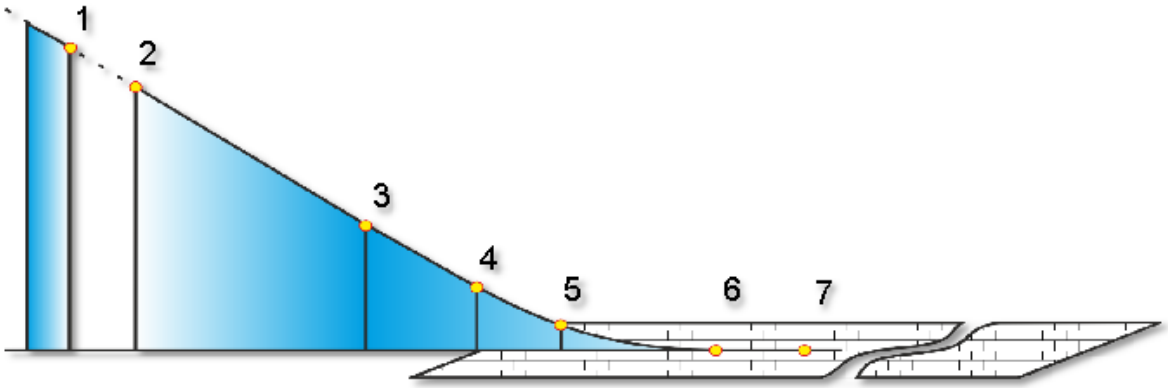
/ FCOM requirements + «perfect flight» theory/

«Identification of hidden threats» - advanced methods for big data analysis.

- «Abnormal» flights identification;
- Identification of aviation accident increased risk.

/Data mining methods/

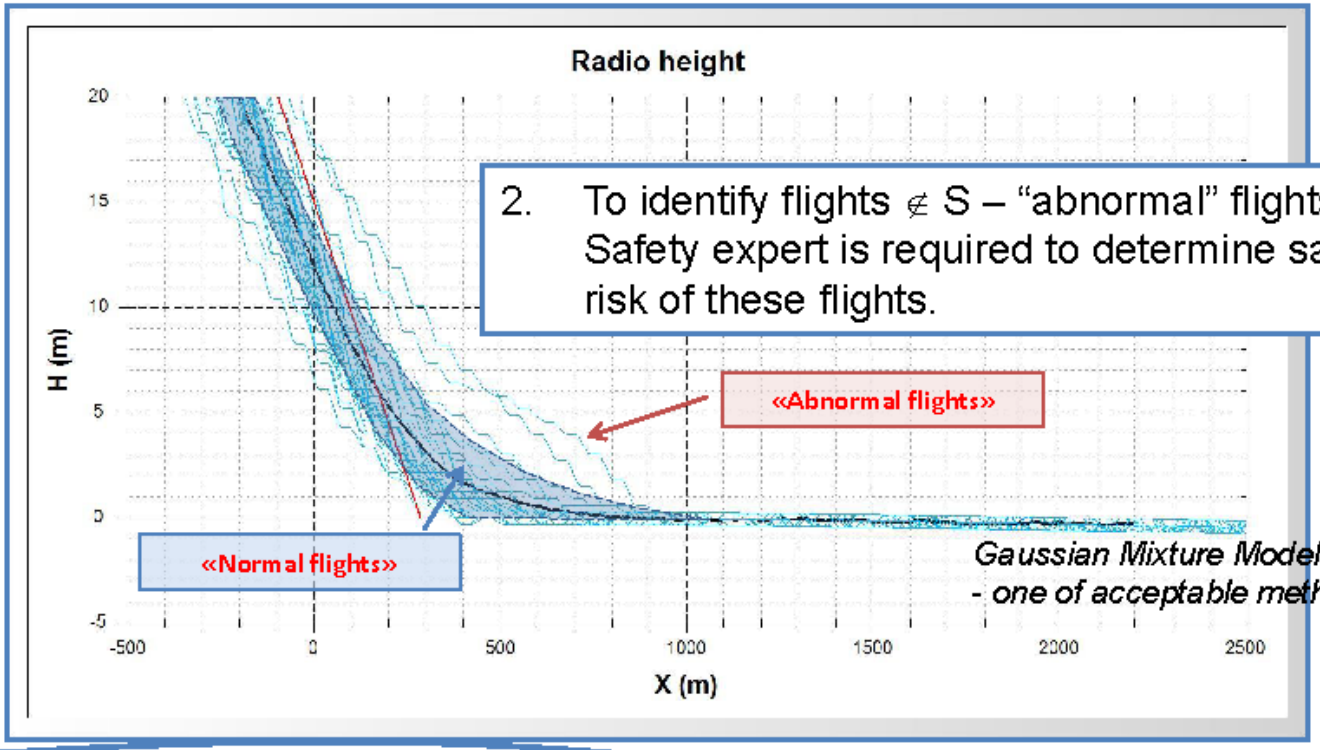
«PARAMETRIC MONITORING» - CHECK POINTS SELECTION FOR LANDING TASK



1 – 1000 ft (stabilized approach control);
2 – 500 ft (stabilized approach control);
3 – Going through inner marker;
4 – Going through RWY threshold (at height of 50 ft);
5 – Flare beginning;
6 – Touchdown moment;
7 – Nose wheel contact with RWY.

«ABNORMAL» FLIGHTS IDENTIFICATION STEPS

1. To identify areas of flight parameters and airplane configurations S = {par1, par2, par3, . . . parN) so that 95% of flights ∈ S.
   S = f(meteo, RWY conditions).



2. To identify flights ∉ S – "abnormal" flights. Safety expert is required to determine safety risk of these flights.

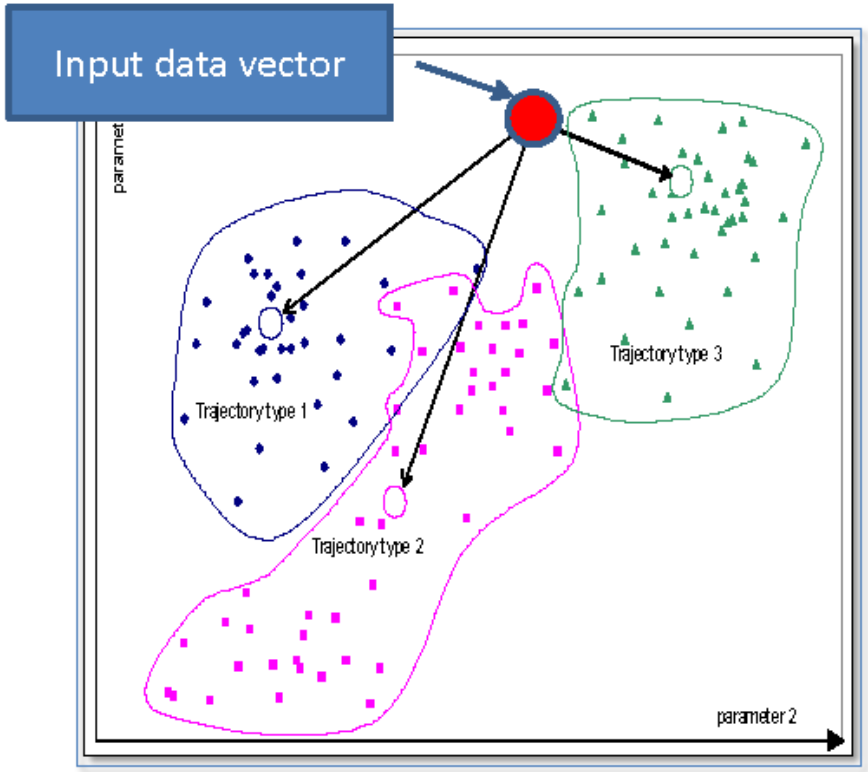
Gaussian Mixture Model (GMM) - one of acceptable methods

IDENTIFICATION OF INCREASED RISK OF AVIATION ACCIDENT BASING ON FLIGHT DATA ANALYSIS

1 “Input data vector" (flight parameters, meteo, etc.) is formed at the flight stage before touchdown

2. Possible options for the situation after touchdown (for example, the type of trajectory or rolling out) are described - "clusters" or "scenarios".

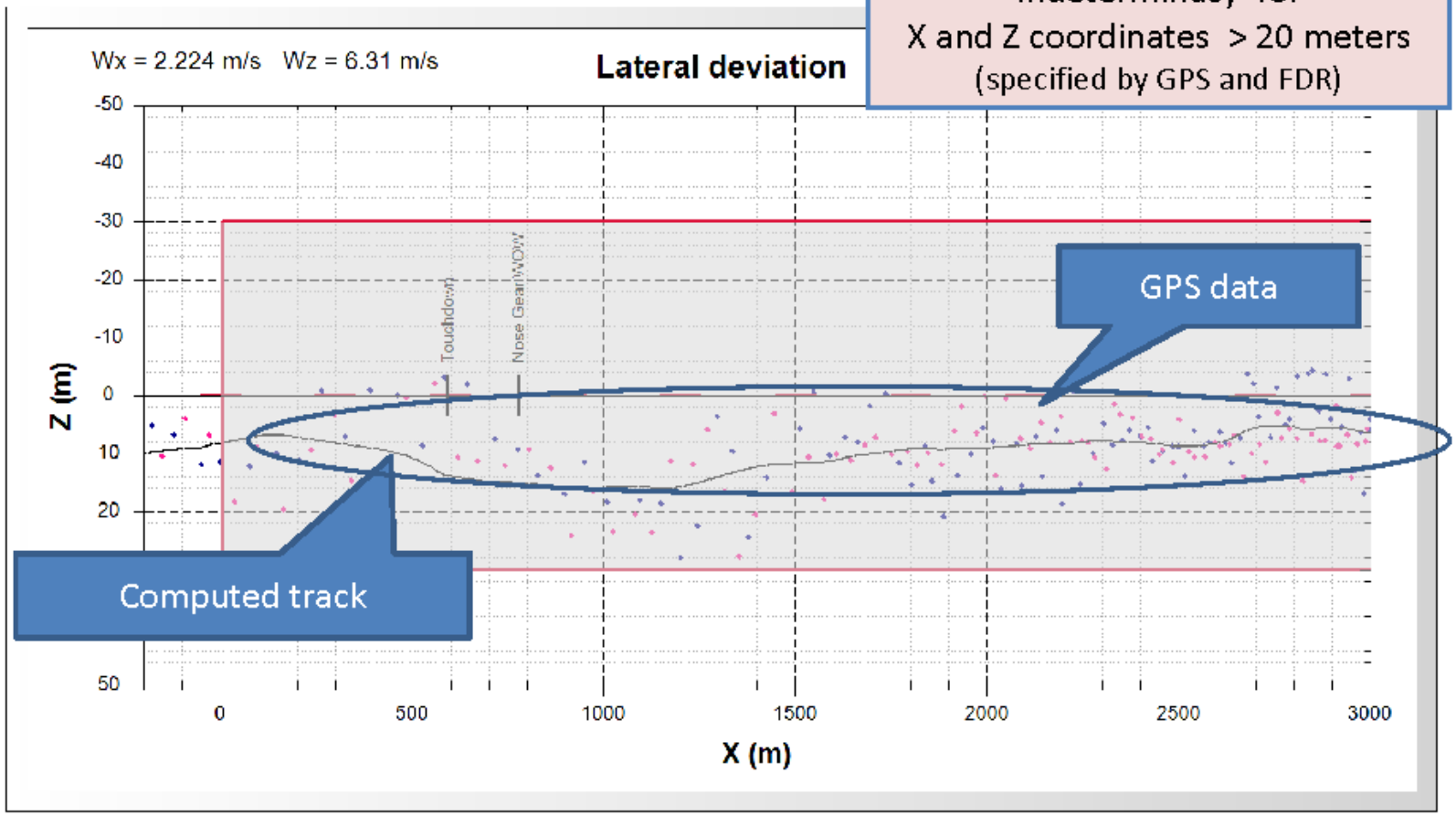
3. Cluster analysis makes it possible to estimate the probability of realizing one of the possible types of "scenarios“.



Representative sample of real flight data is required to assess a risk value (> 1000 flights, depend on the “input data” dimension)

COULD WE SEE A LANDING TRACK IN RECORDED DATA? – NO, WE CAN'T!

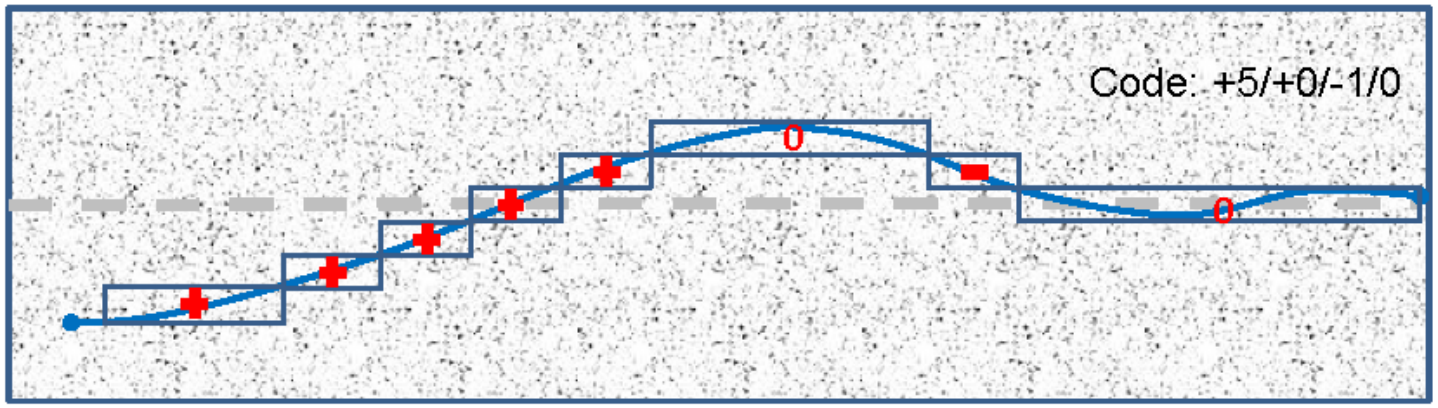
Indeterminacy for
X and Z coordinates > 20 meters
(specified by GPS and FDR)



