

УДК 629.785

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ВОДОЛАЗНЫХ РАБОТ, ПРОВОДИМЫХ В ХОДЕ
ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ
К ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ (Часть I)**
Е.Ю. Иродов, А.А. Алтунин, П.П. Долгов, В.С. Коренной

Канд. техн. наук Е.Ю. Иродов; А.А. Алтунин;
канд. техн. наук П.П. Долгов; канд. техн. наук В.С. Коренной
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье представлены результаты статистической обработки показателей водолазных работ, выполняемых в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» в процессе проведения испытательно-тренировочных работ в интересах подготовки космонавтов к внекорабельной деятельности.

Ключевые слова: показатели водолазных работ, испытательно-тренировочный комплекс «Гидролаборатория», космонавт, водолаз, водолазные работы, водолазные спуски, подготовка космонавтов, внекорабельная деятельность, скафандр

**Statistical Analysis of the Indicators of Diving Operations
Performed During Cosmonaut Training for Extravehicular Activity
(Part I). E.Yu. Irodov, A.A. Altunin, P.P. Dolgov, V.S. Korennoy**

The paper gives the results of statistical processing of the indicators of diving operations that are being performed at the “Yu.A. Gagarin R&T CTC” FSBO during testing and training of cosmonauts for extravehicular activity.

Keywords: indicators of diving operations, Weightless Environment Training Facility, cosmonaut, diver, diving works, diving, cosmonaut training, extravehicular activity, spacesuit

Постановка задачи

Внекорабельная деятельность (ВКД) космонавтов является одной из наиболее сложных, напряженных, связанных с повышенным риском операций пилотируемых космических полетов. Практическая отработка навыков выполнения ВКД проводится, главным образом, методом тренировок космонавтов в условиях моделированной невесомости в гидросреде.

В ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» (ЦПК) такие тренировки проводятся в испытательно-тренировочном комплексе «Гидролаборатория» (ИТК ГЛ). Тренировки космонавтов в гидросреде являются завершающим этапом комплекса испытательно-тренировочных работ (ИТР), выполняемых с применением водолазных работ (ВР).

При решении задач долгосрочного планирования организации и проведения водолазных работ, а также обоснования нормативных затрат на

выполнение ИТР с использованием водолазных работ необходимо иметь набор показателей, объективно оценивающих затраты водолазного труда и нагрузки на водолазов при проведении различных видов ИТР. Кроме того, эти показатели могут быть использованы в качестве исходных данных при обосновании технических требований, предъявляемых к технологическим системам и оборудованию ИТК ГЛ, расчетах запасов воздуха для ВР, а также при оценке потребных затрат технического ресурса и расходных материалов для этих систем и т. д.

Важным условием формирования и расчета этих показателей является возможность получения достоверных исходных данных из официальных документов. В качестве такого документа предлагается использовать журнал водолазных работ, который является официальным документом для записей спусков и подводных работ, выполняемых водолазами.

Целью исследования является получение статистических показателей водолазных работ, выполняемых в ИТК ГЛ в интересах подготовки космонавтов к ВКД.

Исходя из совокупности задач, для решения которых требуются данные о потребных ресурсах ВР, а также, учитывая фактическое наличие исходной информации, регистрируемой в журнале водолажных работ, предлагается выполнять расчет следующих групп показателей ВР, проводимых в ИТК ГЛ:

- количество водолажных работ, водолажных спусков и времени их выполнения по всем или отдельным видам ИТР за определенный период времени;
- время перерывов между двумя последовательно выполненными водолажными работами;
- количество одновременно работающих под водой человек, суммарные значения выполненных ими водолажных спусков и времени работы под водой в течение одного дня проведения одной ИТР;
- суммарное количество водолажных спусков и времени работы под водой одного человека в водолажном снаряжении в течение одного дня;
- время работы под водой одного человека за один водолажный спуск в легководолазном снаряжении (ЛВС) или в скафандре (СК).

Предварительный анализ отдельных показателей ВР и апробация методик проведения исследований были рассмотрены в работах [1–3].

Для достижения поставленной цели разработана методика проведения исследований, выбраны показатели водолажных работ, рассчитаны описательные статистики распределения этих показателей, проведен анализ особенностей их распределения.

Методика проведения исследований

Для сбора, расчета и статистической обработки данных создан шаблон электронной таблицы (базы данных) в редакторе Microsoft Excel, который фактически является цифровым информационным двойником журнала ВР.

Для удобства обработки информации в каждую строку таблицы заносятся данные о всех спусках под воду или нахождении в барокамере, выполненных одним водолазом в день выполнения одной конкретной работы. В колонках таблицы содержится информация о дате проведения работ, фамилии, инициалах и позывном водолаза (включая космонавтов и испытателей, работающих под водой в скафандрах), назначенной глубине погружения, виде ИТР, используемом типе снаряжения, времени начала, конца и продолжительности каждого водолазного спуска, суммарных значениях времени и количества водолазных спусков за одну водолазную работу, а также времени нахождения водолаза на поверхности между двумя последовательно выполненными спусками под воду.

В качестве исходных данных в настоящей работе используются записи из журнала водолазных работ в ИТК ГЛ на интервале времени с января 2020 года по июнь 2022 года. На первом этапе исследований производится расчет показателей общего объема ВР и выбираются ИТР, вносящие наибольший вклад в общий объем водолазных работ, для дальнейшего анализа показателей.