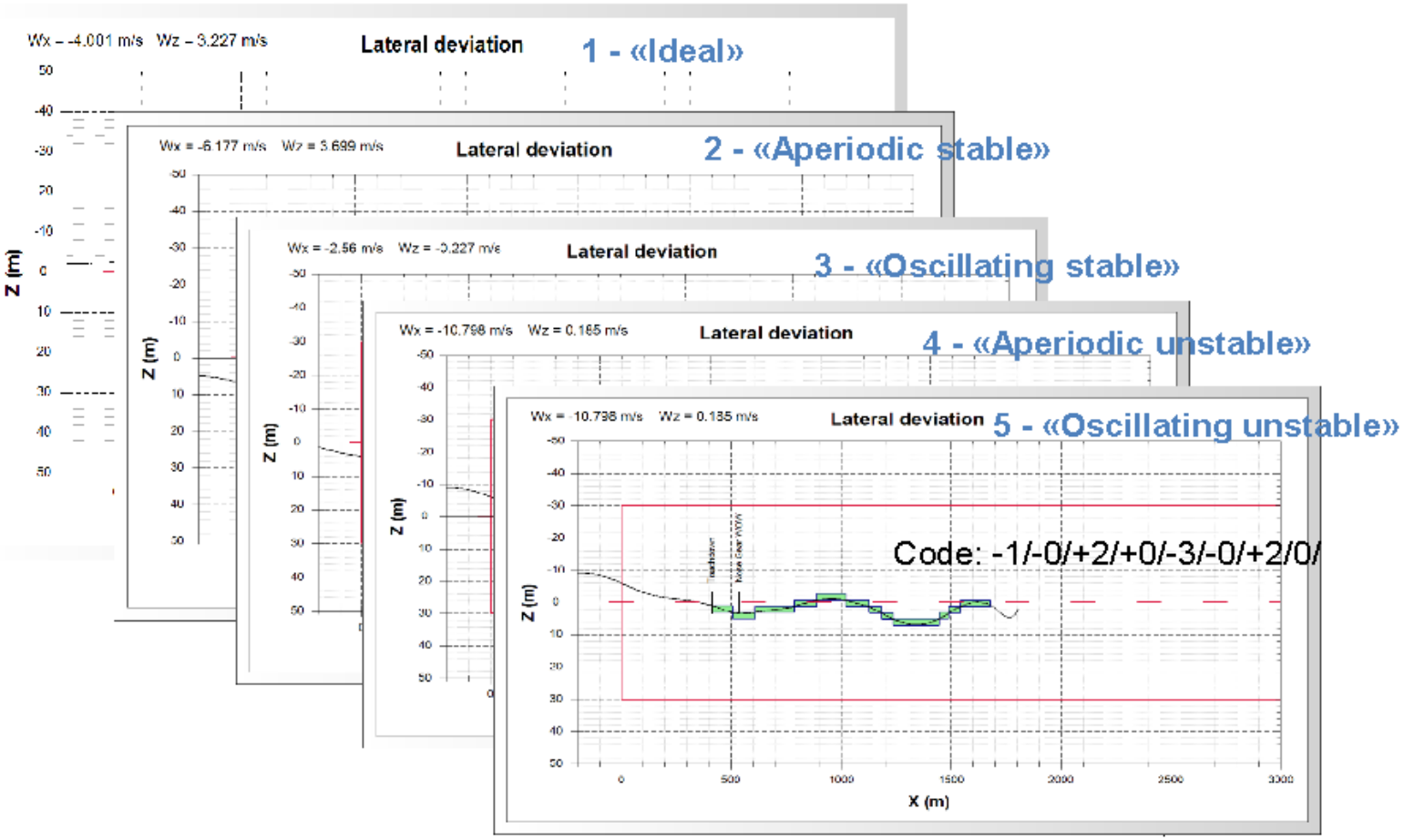
DESCRIPTION OF THE TRAJECTORY

1. **Trajectory is divided into segments of adjusted «height» (the width of lateral deviation interval).**
2. **Each segment is marked by the «sign»: - or 0 or +.**
3. **Trajectory is described by the number of segments and their signs.**

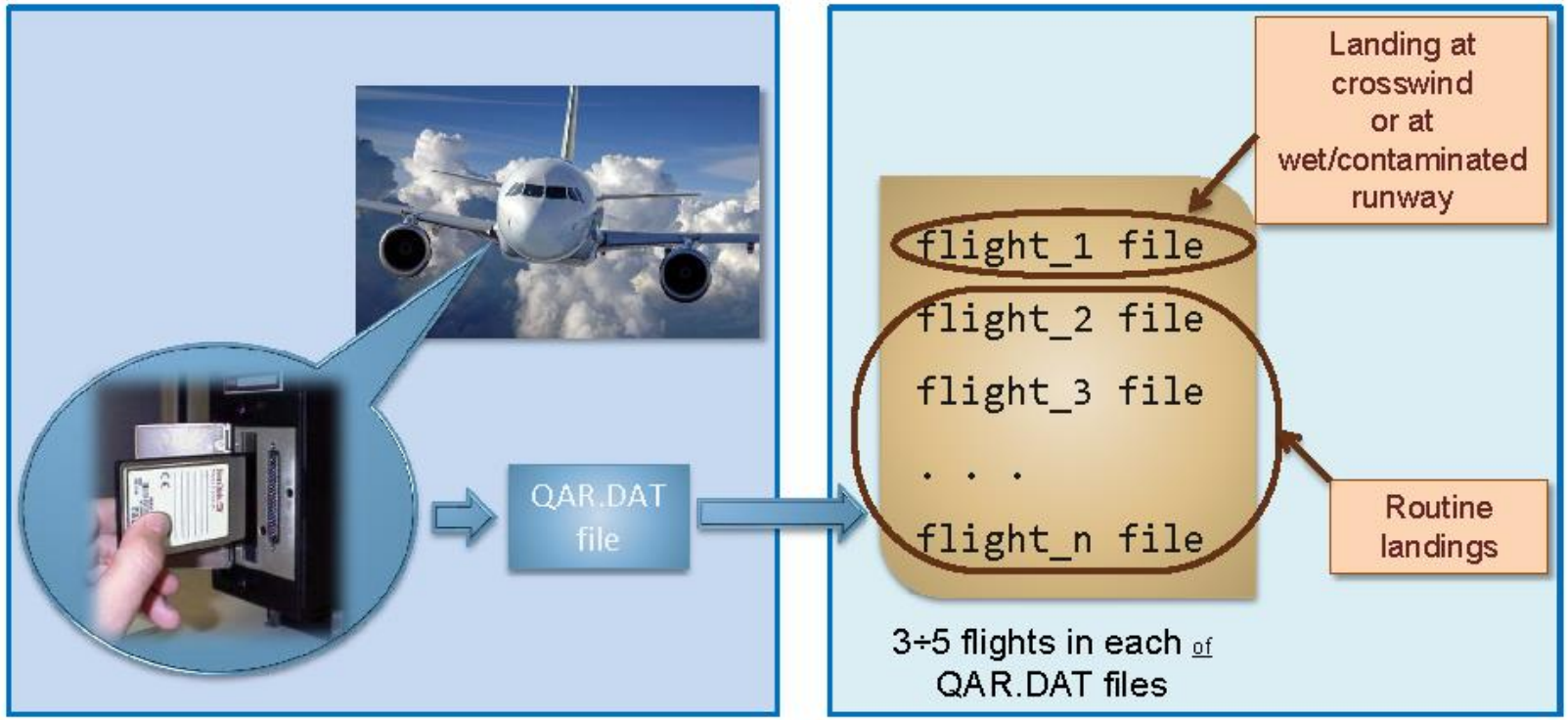
"The less segments, the better".
"Aperiodic trajectory segments have the same sign".
"The number of "zero" segments is the indicator of oscillation".
"Trajectories identification can be automatized!"



GROUND TRACKS CLASSIFICATION



FLIGHT DATA COLLECTION FOR FUTURE PROCESSING



By June 1, 2017

- Number of landings of special interest ~ **500**
- Total number of landings - more than **1300** (airports of the Russian Far East)

FLIGHT DATA PREPROCESSING FOR FURTHER ANALYSIS

1. Splitting QAR/FDR files to individual flights (flight_1, flight_2,…, flight_n);
2. Marking flights with contributing risk factor at landing (contaminated runway and crosswind);
3. Supplementing flight information with data from METAR and other sources.

QAR/FDR → FLIGHT PARAMETERS

METAR DATABASE → METEO, RWY CONDITIONS

OTHER SOURSES → OTHER DATA

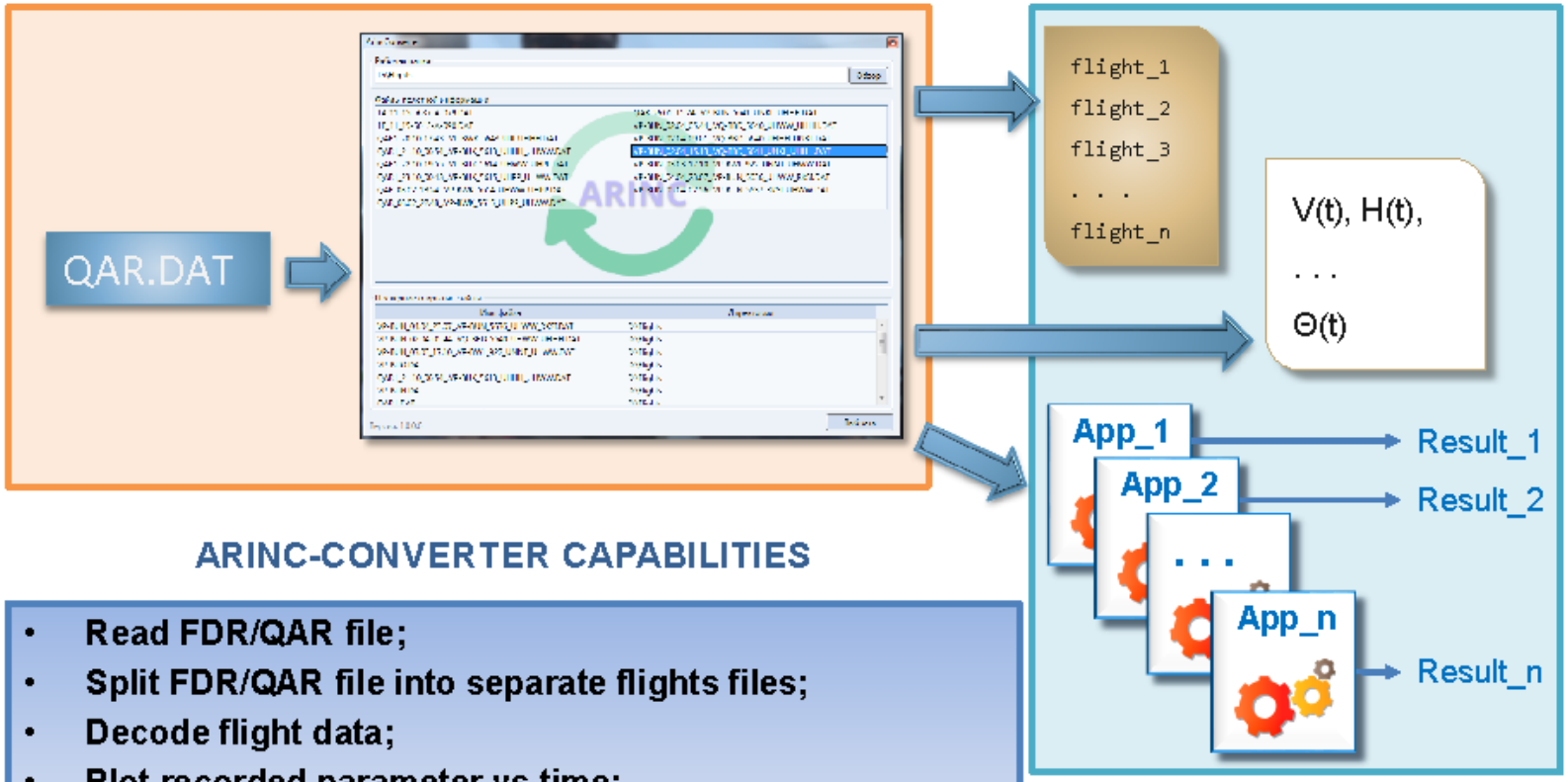
	FLIGHT PARAMETERS			METEO		RWY CONDITIONS		OTHER DATA
flight_1								
flight_2								
…								
…								
…								
flight_n								

ONBOARD SMART SYSTEM FOR LANDING TASK – NEW TECHNOLOGY FOR FLIGHT SAFETY

Prototypes of similar systems:

ROPS (Runway Overrun Prevention System)	Airbus
Smart Landing/Smart Runway (Honeywell)	All types of aircraft

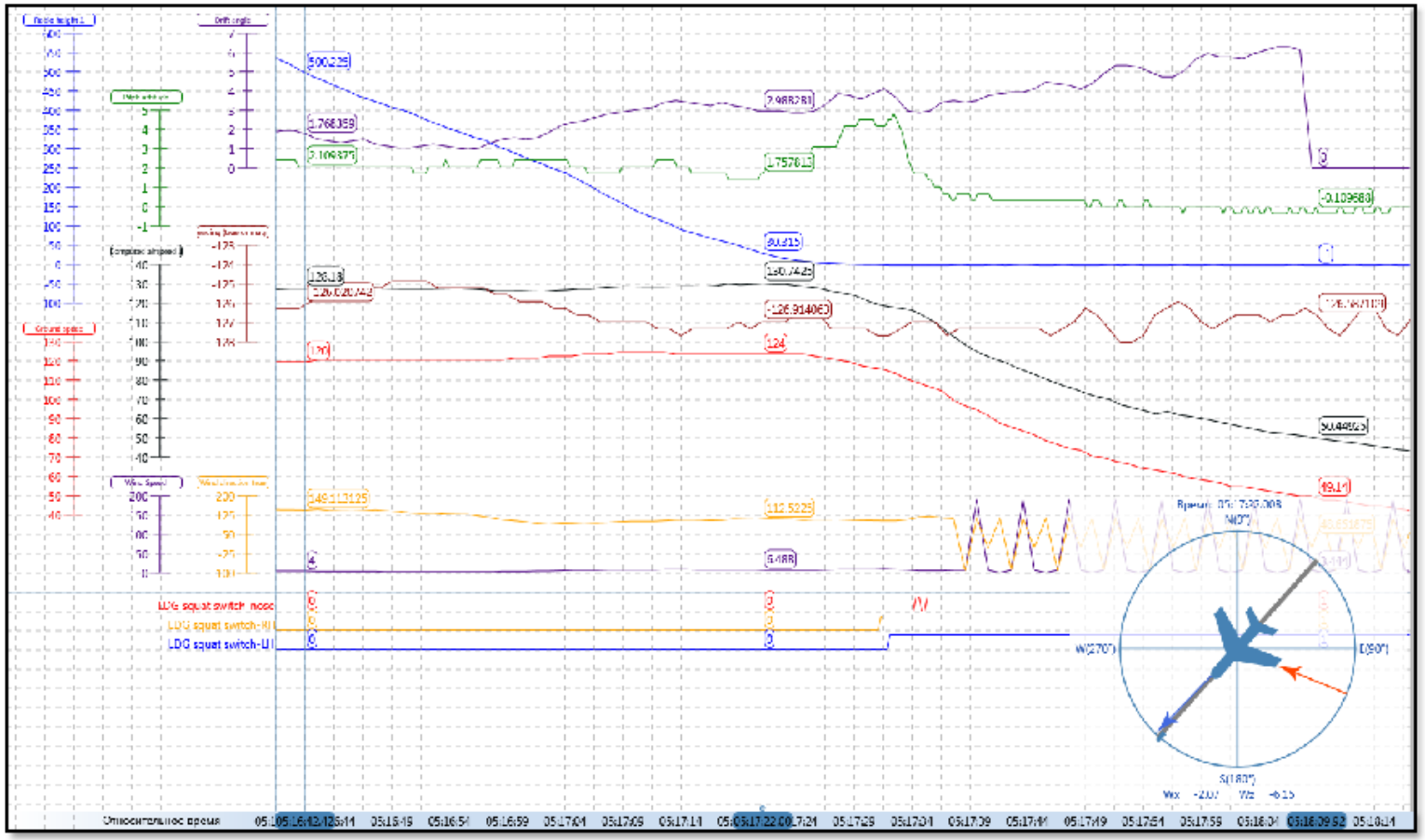
SOFTWARE FOR DATA PROCESSING (ARINC-CONVERTER)



ARINC-CONVERTER CAPABILITIES

- Read FDR/QAR file;
- Split FDR/QAR file into separate flights files;
- Decode flight data;
- Plot recorded parameter vs time;
- Export parameter values into .CSV or .xls file;
- Add user applications.

ARINC-CONVERTER SCREENSHOT



CONCLUSIONS :

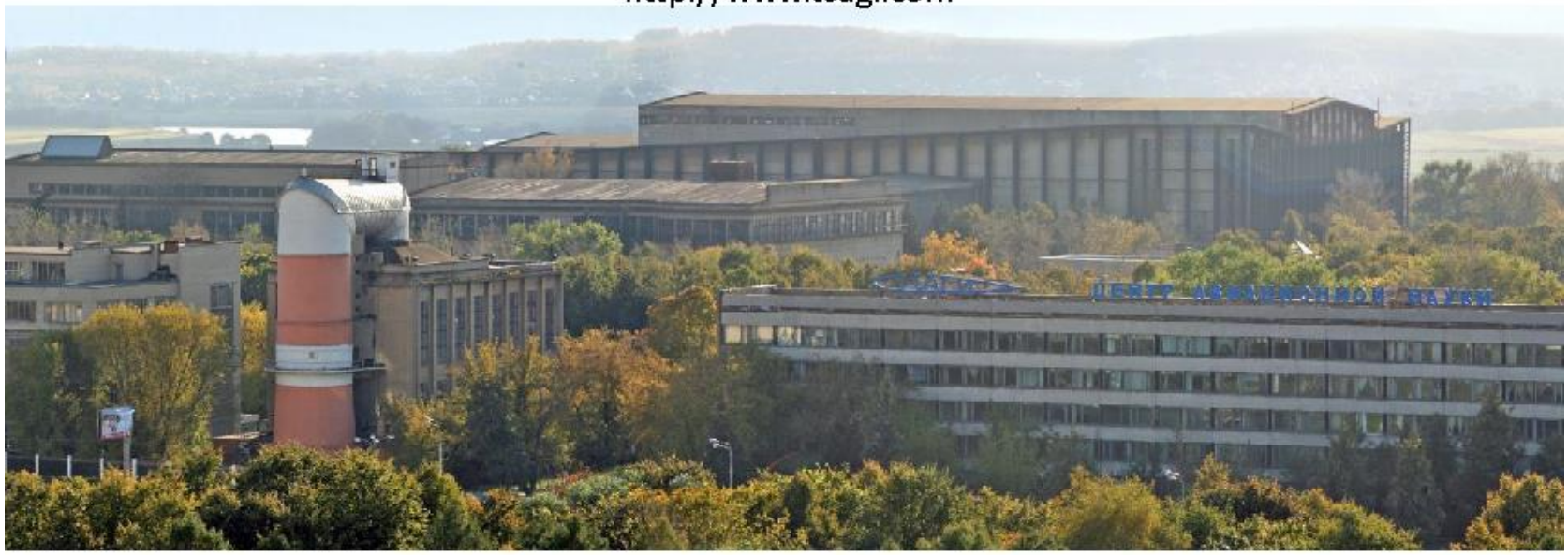
1. The following main results concerning runway safety were obtained last years:

- The analysis of possible combinations of the main risk factors for veer off was performed.
- The directions of further research were detailed basing on pilots questionnaire results.
- The preliminary research for big data analyzing (flight data and relevant information) were performed to identify landing incident/accidents precursors.
- Some activity on development of onboard smart systems for landing task was initiated.
- Software for flight data processing was developed.

2. Close cooperation with aviation authorities, airlines and aviation industry is the main key for successful research in behalf of flight safety.

Thank your for attention!

Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI)
1, Zhukovsky Str., TsAGI, 140180 Zhukovsky, Moscow Region
Russian Federation
Tel.: +7 495 556 4000, Fax: +7 495 777 6332, E-mail: info@tsagi.ru
http://www.tsagi.com



Приложение 4 Стендовый доклад ЦАГИ на рабочей встрече участников программы HORIZON-2020 Future Sky Safety. Кельн 2017 г.

FUTURE SKY SAFETY

Project #3
SPECIFIC SOLUTIONS FOR RUNWAY EXCURSION ACCIDENTS

TsAGI RESEARCH AIMED AT MITIGATING RISK OF RUNWAY EXCURSIONS

Combination of factors

Detailed analysis of METAR archives of 5 Russian aerodromes for period from September 2015 to September 2016 is carried out. It is shown that the combination of a strong crosswind (more than 10m/s) and a slippery runway (braking efficiency worse than "Medium") is a rare situation (less than 1% of landings).

Pilot questionnaire

A questionnaire on the RWY excursion problems was elaborated and used in inquiry of civil aviation linear pilots. It has allowed to assess the significance of the main risk factors and to confirm the relevance of the tasks to be solved in the ongoing studies. The results indicate the need of additional simulations training for landing on a slippery runway conditioned by the crosswind and the necessity to improve simulation quality.

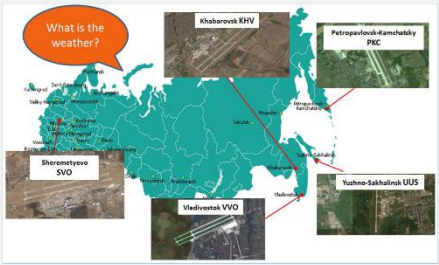
Landing track reconstruction and description

There had been developed a technique for describing the trajectories of an airplane, which is based on the fragmentation of smooth trajectory into segments of given dimension. Track index was proposed to measure the landing run quality.

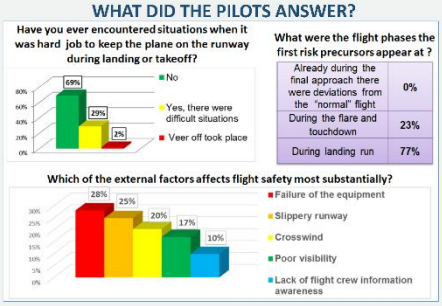
Data mining to identify the abnormal flights

In cooperation with one of the airlines of the Russian Federation, a database and an input data array were developed to test the selected methods of "data mining" in relation to identification of the precursors for aircraft accidents during landing. Gaussian Mixture Model is selected and tested now to identify abnormal flights.

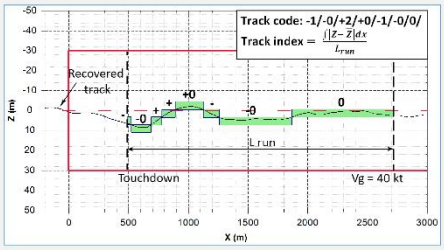
RUSSIAN AIRPORTS UNDER CONSIDERATION



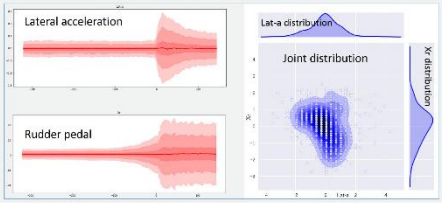
WHAT DID THE PILOTS ANSWER?



HOW TO MEASURE THE LANDING QUALITY?



THIS IS THE FIRST STEP ONLY...



FUTURE SKY SAFETY PROGRAMME
has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 640597.
www.futuresky-safety.eu

PROJECT CONSORTIUM
Project consortium here

Приложение 5 Стендовый доклад ЦАГИ на рабочей встрече участников программы HORIZON-2020 Future Sky Safety. Брюссель 6-7 ноября 2018 г.

FUTURE SKY SAFETY

Project #3
SPECIFIC SOLUTIONS FOR RUNWAY EXCURSION ACCIDENTS

RISK ASSESSMENT OF VEER OFF DURING LANDING

The purpose of study and the data considered

The purpose of this work is to evaluate impact of external factors affecting veer off risk and to get knowledge how to reveal the situations leading to sufficiently increased risk under actual conditions of landing.

The basic factors considered are the following:

- RWY surface contamination type (categorical parameter);
- season (categorical parameter);
- crosswind speed (continuous parameter).

There are considered as veer off preconditions the values of some parameters in some checkpoints of landing trajectory.

The subject of processing are the raw data of on-board parametric recorder and METAR data base containing information about the weather and RWY surface conditions.

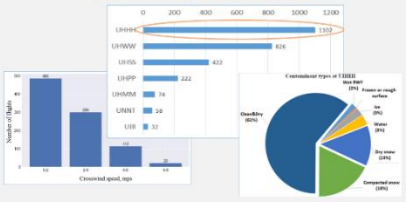
Metrics of landing run

Despite the fact that (generally) frequency of veer off is high enough, it is very difficult in practice to form a representative sample of data suitable for processing based on the methods of applied mathematics.

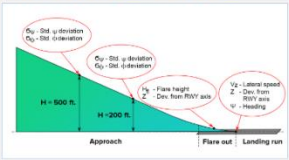
There is proposed some approach of solving the problem, when the risk of veer off is estimated basing on the analysis of successful landings. There is utilized for this purpose new metrics of landing run named as "TrackIndex - TI" which characterizes somehow the deviation of actual landing from its ideal form. It is assumed that the higher value of the metrics corresponds to the greater risk of veer off.

There are taken into consideration a few versions of proposed metrics based on such parameters as: lateral deviation from the runway axis (TI_Z), lateral load factor (TI_{nz}), and rudder pedals position (TI_{Xr}).

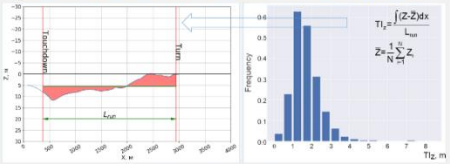
INITIAL DATA FOR ANALYSIS



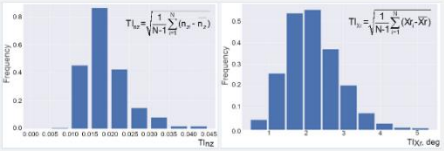
WHERE TO FIND VEER-OFF PRECURSOR?



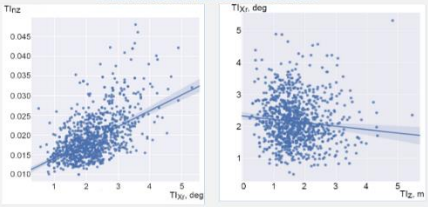
HOW TO MEASURE THE "QUALITY" OF LANDING RUN?



ALTERNATIVE METRICS



METRICS INTERCONNECTION



FUTURE SKY SAFETY PROGRAMME
has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 640597.
www.futuresky-safety.eu

PROJECT CONSORTIUM
ЦАГИ Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI)

RISK ASSESSMENT OF VEER OFF DURING LANDING

Assessment of risk factors and precursors for veer off events

The degree of influence of the considered parameters on landing run metrics may be evaluated by regression methods. The influence of categorical parameters at the metrics value was assessed by using Mann-Whitney test, and the influence of continuous parameters — by Spearman's correlation coefficient.

There are revealed:

- an increase of TI_{nz} metrics value on a snow-covered runway (compared with dry and purified one);
- an increase of the TI_{nz} and TI_{Xr} metrics with an increase in the standard deviations of bank angle or/and yaw angle at the checkpoint on the glide path at a height of 200 feet.

Season influence on the metrics were not found (even in Russian climate).

The results obtained do not contradict data base of observations.

Abnormal landings identification as a way to prevent aircraft veer off events

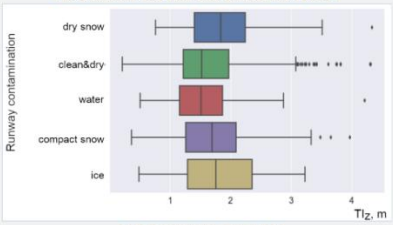
If to assume for considered set of landings, that in each current vertical plane perpendicular to RWY axis flight parameters are distributed according to normal law, it is proposed the following algorithm of current situation assessment:

- if the flight parameters belong to multidimensional "tube" of 2σ width, then the approach may be considered as normal (safe);
- if one of the flight parameters is outside a "tube" of 2σ width, then the approach is considered as "abnormal".

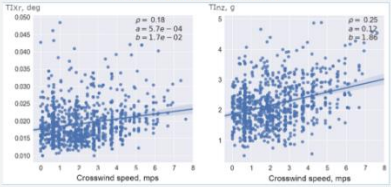
Various machine learning methods may be used to build a multi-dimensional model describing distribution of flight parameters and landing conditions (meteorological and RWY surface conditions) and to detect abnormal landing approaches.

There was used in TsAGI (in particular) the method of describing the multidimensional envelope of flight parameters variations with a mixture of Gaussian distributions (Gaussian Mixture Model - GMM).

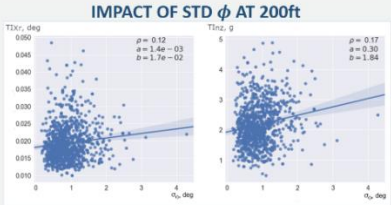
RUNWAY CONTAMINATION IMPACT



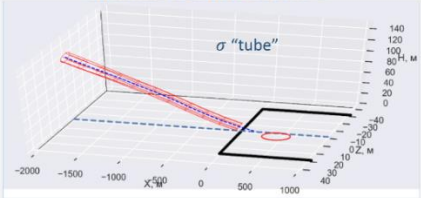
CROSSWIND IMPACT

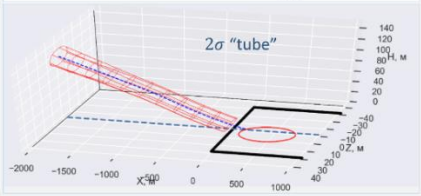


IMPACT OF STD ϕ AT 200ft



"NORMAL" FLIGHTS ENVELOPE





FUTURE SKY SAFETY PROGRAMME
has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 640597.
www.futuresky-safety.eu

PROJECT CONSORTIUM
Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI)

ПРИЛОЖЕНИЕ 6 Презентация к докладу на XXX-ой НТК по аэродинамике

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ОЦЕНКА ЗНАЧИМОСТИ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ И ВЫЯВЛЕНИЕ ПРЕДПОСЫЛОК К ВЫКАТЫВАНИЮ САМОЛЕТА С ВПП НА ПОСАДКЕ

Стрелков В.В., Хайруллин Н.Г.
ФГУП «ЦАГИ»

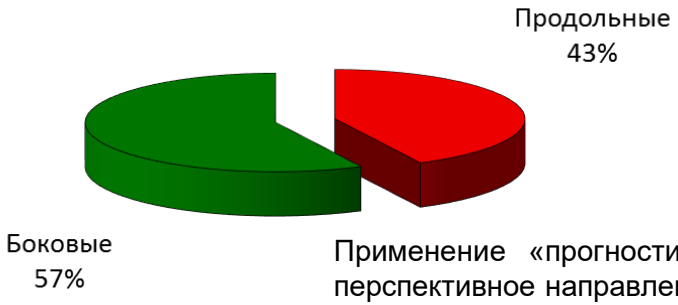
ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Актуальность проблемы и постановка задачи.
2. Внешние факторы и предпосылки к выкатыванию.
3. Данные, доступные для обработки.
4. Методика анализа.
5. Применение методов статистического анализа для оценки внешних факторов и предпосылок к выкатыванию самолета с ВПП.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ ВЫКАТЫВАНИЯ САМОЛЕТА С ВПП

- С 2002 по 2015 год в России произошло 187 случаев выкатывания самолета с ВПП.
- Основные сопутствующие факторы:
  - осадки на ВПП;
  - боковой ветер.

Тип выкатывания



Применение «прогностических» подходов рассматривается как наиболее перспективное направление в области обеспечения безопасности полетов.

Цель работы: отработка методов оценки влияния внешних факторов на риск выкатывания самолета с ВПП и выявления предпосылок к выкатыванию на основании анализа полетных данных.

ФАКТОРЫ РИСКА И ПРЕДПОСЫЛКИ К БОКОВОМУ ВЫКАТЫВАНИЮ

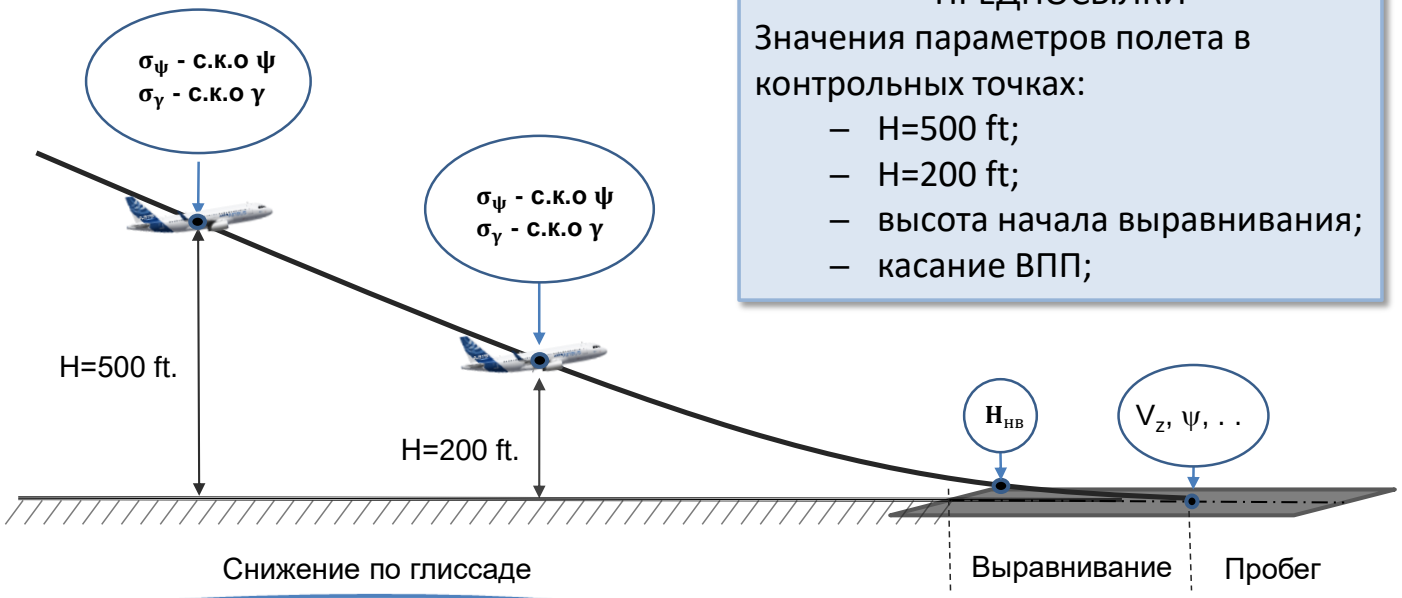
ФАКТОРЫ РИСКА

- Боковой ветер;
- Время года;
- Тип осадков на ВПП.

ПРЕДПОСЫЛКИ

Значения параметров полета в контрольных точках:

- H=500 ft;
- H=200 ft;
- высота начала выравнивания;
- касание ВПП;

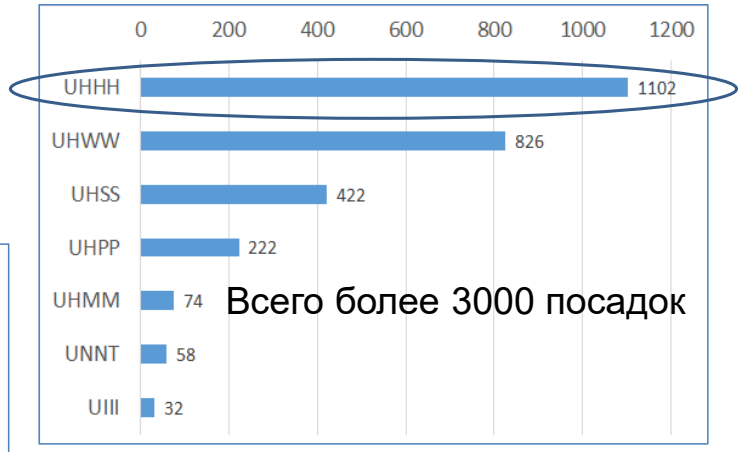


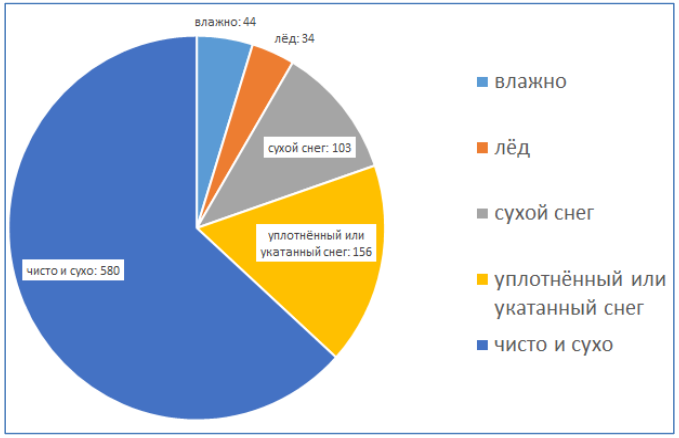
ДАННЫЕ, ДОСТУПНЫЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ

Самолет А-319

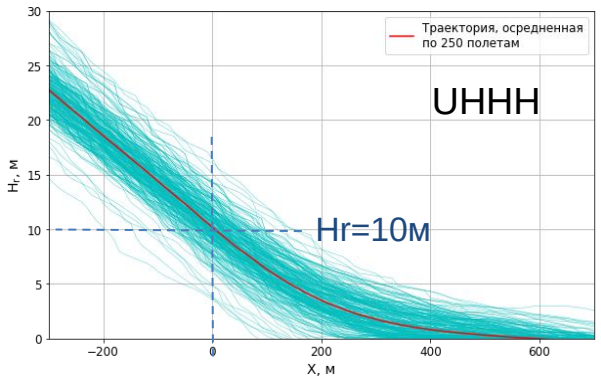
- записи бортового параметрического регистратора (QAR);
- информация о погоде и состоянии ВПП (архивы METAR).

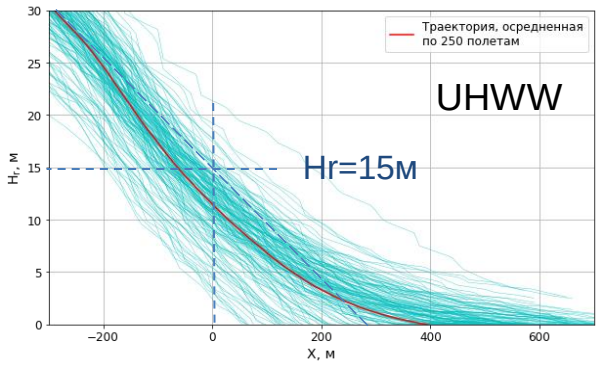
Необходимый этап работы – предварительный анализ и валидация данных

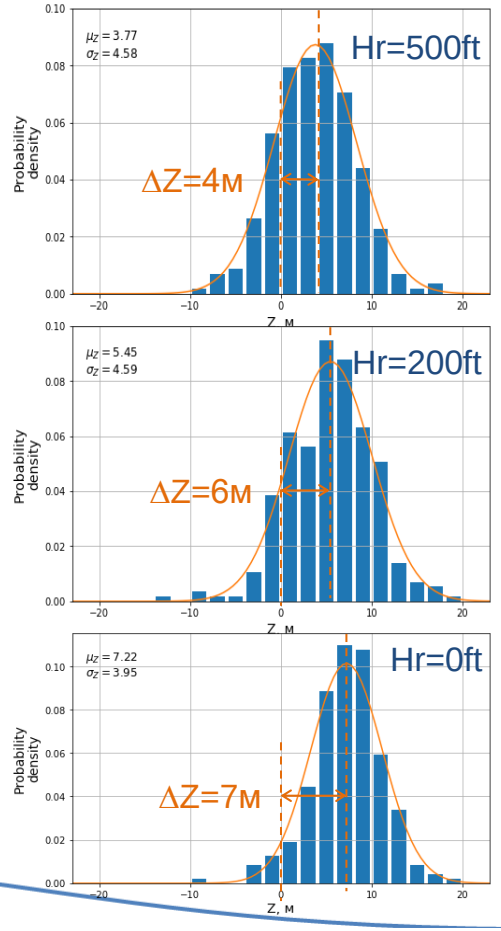




АНАЛИЗ ПЕРВИЧНЫХ ПОЛЕТНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ПОСАДКИ



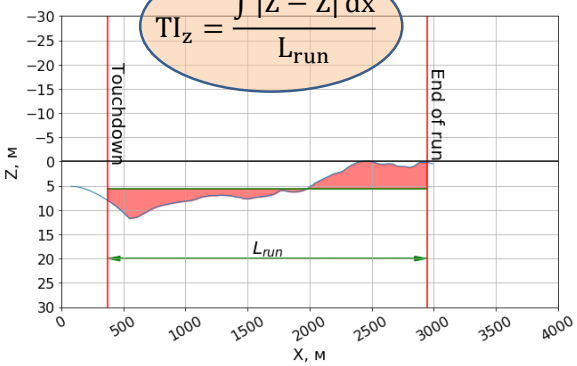


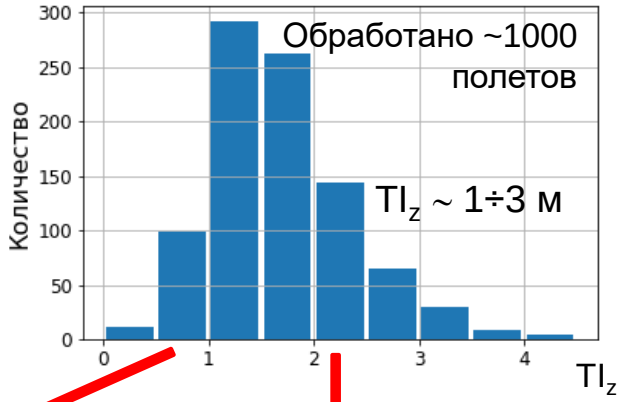


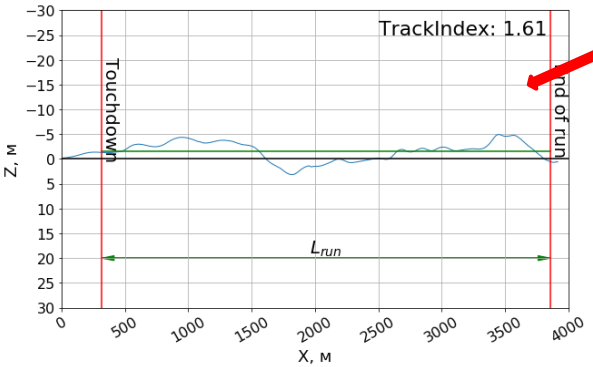
«Проблема» заключается в том, что все эти полеты закончились успешными посадками . . .

МЕТРИКА ТРАЕКТОРИИ ПОСЛЕПОСАДОЧНОГО ПРОБЕГА

$$TI_z = \frac{\int |Z - \bar{Z}|\, dx}{L_{run}}$$







Величина метрики Ti_z отражает характер траектории

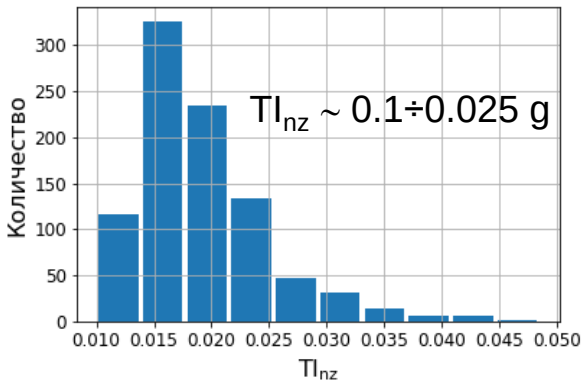
Дополнительные метрики расширяют информацию о пробеге самолета по ВПП

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕТРИКИ ПРОБЕГА

1 Метрика нагрузки на пилота

СКО угла отклонения педалей руля направления на пробеге по ВПП

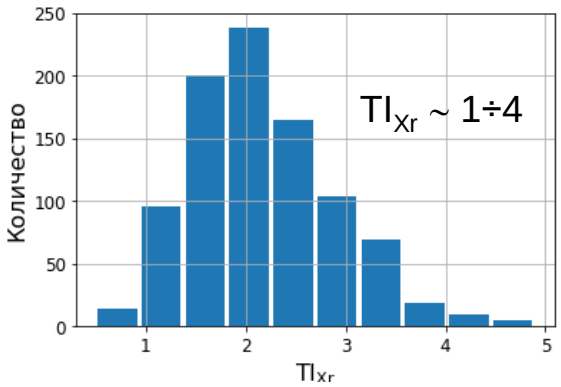
$$\mathrm{TI}_{\mathrm{X_r}} = \frac{1}{n-1}\sqrt{\sum_{i=0}^{n}(X_r - \overline{X_r})}$$



2 Метрика боковой перегрузки

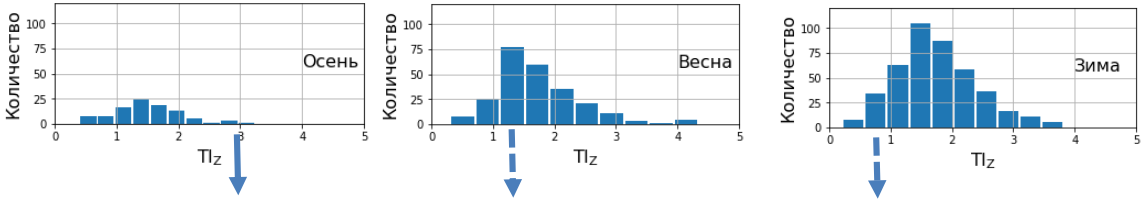
СКО боковой перегрузки на пробеге по ВПП

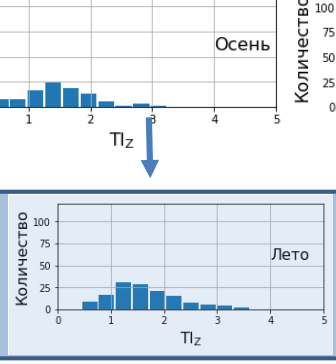
$$\mathrm{TI}_{\mathrm{n_z}} = \frac{1}{n-1}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(n_z - \overline{n_z})}$$



Существуют методы анализа данных, которые позволяют оценить влияние факторов риска на выбранные метрики

ВЛИЯНИЕ КАТЕГОРИАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ НА МЕТРИКИ





Критерий Манна-Уитни
scipy.stats.mannwhitneyu

$\tilde{U}$ - статистика
pval – достигаемый уровень значимости

Условие значимого различия выборок: $\tilde{U} > 2\sigma \equiv \mathbf{pval} < 0.05$

Влияние времени года на TI_z:

	Лето		
	$\tilde{U}$	pval	
Осень	-1.79	0.963	x
Зима	1.59	0.135	x
Весна	1.1	0.055	x

Время года не влияет на $\mathbf{TI_z}$

Влияние загрязнения на TI_z:

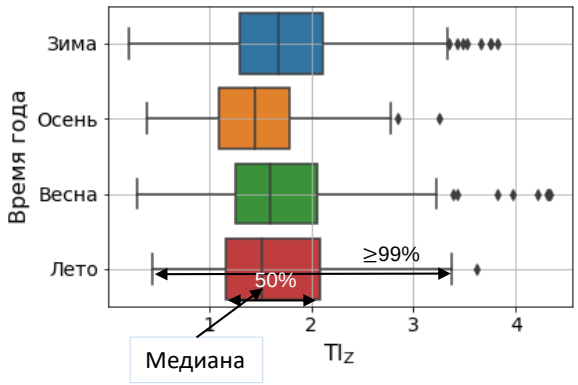
	чисто и сухо		
	$\tilde{U}$	pval	
сухой снег	3.55	0.00019	v
влажно	-0.87	0.8	x
уплотненный снег	1.47	0.07	x

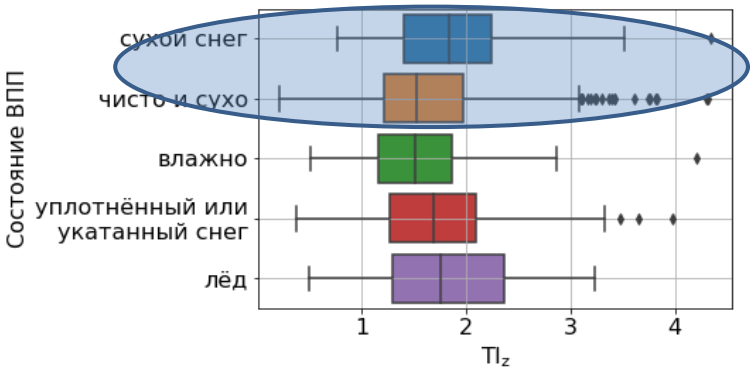
Наличие снега значимо увеличивает $\mathbf{TI_z}$

ВЛИЯНИЕ КАТЕГОРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА МЕТРИКИ

«Коробочная диаграмма» – инструмент для визуального сравнения выборок:

- средняя линяя является медианой;
- в «коробке» содержится 50% выборки;
- обозначенный линейный интервал содержит не менее 99% выборки.



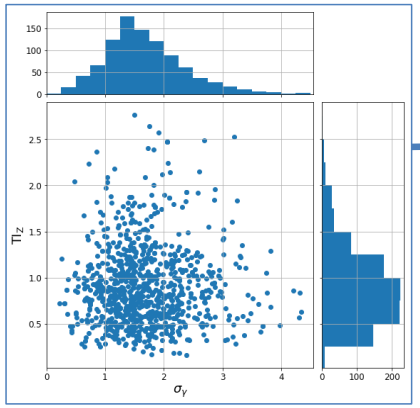


Критерий Манна-Уитни не выявил значимых различий распределений метрики TI_Z при смене времени года

Критерий Манна-Уитни выявил увеличение TI_Z при сухом снеге Увеличение составило 0.25 м

ВЛИЯНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА МЕТРИКИ

Совместное распределение F(x,y)



Существует ли значимая зависимость y(x)?

Критерий Спирмена
scipy.stats.spearmanr

ρ – коэффициент корреляции
pval – достигаемый уровень значимости

Условие значимой зависимости Y(X):
$|\rho| > 0.066 \leftrightarrow pval < 0.05$ при $n > 900$

Влияние параметров полета на TI_z:

		ρ	pval	
500 ft	σ_ψ	-0.005	0.76	x
	σ_γ	0.01	0.87	x
200 ft	σ_ψ	-0,016	0.83	x
	σ_γ	-0.007	0.61	x

$$TI_z \nsim \sigma_\psi, \sigma_\gamma$$

Влияние параметров полета на TI_{Xr}:

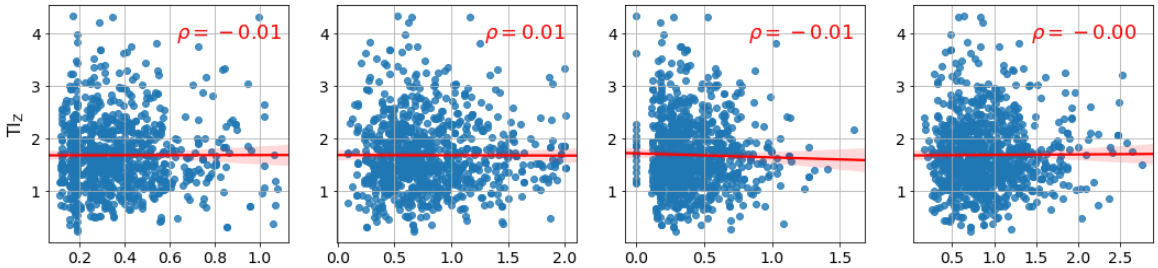
		ρ	pval	
500 ft	σ_ψ	0.115	0.005	v
	σ_γ	0.109	0.002	v
200 ft	σ_ψ	0.175	$2*10^{-6}$	v
	σ_γ	0.164	$3*10^{-7}$	v

$$TI_{Xr} \sim \sigma_\psi, \sigma_\gamma$$

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРЕДПОСЫЛОК К ВЫКАТЫВАНИЮ

Ti_z

H = 500 ft | H = 500 ft | H = 200 ft | H = 200 ft

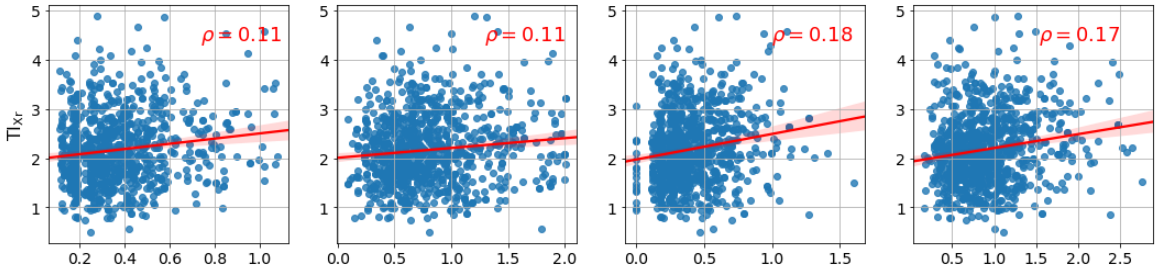


σ_ψ | σ_γ | σ_ψ | σ_γ

ДИАГРАММЫ РАССЕЯНИЯ «МЕТРИКА - ПАРАМЕТР ПОЛЕТА»

Ti_{Xr}

H = 500 ft | H = 500 ft | H = 200 ft | H = 200 ft

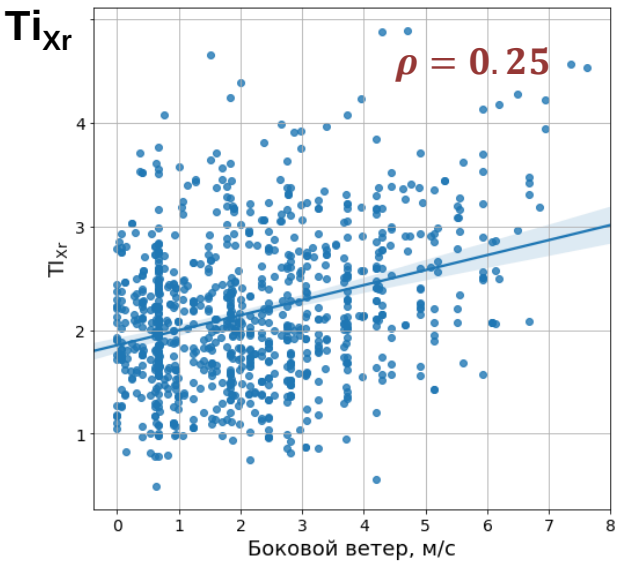


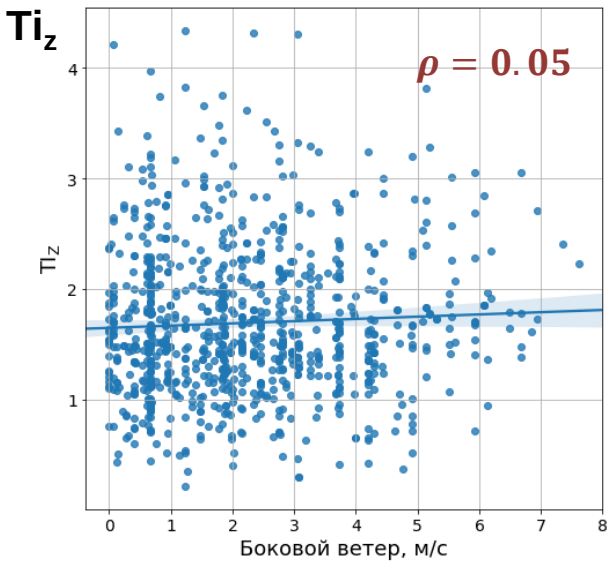
σ_ψ | σ_γ | σ_ψ | σ_γ

σ_ψ, σ_γ - могут рассматриваться как индикаторы нагрузки на пилота при управлении на пробеге

ВЛИЯНИЕ БОКОВОГО ВЕТРА НА МЕТРИКИ ПРОБЕГА

- Выявлена зависимость метрик TI_{Xr} и TI_{nz} от скорости бокового ветра.
- Величина метрики траектории не зависит от скорости бокового ветра.





ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика оценки значимости факторов риска и предпосылок к выкатыванию самолета за боковую кромку ВПП на основании анализа полетных данных.
2. Для отработки методики сформирован массив данных с параметрами полета и информацией о погоде и состоянии ВПП.
3. Предложены варианты метрики послепосадочного пробега.
4. Продемонстрирована возможность применения критерия Манна-Уитни и коэффициента корреляции Спирмена для оценки влияния факторов риска и на величину метрики.
5. Результаты, полученные с использованием рассмотренных методов статистического анализа, не противоречат имеющимся наблюдениям, что подтверждает косвенным образом работоспособность предложенной методики и выбранных методов анализа.
6. Предложенные методики будут применены при разработке бортовых систем ситуационной осведомленности.

Приложение 7 Стендовый доклад на XXX-й НТК по аэродинамике

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И КОДИРОВКА ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЕ САМОЛЕТА НА ПОСАДКЕ И ПРОБЕГЕ ПО ВПП

В.В. Стрелков, Д.С. Емельянов (ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский), Е.Б. Горский (АО «ЛИИ», г. Жуковский)

Вопрос необходимости анализа траектории движения самолета в горизонтальной плоскости на этапе снижения самолета по глиссаде, выравнивании и движении по ВПП периодически возникает при расследовании таких авиационных происшествий как выкатывание самолета с ВПП. Статистический анализ траекторий движения самолета на заключительном этапе посадки лежит в основе разрабатываемых в настоящее время методов прогнозирования повышенного риска выкатывания самолета с ВПП. Проблема в том, что сегодня мы не знаем этой траектории.

На борту самолета регистрируются широта и долгота, которые можно пересчитать в координаты самолета относительно земной системы координат, связанной с ВПП посадки самолета. Преобразование координат выполняется по правилам обратной геодезической задачи. Пересчеты выполняются через промежуточную прямоугольную систему с началом в центре масс Земли. Однако, несколько обстоятельств не позволяют в итоге такого пересчета получить гладкую траекторию движения самолета относительно ВПП:

1) Дискретность регистрации широты и долготы по времени. Как правило, частота регистрации составляет 1 гц для каждой из бортовых GPS.

2) Дискретность регистрации широты и долготы по уровню сигнала, которая определяется ценой младшего разряда (ЦМР). В ряде регистраторов, даже относительно современных самолетов, ЦМР в пересчете на метры может измеряться десятками метров.

3) Погрешность определения координат в стандартном (автономном) режиме GPS составляет 9 м для 95% измерений в среднем по земному шару и 17 м для наихудшего местоположения, что сравнимо с шириной ВПП.

На рисунке 1 показан результат пересчета геодезических координат в координаты самолета относительно ВПП. Вследствие погрешностей GPS можно говорить лишь о некотором коридоре в котором лежит фактическая траектория движения самолета.

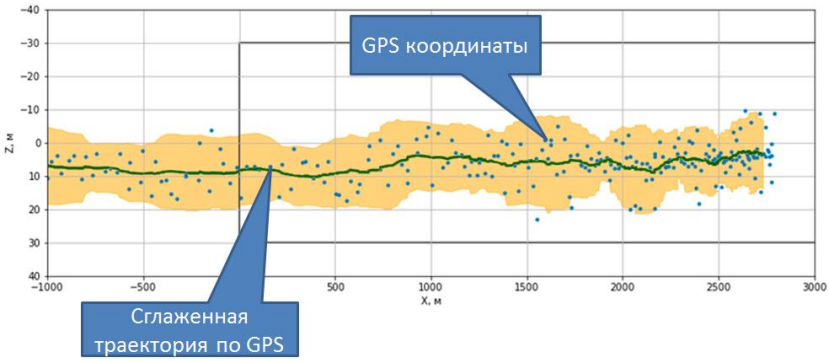


Рис. 1. Область, в которой лежит фактическая кривая, а также кривая, полученная методом сглаживания апериодическими фильтрами координат GPS.

Траектория, полученная осреднением пересчитанных координат, не отражает реальной динамики самолета на ВПП, поэтому не может быть использована для анализа качества выполнения послепосадочного пробега.

В настоящей работе рассматривается вариант восстановления траектории методом интегрирования составляющих вектора путевой скорости, регистрируемых на борту:

$$X = X_0 + \int (V_п + \Delta V_п) * \mathrm{Cos}(\varphi + \Delta\varphi)dt;$$

$$Z = Z_0 + \int (V_п + \Delta V_п) * \mathrm{Sin}(\varphi + \Delta\varphi)dt;$$

Путевой угол определяется как: $\varphi = \psi_м + \alpha_{ск} + \varepsilon - \psi_{ВПП}$,

где $\psi_м$ - магнитный курс,

$\alpha_{ск}$ – магнитное склонение,

ε - угол сноса, $\psi_{ВПП}$ – курс ВПП,

$\Delta V_п$ - погрешность измерения $V_п$,

$\Delta\varphi$ - погрешность измерения φ.

Использование некоторых специальных приемов позволило повысить точность и надежность получения траектории движения до такого уровня, что процедура восстановления может быть полностью автоматизировано.

Чтобы уменьшить ошибки при восстановлении траектории, интегрирование выполняется относительно момента обжатия носовой стойки шасси в прямом и обратном времени. Однако, траектория, восстановленная таким образом, в общем случае оказывается развернутой на некоторый угол и вытянутой/сжатой в продольном направлении (рис. 2), что объясняется наличием погрешностей путевого угла и путевой скорости, которые требуется учитывать.

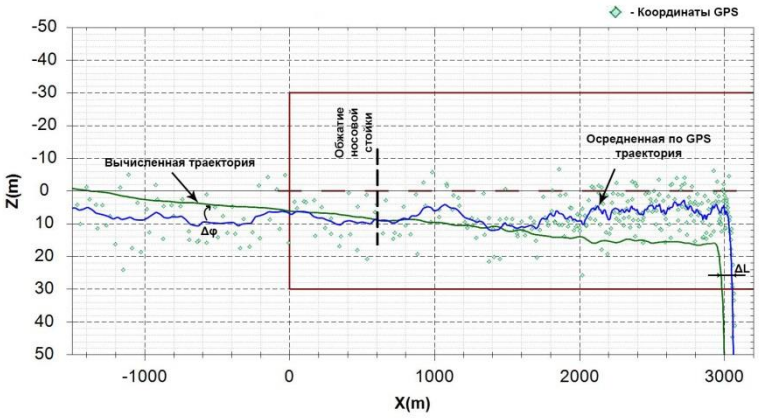


Рис. 2. Восстановленная с помощью интегрирования траектория смещена относительно осредненной по GPS траектории.

Путем сравнения осредненной по GPS траектории с траекторией, полученной в результате интегрирования, можно вычислить разницу путевого угла, на который следует довернуть восстановленную траекторию. Таким образом, вычисленная траектория поворачивается на тот же угол, что и осредненная по GPS. Для устранения смещения в продольном направлении, необходимо определить и учесть в подынтегральном выражении погрешности измерения путевой скорости. Для решения этой проблемы был выбран метод наименьших квадратов, применяемый на 20 секундных интервалах.

Полученная таким образом траектория лежит внутри доверительного интервала и весьма близка к траектории, осредненной по GPS.

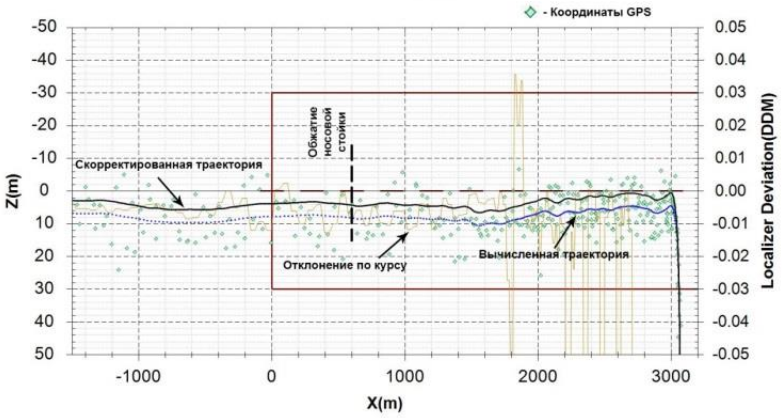


Рис. 3. Коррекция траектории по оси Z сравнением с показаниями ILS.

Однако из-за систематических погрешностей GPS вычисленная траектория может оказаться смещенной относительно оси ВПП. С целью уточнения положения восстановленной траектории относительно оси ВПП дополнительно используется сдвиг траектории по оси Z в соответствии с зарегистрированными показаниями курсоглиссадной системы (рис. 3).

Таким образом, предложенная методика восстановления траектории движения самолета в горизонтальной плоскости позволяет получить гладкую траекторию, пригодную для анализа процесса посадки.

Из всего многообразия траекторий, условно можно выделить несколько типов:

– «Идеальная» - траектория с приземлением самолета вблизи оси ВПП и последующим послепосадочным пробегом при малом отклонении от оси ВПП;
– «Апериодически сходящаяся» - траектория с приземлением в стороне от оси ВПП и приближающаяся к оси ВПП без каких-либо заметных колебаний;
– «Колебательно сходящаяся» - траектория с приземлением в стороне от оси ВПП и приближающаяся к оси ВПП, но с колебательным характером движения;

– «Колебательно расходящаяся» - траектория с приземлением самолета вблизи или в стороне от оси ВПП и расходящимися колебательными движениями;
– «Апериодически расходящаяся» - траектория с приземлением самолета вблизи или в стороне от оси ВПП и последующим удалением от оси ВПП.

Фактическая траектория может содержать в себе фрагменты всех перечисленных выше типов.

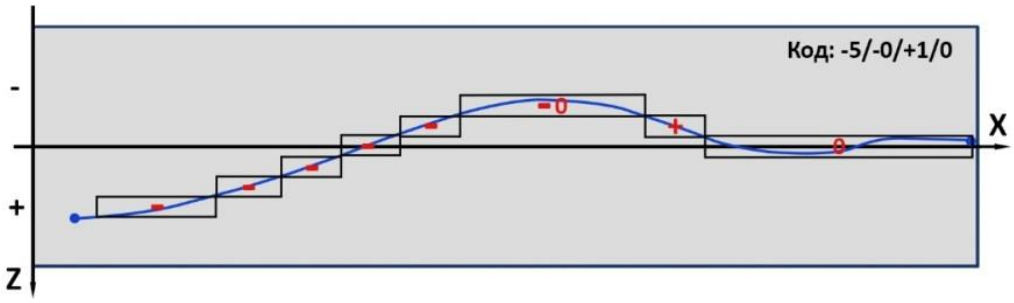


Рис. 4. Описание траектории дискретным кодом.

Для анализа предлагается описывать траекторию коротким и информативным кодом (рис. 4). Данный способ кодировки ориентирован на решение конкретной задачи – выявление и описание отклонений конкретной траектории послепосадочного пробега от «идеальной» траектории. Это позволило сделать код более компактным и информативным. Для этого нужно разбить траекторию на прямоугольные сегменты, каждый из которых описывается знаком. «0» - исходный сегмент установившегося прямолинейного движения. «+» и «-» - сегменты с положительным и отрицательным градиентом. «+0» и «-0» - сегменты, показывающие изменение градиента. Первый сегмент начинается с момента приземления самолета. Таким образом, траектория описывается количеством сегментов и их типом. Данный подход имеет ряд преимуществ. Полученный код информативен, данную процедуру легко автоматизировать. По коду можно восстановить характер траектории.

Код траектории зависит от выбранной ширины сегмента. При большой ширине сегмента код становится коротким и теряет информативность; уменьшение ширины сегмента повышает информативность кода, но количество сегментов в коде увеличивается, соответственно увеличивается длина записи кода траектории. В результате расчетных исследований было показано, что оптимальная ширина сегмента порядка двух метров. Это позволяет отследить значимые изменения траектории, при этом сохраняет «читаемость» кода.

Код траектории позволяет сразу увидеть и выделить из общего списка те траектории, которые представляют интерес с точки зрения наличия в них предпосылок к боковому выкатыванию самолета.

ПРИЛОЖЕНИЕ 8 Статья в Трудах МФТИ

УДК 533.6.015

В. В. Стрелков[1], *Н. Г. Хайруллин*[1], *О. А. Бутырин*[2]

[1]Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского
[2]ОАО «Авиакомпания «Аврора»

Применение методов статистического анализа для решения задачи оценки влияния различных факторов на риск выкатывания самолета со взлетно-посадочной полосы при посадке

Работа связана с решением актуальной проблемы из области безопасности полетов, а именно с предотвращением выкатывания самолета со взлетно-посадочной полосы (ВПП) при посадке. Целью работы является оценка значимости внешних факторов риска и выявление предпосылок к выкатыванию самолета с ВПП на основании анализа текущих параметров полета и другой доступной информации. Предметом исследования являются фактические данные о посадках пассажирского самолета и архивы METAR с информацией о погоде и состоянии ВПП.

Ключевые слова: безопасность полёта, выкатывание самолёта с ВПП, полётные данные, интеллектуальный анализ информации, выявление корреляций.

V. V. Strelkov[1], *N. G. Khairullin*[1], *O. A. Butyrin*[2]

[1]N. E. Zhukovsky Central Aerohydrodynamic Institute
[2]Aurora Airlines

Statistical analysis application for assessment of some factors impact on runway excursion risk

The work is connected with the solution of a current problem in the field of flight safety, namely, preventing runway excursion of aircraft during landing. The aim of the work is to evaluate the significance of external risk factors and identify the prerequisites runway excursion by using analysis of current flight parameters and other available information. The subject of the research is actual flight data of passenger aircraft and METAR archives with weather and information about the runway state.

Key words: flight safety, aircraft runway excursion, flight data, data mining, correlation analysis.

1. Введение

Грубые посадки и выкатывания самолета с ВПП составляют группу наиболее распространенных типов авиационных происшествий. В мире еженедельно фиксируется в среднем два случая выкатывания самолета с ВПП, в Российской федерации ежегодно регистрируется 10 12 подобных случаев [1]. По статистике более 80% выкатываний происходят на посадке, выкатывания за торец ВПП и за боковую кромку распределены примерно поровну. Эти происшествия могут сопровождаться человеческими жертвами, повреждениями самолета и наземной инфраструктуры, нарушениями в работе аэропортов. Уменьшение количества происшествий на ВПП является одной из приоритетных задач ICAO. В настоящее

© Стрелков В. В., Хайруллин Н. Г., Бутырин О. А., 2019
© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 2019

время разработаны и внедряются технические решения, направленные на предотвращение выкатываний самолета за торец ВПП, в то время как боковые выкатывания остаются малоизученными.

Среди возможных способов снижения риска выкатывания самолета с ВПП рассматривается и применение технологий прогнозирования риска такого авиационного происшествия на основе анализа совокупности данных о посадке самолета на конкретный аэродром при фактических метеоусловиях и состоянии взлетно-посадочной полосы.

Можно говорить о факторах риска и предпосылках к авиационному происшествию. К факторам риска относятся внешние условия, не зависящие от экипажа (время года, метеоусловия, схема захода на посадку, характеристики и состояние ВПП и т.д); в качестве предпосылок рассматриваются параметры полета или действия экипажа в некоторые моменты времени, предшествующие приземлению самолета.

В настоящей работе ставится задача «взвесить» влияние внешних факторов и оценить возможные предпосылки к выкатыванию самолета за боковую кромку ВПП с тем, чтобы научиться выявлять в реальных условиях ситуации с повышенным риском такого авиационного происшествия. К числу рассматриваемых внешних факторов относятся следующие: время года, тип осадков на ВПП, боковой ветер. В качестве возможных предпосылок рассматриваются величины средеквадратических отклонений углов крена и курса самолета в контрольных точках – на высотах 500 футов и 200 футов над поверхностью ВПП (рис. 1). Логика выбора именно этих параметров как индикаторов повышенного риска бокового выкатывания достаточно простая: проблемы в путевом и поперечном движении при снижении по глиссаде прежде всего могут отразиться на траектории движения самолета после приземления (характере движения относительно оси ВПП). Первая контрольная точка выбрана на высоте 500 футов – самолет находится на посадочной глиссаде и в соответствии с общепринятыми правилами выполнения полетов на данной высоте экипажем должно контролироваться выполнение условий выполнения так называемого «стабилизированного» захода на посадку. Вторая контрольная точка на высоте 200 футов была выбрана авторами работы достаточно произвольно. В это время самолет должен находиться на посадочной глиссаде примерно в районе ближнего приводного радиомаяка.

В перспективе в интересах выявления предпосылок к боковому выкатыванию интересно также рассмотреть значения параметров полета на высоте начала выравнивания и в момент касания ВПП стойками шасси. В первом случае параметрами, подлежащими изучению, могут быть высота начала выравнивания и, например, отклонение самолета от оси ВПП. Во втором случае в качестве возможных предпосылок к выкатыванию самолета за боковую кромку ВПП можно рассмотреть такие параметры, как отклонение самолета от оси ВПП в момент приземления, составляющую вектора путевой скорости, перпендикулярную оси ВПП, угол между осью продольной OX связанной с самолетом системы координат и осью ВПП (угол рыскания относительно оси ВПП).

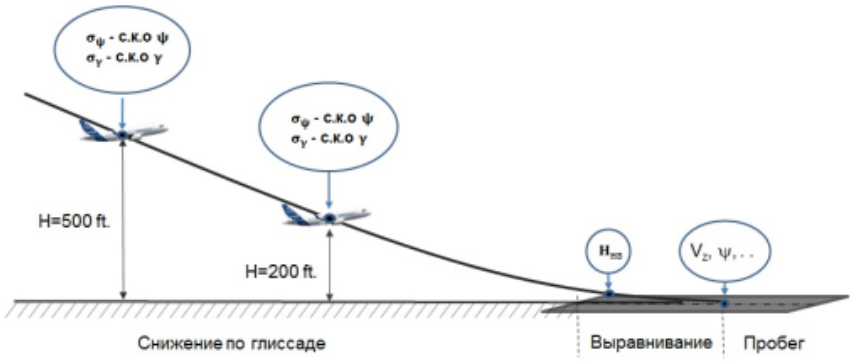


Рис. 1. Контрольные точки для оценки параметров движения самолета перед приземлением

При наличии репрезентативной выборки полетных данных методы статистического анализа позволяют исследовать влияние перечисленных выше факторов риска и предпосылок к боковому выкатыванию самолета с ВПП.

2. Сбор и валидация данных

Обозначенный выше подход к оценке влияния различных факторов на риск выкатывания самолета с ВПП требует наличия репрезентативной выборки данных о посадках самолета в различных условиях. Для целей настоящей работы были использованы записи бортового параметрического регистратора пассажирского самолета, предоставленные одной из российских авиакомпаний, и архивы METAR [2] с информацией о погоде и состоянии ВПП. Потребовалась предварительная обработка «сырых» данных, которая включала в себя:

- расшифровку файла бортового параметрического регистратора;
- восстановление траектории захода на посадку и движения самолета по ВПП на пробеге;
- определение моментов касания ВПП и окончания пробега;
- извлечение из архивов METAR информации о погоде и состоянии ВПП, относящейся к моменту посадки самолета.

Объем базы данных, по которым проводились исследования, составляет примерно 1000 посадок в одном из аэропортов Дальнего Востока Российской Федерации.

Анализ метеоусловий, относящихся к имеющейся выборки посадок самолета показывает, что максимальные значения перпендикулярной к оси ВПП составляющей вектора скорости ветра не превышают величины 7 8 м/с (рис. 2).

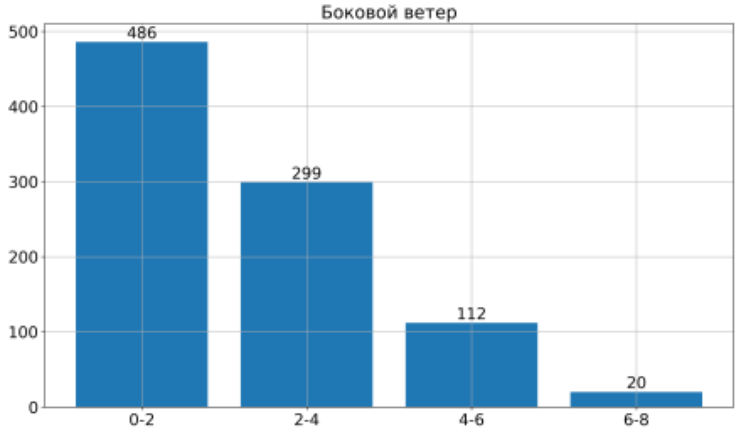


Рис. 2. Диаграмма распределения скорости бокового ветра при посадках в рассматриваемом аэропорту

Как правило, такой боковой ветер не вызывает затруднений при выполнении посадки. По мнению пилотов, заметное усложнение управления появляется, если величина боковой составляющей скорости ветра превышает 10 м/с, поэтому именно этот диапазон представляет наибольший интерес для изучения. Однако особенности имеющейся выборки данных ограничивают применимость результатов анализа величиной боковой составляющей скорости ветра 7 8 м/с.

На рис. 3 приведена круговая диаграмма, отображающая распределение посадок в рассматриваемом аэропорту по типу осадков на ВПП. Видно, что в большинстве случаев

посадка была выполнена на чистую и сухую ВПП (63%); заметная часть посадок (17%) выполнена на заснеженную ВПП; лед на ВПП зафиксирован лишь в 3.7% (34 посадки) выполненных посадок. Поэтому в случае, если анализ полетных данных не выявит значимых особенностей посадки на ВПП, покрытые льдом, это может означать как отсутствие таких особенностей, так и недостаточное количество данных для их выявления.

Рис. 3. Распределение посадок по типу загрязнения ВПП в рассматриваемом аэропорту

В рамках работы было разработано программное обеспечение, обрабатывающее строки со сводками METAR. Программная часть была реализована на Python и C#, в качестве базы данных для хранения использовался PostgreSQL.

Как было отмечено выше, в качестве возможных предпосылок к боковому выкатыванию самолета с ВПП в настоящей работе рассматриваются параметры движения самолета по крену и курсу на высотах 200 футов и 500 футов над поверхностью ВПП. Среднеквадратические отклонения углов рыскания и крена, «привязанные» к высотам 500 футов и 200 футов ($\sigma_{\psi\ H=500}, \sigma_{\gamma\ H=500}, \sigma_{\psi\ H=200}, \sigma_{\gamma\ H=200}$), вычислялись в диапазоне высот (по радиовысотомеру) $500 \leqslant \mathrm{h_r} \leqslant 600$ футов и $200 \leqslant \mathrm{h_r} \leqslant 300$ футов соответственно.

В табл. 1 приведены границы 95%-х интервалов выбранных параметров ($\sigma_{\psi\ H=500}, \sigma_{\gamma\ H=500}, \sigma_{\psi\ H=200}, \sigma_{\gamma\ H=200}$) для посадок в рассматриваемом аэропорту. 2,5%-й и 97,5%-й квантили — это такие значения параметра, что 2,5% и 97,5% измеренных значений параметра не выше указанных в таблице значений. То есть в 95% посадок значения параметра лежат внутри интервала, ограниченного указанными квантилями. Будем считать, что о применимости результатов статистического анализа можно будет говорить лишь для значений параметров, которые лежат в указанных интервалах.

Таблица 1

Значения параметров σ_ψ и σ_γ в контрольных точках, определяющие область применимости результатов статистического анализа

	$\sigma_{\gamma\ H=500}$, град	$\sigma_{\psi\ H=500}$, град	$\sigma_{\gamma\ H=200}$, град	$\sigma_{\psi\ H=200}$, град
2.5%	0.21	0.00	0.30	0.12
97.5%	1.93	0.95	1.98	0.99

3. Разработка метрики послепосадочного пробега самолета

Для решения поставленной задачи предлагается ввести понятие *метрики послепосадочного пробега* — TrackIndex (TI), которая некоторым образом характеризует отклонение посадки от *идеальной*. Возможны разные варианты метрики. Первый из рассмотренных в настоящей работе вариантов метрики оценивает непосредственно траекторию пробега самолета по ВПП после приземления. Выражение для метрики $\mathrm{TI_z}$ имеет следующий вид:

$$\mathrm{TI_z} = \frac{\int_{X_{touch}}^{X_{turn}} |Z - \bar{Z}|}{L_{run}},$$

где Z — отклонение самолета от оси ВПП, $\bar{Z}$ — среднее значение отклонения, L_{run} — длина пробега самолета по ВПП, X_{touch} и X_{turn} — точки касания ВПП и окончания пробега.

Графическая иллюстрация метрики $\mathrm{TI_z}$ приведена на рис. 4.

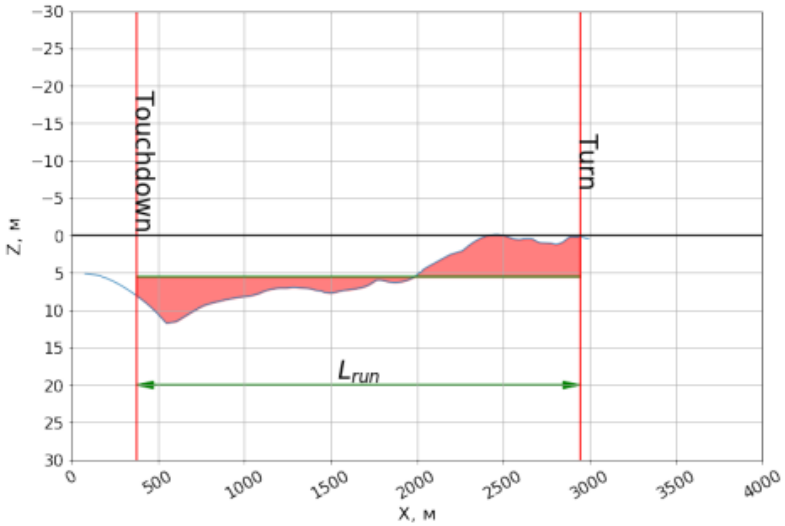


Рис. 4. Графическая иллюстрация метрики $\mathrm{TI_z}$

Метрика $\mathrm{TI_z}$ имеет размерность *метр* и может быть интерпретирована как средняя ширина области вдоль оси ВПП, в которой лежит траектория пробега самолета после приземления. На рис. 5 приведено распределение значений метрики $\mathrm{TI_z}$ для посадок в рассматриваемом аэропорту. Видно, что характерное значение метрики лежит в диапазоне $0.5\text{м} \leqslant \mathrm{TI_z} \leqslant 3\text{м}$.

Поскольку траектория движения самолета в координатах, связанных с осью ВПП, не регистрируется на борту самолета, то для ее восстановления требуется специальная методика и программное обеспечение. В настоящей работе использовалась методика, изложенная в [3], и специальное программное обеспечение [4]. Для расшифровки записей бортового параметрического регистратора было использовано программное обеспечение [5].

Рассматриваются также дополнительные метрики послепосадочного пробега: метрика боковой перегрузки ($\mathrm{TI_{nz}}$) и метрика интенсивности вмешательства пилота в управление педалями руля направления ($\mathrm{TI_{X_H}}$):

$$\mathrm{TI_{nz}} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(n_{zi} - \overline{n_z})^2}, \mathrm{TI_{X_H}} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(X_{Hi} - \overline{X_H})^2}, \quad (1)$$

где n_{zi} и $X\text{н}_i$ — значения боковой перегрузки и отклонения педалей руля направления, зарегистрированные во время пробега по ВПП. Распределения значений метрик $\mathrm{TI_{nz}}$ и $\mathrm{TI_{X_H}}$ приведены на рис. 6.

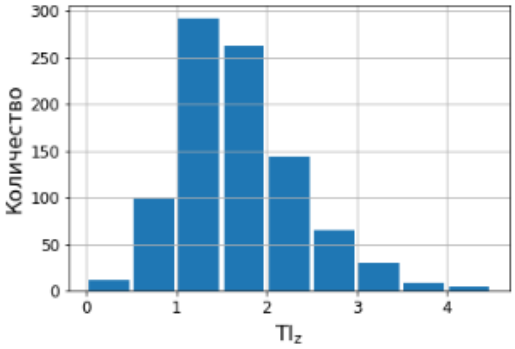
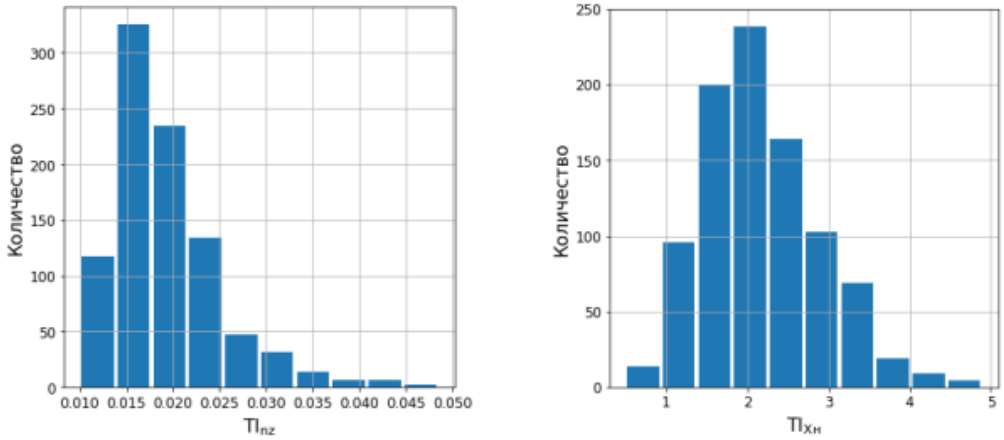


Рис. 5. Распределение метрики TI_z



а) б)

Рис. 6. Распределения значений метрик TI_{nz} и $TI_{X_н}$

Использование нескольких разных метрик позволяет получить более полную информацию о пробеге самолета после приземления. Детальный анализ метрик пробега самолета по ВПП является темой отдельных исследований. Для настоящей работы важно, что наличие метрики (или метрик) позволяет использовать выборку успешных посадок самолета для оценки риска выкатывания самолета за боковую кромку ВПП. При этом предполагается, что чем выше значение метрики, тем больше риск выкатывания самолета за боковую кромку ВПП.

Таким образом, задача сводится к анализу влияния различных внешних факторов и значений некоторых параметров полета в выбранных контрольных точках на величину метрики (или метрик) пробега самолета после приземления.

4. Применение критерия Манна–Уитни для оценки влияния категориальных параметров

Время года и тип осадков на ВПП относятся к категориальным признакам. Каждому значению категориального признака можно поставить в соответствие свой массив значений метрики траектории послепосадочного пробега. Для исследования влияния категориальных признаков в настоящей работе используется критерий Манна–Уитни, который предназначен для сравнения несвязанных выборок [6].

Пусть у нас есть две выборки ${X_1}^m = (X_{11}, \ldots, X_{1m})$ и ${X_2}^n = (X_{21}, \ldots, X_{2n})$ измерений одной и той же величины, и пусть значения X_{1i} первой выборки подчиняются неизвестному непрерывному закону распределения $F_{X_1}(x)$, а распределение значений X_{2i} второй выборки описываются функцией $F_{X_2}(x)$.

Критерий Манна–Уитни отвечает на вопрос, являются ли различия в выборках X_1 и X_2 одного и того же параметра статистически значимыми. Для этого вычисляются и оцениваются нормированная статистика критерия Манна–Уитни $\tilde{U}$ и достигаемый уровень значимости p-value — вероятность получить еще большие смещения при имеющихся размерах выборок X_1 и X_2. Если значение p-value ниже 0.05, то есть основания считать рассматриваемые выборки существенно различными. Надо отметить, что параметр $\tilde{U}$ имеет нормальное распределение с дисперсией $\sigma = 1$, если распределения X_1 и X_2 однородны. Поэтому условие p-value < 0.05 эквивалентно $|\tilde{U}| > 2\sigma$.

При оценке влияния времени года и типа осадков на ВПП анализ был построен следующим образом: распределения метрик в группе с определенным значением категориального признака сравнивались с распределениями метрик в контрольной группе. При анализе влияния времени года на риск бокового выкатывания самолета с ВПП в качестве контрольной выборки были взяты посадки, выполненные летом; при оценки влияния типа загрязнения контрольную группу составили посадки на чистую и сухую ВПП.

В случаях, когда критерий Манна–Уитни указывал на значимое различие между выборками, оценивался параметр сдвига — разница средних значений метрики в двух сравниваемых выборках с учетом разброса ($\Delta TI = \Delta TI \pm \sigma_{TI}$). Оценка производилась методом Ходжеса–Лемана [7].

Некоторые результаты, полученные при анализе выборок рассматриваемых метрик послепосадочного пробега для разных времен года и состояний ВПП с использованием критерия Манна–Уитни, приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Влияние времени года на метрику $\mathrm{TI_Z}$

	Лето		
	$\tilde{U}$	p-value	Примечание
Осень	−1.79	0.963	Не выявлено отличия
Зима	1.59	0.135	Не выявлено отличия
Весна	1.1	0.055	Не выявлено отличия

Таблица 3

Влияние типа осадков на метрику $\mathrm{TI_Z}$

	чисто и сухо		
	$\tilde{U}$	p-value	Примечание
сухой снег	3.55	$1.9{\cdot}10^{-5}$	$\Delta\mathrm{TI_Z} = 0.2528 \pm 0.05676$м
влажно	−0.87	0.8	Не выявлено отличия
уплотненный снег	1.47	0.07	Не выявлено отличия

Из приведенных выше табл. 2, 3 видно, что метрика $\mathrm{TI_Z}$ практически не зависит от времени года. Относительно влияния типа осадков можно сказать, что только при наличии сухого снега на ВПП наблюдается значимое увеличение метрики $\mathrm{TI_Z}$ по сравнению с условиями пробега самолета по чистой и сухой ВПП. Сравнение распределений метрики $\mathrm{TI_Z}$ для разных типов осадков на ВПП показано также на рис. 7 в виде коробочных диаграмм.

Проведенный анализ выявил значимое увеличение метрики $\mathrm{TI_{nz}}$ при пробеге по влажной ВПП, по сравнению с чистой и сухой полосой ($\tilde{U} = 3.43$, p-value $= 0.3 \cdot 10^{-4}$, $\Delta\mathrm{TI_{nz}} = (2.6 \pm 0.6) \cdot 10^{-3} g$) (рис. 8).

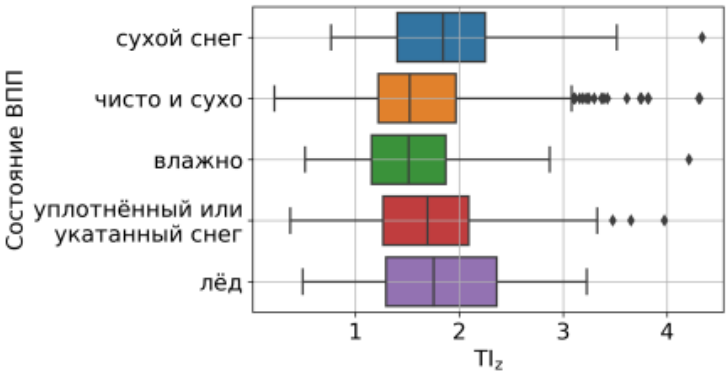


Рис. 7. Распределения TI_Z при разных типах загрязнения ВПП

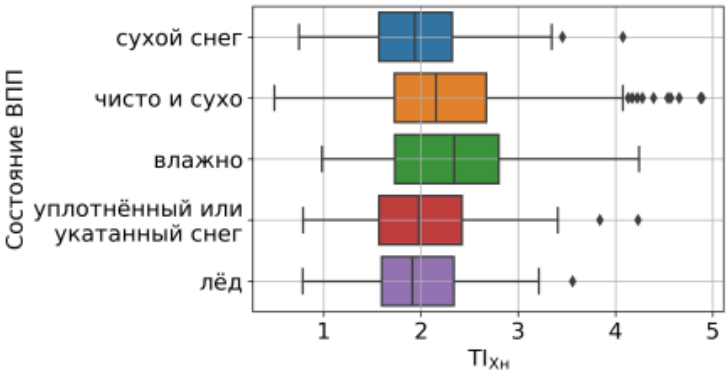


Рис. 8. Распределения TI_{nz} при разных типах загрязнения ВПП

5. Использование коэффициента корреляции Спирмена для оценки влияния непрерывных параметров

Скорость бокового ветра, среднеквадратические отклонения углов крена, курса и других параметров в контрольных точках являются непрерывными параметрами. Для исследования влияния непрерывных признаков использовался коэффициент корреляции Спирмена.

Пусть у нас имеются две выборки $X^n = (X_1, \ldots, X_n)$ и $Y^n = (Y_1, \ldots, Y_n)$, представляющие связанные измерения двух величин. Коэффициент корреляции Спирмена позволяет ответить на вопрос, связаны ли монотонные изменения параметра в выборке X с монотонными изменениями параметра в выборке Y.

Коэффициент корреляции Спирмена вычисляется по следующей формуле [8]:

$$\rho = 1 - \frac{6}{n^3 - n} \sum_{i=1}^{n} \left(\mathrm{rank}(X_i) - \mathrm{rank}(Y_i)\right)^2.$$

При $n \geqslant 50$ можно считать, что величина ρ описывается нормальным законом распределения со средним значением, равным нулю, и дисперсией $\sigma_\rho = \frac{1}{n-1}$ в случае независимых выборок:

$$\rho \sim \mathcal{N}\left(0, \frac{1}{n-1}\right). \tag{2}$$

Значения коэффициента корреляции лежат на отрезке $\rho \in [-1, 1]$. Причем положительные значения ρ говорят о наличии монотонно возрастающей зависимости параметров в

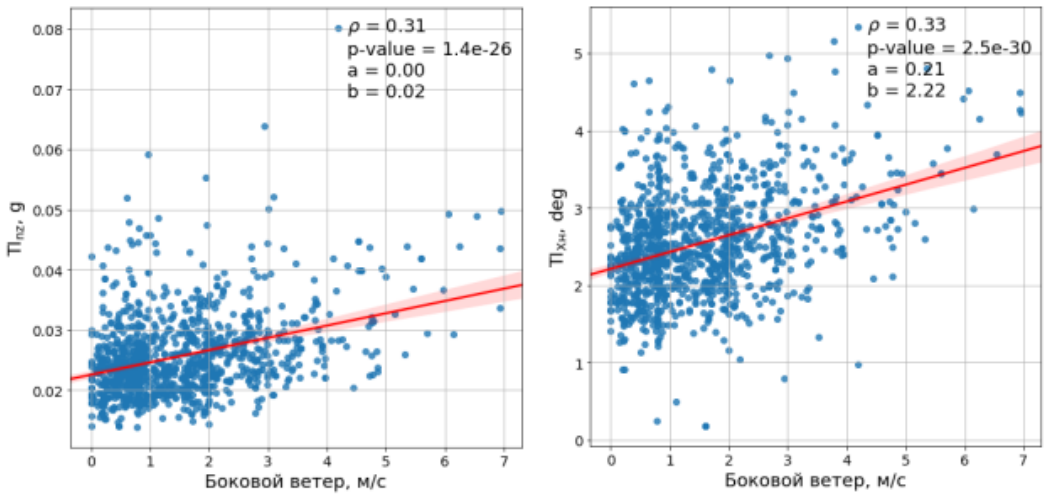
рассматриваемых выборках, а отрицательные — о наличии монотонно убывающей зависимости.

Учитывая, что величина ρ подчиняется нормальному закону распределения (2), можно сделать вывод о значимости корреляции по величине коэффициента ρ. Если назначить в качестве уровня значимости p-value = 0.05 — вероятность получить большее по модулю значение коэффициента корреляции, то для выборок размером выше 800 посадок условию p-value $< 5\%$ соответствует величина коэффициента корреляции $|\rho| > 0.08$. То есть корреляция между параметрами в двух взаимосвязанных выборках считается значимой, если коэффициент корреляции $|\rho| > 0.08$.

Чтобы численно оценить влияние изучаемых параметров на конечные метрики, были оценены коэффициенты линейной зависимости методом Тейла [9] в случае наличия значимой корреляции.

Анализ влияния параметров полета во время посадки на метрики послепосадочного пробега происходил следующим образом. Сначала считались коэффициенты корреляции (и их уровни значимости) между параметрами полета и конечными метриками. Затем производилась коррекция достигаемых уровней значимости на множественную проверку гипотез методом Бонферрони [10]. В итоге скорректированные уровни значимости сравнивались с уровнем значимости в 0.05.

Анализ имеющейся выборки посадок показал, что даже для относительно небольших значений составляющей скорости бокового ветра наблюдаются статистически значимые корреляции метрик $\mathrm{TI_{nz}}$ и $\mathrm{TI_{X_H}}$ и значений скорости бокового ветра. При этом боковой ветер практически не оказывает влияния на метрику $\mathrm{TI_Z}$. На рис. 9 изображены диаграммы рассеяния рассматриваемых метрик, аппроксимирующие прямые и 95% доверительные интервалы для прямых. Коэффициенты корреляции ρ и коэффициенты линейной зависимости a, b указаны в правом верхнем углу каждой из диаграмм. При этом боковой ветер практически не оказывает влияния на метрику $\mathrm{TI_Z}$ (рис. 10).



а) б)

Рис. 9. Влияние бокового ветра на метрики $\mathrm{TI_{nz}}$ и $\mathrm{TI_{X_H}}$

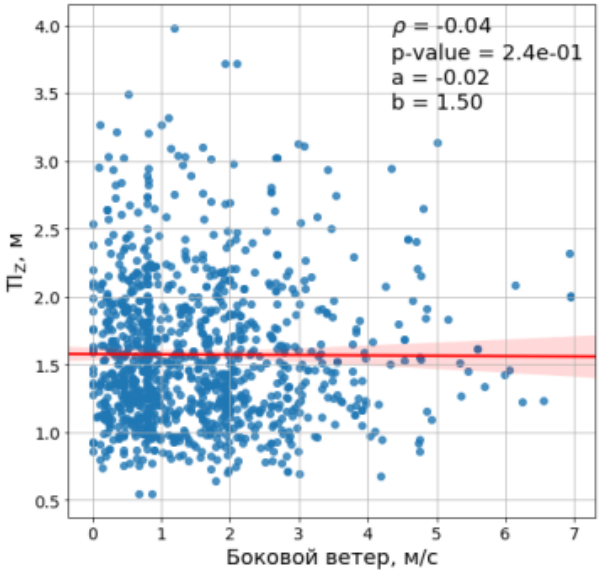


Рис. 10. Влияние бокового ветра на матрику TI_Z

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при боковом ветре со скоростью до 7–8 метров в секунду пилоты успешно выдерживают прямолинейную траекторию пробега по ВПП после касания, однако нагрузка на пилота возрастает при увеличении боковой составляющей скорости ветра.

В табл. 4 и 5 приведены коэффициенты корреляции и уровни значимости для метрик TI_Z, TI_{X_H} и параметров углового движения самолета в контрольных точках на высотах 500 футов и 200 футов.

Таблица 4

Взаимосвязь параметров полета и метрики TI_Z

		ρ	p-value	Примечание
500 ft	σ_ψ	0.005	0.76	Не выявлена корреляция
	σ_γ	0.01	0.87	Не выявлена корреляция
200 ft	σ_ψ	0.016	0.83	Не выявлена корреляция
	σ_γ	0.007	0.61	Не выявлена корреляция

Таблица 5

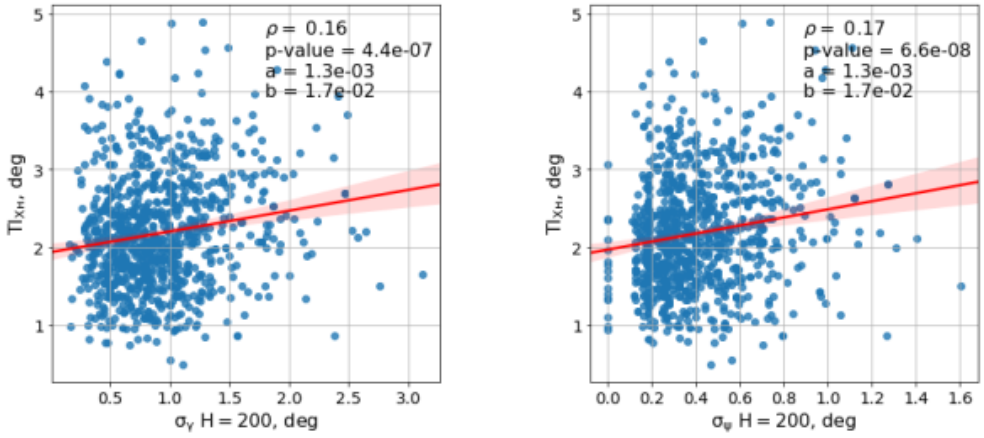
Взаимосвязь параметров полета и метрики TI_{X_H}

		ρ	p-value	Примечание
500 ft	σ_ψ	0.115	0.005	Выявлена корреляция
	σ_γ	0.109	0.002	Выявлена корреляция
200 ft	σ_ψ	0.175	0.0002	Выявлена корреляция
	σ_γ	0.109	0.00003	Выявлена корреляция

Видно, что параметры движения самолета по крену и курсу в контрольных точках практически не влияют на характер траектории послепосадочного пробега, описываемый метрикой TI_Z, но оказывают значимое влияние на метрику TI_{X_H}, характеризующую загрузку экипажа.

Из табл. 5 видно также, что коэффициенты корреляции метрики TI_{X_H} и колебаний самолета по крену и курсу в контрольных точках на глиссаде возрастают с уменьшением высоты (с приближением контрольной точки к моменту начала пробега).

В качестве примера на рис. 11 приведены диаграммы рассеяния метрики TI_{X_H} в зависимости от среднеквадратических отклонений углов крена и рыскания на высоте 200 футов.



а) б)

Рис. 11. Влияние параметров полета на высоте 200ft на метрику TI_{X_H}

Таким образом, характеристики углового движения самолета по курсу и крену на высоте 200 футов и 500 футов можно рассматривать в качестве предвестников повышенной нагрузки на пилота при движении по ВПП после приземления. На рассмотренной выборке полетов не выявлено значимой зависимости характера траектории послепосадочного пробега от колебаний самолета по курсу и крену на заключительном этапе снижения самолета по глиссаде.

Исследование, результаты которого представлены выше, проводилось с применением языка Python 3.6, с использованием библиотеки scipy [11].

Основные результаты, изложенные в настоящей работе, были представлены авторами на 61-й научно-технической конференции МФТИ в 2018 году [12].

Литература

1. *Варюхина Е.В., Павлов А.А., Стрелков В.В., Лучинин В.В.* Анализ факторов риска, сопутствующих выкатываниям самолета с ВПП, и методика оценки сложности посадки // Сборник докладов XI международной научной конференции по амфибийной и безаэродромной авиации [Электронное издание]. 2016. С. 184 189.

2. *Valor G.B.* Professional information about meteorological conditions in the world. https://ogimet.com. 2005.

3. *Емельянов Д.С., Стрелков В.В.* Восстановление и кодировка траектории движения самолета на посадке и пробеге по ВПП // Труды международной конференции по амфибийной и безаэродромной авиации в рамках «Гидроавиасалона-2018», 2018.

4. *Емельянов Д.С.* Программа восстановления траектории движения самолета на заключительном этапе снижения по глиссаде, выравнивании и движении по взлетно-посадочной полосе (TrajectoryScan) / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство № 2018664260, 2018.

5. *Буров Я.В., Стрелков В.В.* Программа расшифровки полетной информации с бортовых параметрических регистраторов пассажирских самолетов «ARINC-конвертор» / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство № 2016662052, 2016 г.
6. *Лагутин М.Б.* Наглядная математическая статистика [Электронный ресурс]: учебное пособие. 5-е изд. (эл.). Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 475 с.
7. *Hodges J.L., Jr. and Lehmann E.L.* Estimates of Location Based on Rank Tests. Ann. Math. Statist. 1963. V. 34, N 2. P. 598–611
8. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. Москва : Физматлит, 2006. 816 с.
9. *Theil H.* A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, III. Proc. Kon. Ned. Akad. v. Wetensch. 1950. A. 53. 1397–1412
10. *Lehman E.L., Romano J.P.* Testing Statistical Hypotheses. Third Edition. Springer Science+Business Media. Inc. 2005.
11. *Jones E, Oliphant E, Peterson P, et al.* SciPy: Open Source Scientific Tools for Python. http://www.scipy.org/ 2001.
12. *Стрелков В.В., Хайруллин Н.Г.* Применение методов статистического анализа для решения задачи оценки влияния различных факторов на риск выкатывания самолета с ВПП при посадке // Труды 61-й Всероссийской научной конференции МФТИ. Аэрокосмические технологии. 2018. С. 300–302

References

1. *Varyukhina E.V., Pavlov A.A., Strelkov V.V., Luchinin V.V.* Analysis of risk factors attendant to runway excursions and assessment of landing task difficulty. International Exhibition and Scientific Conference «HYDROAVIASALON 2016». 2016. P. 184–189.
2. *Valor G.B.* Professional information about meteorological conditions in the world. https://ogimet.com. 2005.
3. *Emelianov D.S., Strelkov V.V.* Identification and description of aircraft trajectory at landing and roll-out with discrete code. International Exhibition and Scientific Conference. «HYDROAVIASALON 2018». 2018.
4. *Emelianov D.S.* Software for aircraft trajectory identification at final approach, flare and roll-out stages (TrajectoryScan) Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks. Registration number 2018664260, 2018.
5. *Burov Y.V., Strelkov V.V.* Software for decoding raw data from quick access recorder of passenger aircraft «ARINC-converter» Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks. Registration number 2016662052, 2016.
6. *Lagutin M.B.* Visual mathematical statistics [Electronic resource]: tutorial. 5-th ed. (el.). Moscow : BINOM. Knowledge laboratory, 2015 — 475 p.
7. *Hodges J.L., Jr. and Lehmann E.L.* Estimates of Location Based on Rank Tests. Ann. Math. Statist. 1963. V. 34, N 2. P. 598–611.
8. *Kobzar A.I.* Applied mathematical statistics. For engineers and scientists. Moscow : Physmatlit, 2006. 816 p.
9. *Theil H.* A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, III. Proc. Kon. Ned. Akad. v. Wetensch. 1950 A. 53. 1397–1412
10. *Lehman E.L., Romano J.P.* Testing Statistical Hypotheses. Third Edition. Springer Science+Business Media. Inc. 2005.

11. *Jones E, Oliphant E, Peterson P, et al.* SciPy: Open Source Scientific Tools for Python http://www.scipy.org/ 2001.

12. *Strelkov V. V., Khairullin N. G.* Statistical analysis application for assessment of some factors impact on runway excursion risk. Proc. of 61 Scientific Conference of Moscow Institute of Physics and Technology. Aerocosmic technologies. 2018. P. 300 302.

Поступила в редакцию 23.07.2019