Время одного водолазного спуска (Вр) определяется как время с момента начала погружения под воду (повышения давления в барокамере, закрытия ранца скафандра) до момента возвращения водолаза в условия нормального давления окружающей воздушной среды по режиму декомпрессии или без него (извлекается из базы данных).

Суммарное количество водолазных спусков (Сп1) и суммарное время работы под водой (Вр1) одного человека в течение одного дня проведения одной ИТР определяются выражениями (извлекаются из базы данных):

$$\text{Сп1} = n, \quad \text{Вр1} = \sum_{i=1}^n \text{Вр}_i,$$

где n – количество водолазных спусков, выполненных одним человеком в течение одного дня проведения одной ИТР (независимо от вида снаряжения).

Количество человек, одновременно работающих под водой (КЧ), суммарное количество выполненных ими водолазных спусков (СумСп1) и суммарное время работы под водой (СумВр1) в течение одного дня проведения одной ИТР определяются выражениями:

$$\text{КЧ} = m, \quad \text{СумСп1} = \sum_{i=1}^m \text{Сп1}_i, \quad \text{СумВр1} = \sum_{i=1}^m \text{Вр1}_i,$$

где m – количество человек выполнивших водолазные спуски в течение одного дня проведения одной ИТР.

Время перерыва между водолазными работами (ВрП) определяется количеством суток, прошедших между датами двух последовательно выполненных работ.

Суммарное количество водолазных спусков с использованием легководолазного снаряжения (СпЛ1) и суммарное время работы в ЛВС (ВрЛ1)

одного человека в течение одного дня проведения одной ИТР определяется выражениями:

$$\text{Спл1} = k, \quad \text{ВрЛ1} = \sum_{i=1}^k \text{ВрЛ}_i,$$

где k – количество водолазных спусков с использованием легководолазного снаряжения, выполненных одним человеком в течение одного дня проведения одной ИТР; ВрЛ – время одного водолазного спуска в ЛВС (значения k и ВрЛ_i извлекаются из базы данных).

Время работы под водой в скафандре (ВрС) одного человека в течение одного дня проведения одной ИТР (извлекается из базы данных).

Количество водолазных работ (КР), водолазных спусков (КС) и времени (КВ) их выполнения по отдельным видам ИТР в заданный период времени (месяц, квартал, год и т. д.) определяются по формулам:

$$\text{КР}_{\text{вид}} = N_{\text{вид}}, \quad \text{КС}_{\text{вид}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{вид}}} \text{СумСп1}_i, \quad \text{КВ} = \sum_{i=1}^{N_{\text{вид}}} \text{СумВр1}_i,$$

где $N_{\text{вид}}$ – количество водолазных работ, выполненных при проведении определенного вида работ (ТСК, ИСК, ТВС, ИВС, ПТР и т. д.) в заданный период времени.

Формирование выборок (массивов) данных для расчета и анализа основных показателей ВР производится с использованием функций сводных таблиц Microsoft Excel. Для каждого показателя рассчитываются выборочные характеристики, рекомендованные для описания массивов данных [4]. Расчет выборочных характеристик выполняется с использованием статистических функций программы Microsoft Excel. Перечень выборочных характеристик, условные обозначения и синтаксис формул статистических функций Microsoft Excel, используемых для вычислений, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Выборочные характеристики и условные обозначения статистических функций

Статистика	Условное обозначение	Функция Microsoft Excel или формула
Среднее	\bar{x}	СРЗНАЧ (массив)
Стандартная ошибка среднего	$\sigma_{\bar{x}}$	СТАНДОТКЛОН.В (массив) / КОРЕНЬ(СЧЕТ (массив))
Медиана	Me	МЕДИАНА (массив)
Мода	Mo	МОДА.ОДН (массив)
Стандартное отклонение	S	СТАНДОТКЛОН.В (массив)
Дисперсия выборки	S^2	ДИСП.В (массив)
Эксцесс	Ex	ЭКСЦЕСС (массив)
Асимметричность	Ax	СКОС (массив)
Интервал	R	МАКС (массив) – МИН (массив)
Минимум	X_{\min}	МИН (массив)
Максимум	X_{\max}	МАКС (массив)
Объем выборки	N	СЧЕТ (массив)

Окончание таблицы 1

Статистика	Условное обозначение	Функция Microsoft Excel или формула
Доверительный интервал	CI	ДОВЕРИТ.СТЫЮДЕНТ (альфа;стандартное_откл;размер)
Первый квартиль	$X_{0,25}$	КВАРТИЛЬ.ВКЛ (массив;1)
Третий квартиль	$X_{0,75}$	КВАРТИЛЬ.ВКЛ (массив;3)
Межквартильный интервал	IQR	КВАРТИЛЬ.ВКЛ (массив;3) – КВАРТИЛЬ.ВКЛ (массив;1)
Коэффициент вариации	CV	100*СТАНДОТКЛОН.В (массив) / СРЗНАЧ (массив)

Проверка принадлежности анализируемых данных (показателей ВР) нормальному закону распределения вероятностей выполняется с использованием теста Шапиро – Уилка. Нулевая гипотеза теста Шапиро – Уилка заключается в том, что случайная величина, выборка (x) которой известна, распределена по нормальному закону. Альтернативная гипотеза заключается в том, что закон распределения не является нормальным. Решение об отклонении или не отклонении гипотезы о нормальности распределения принимается в результате сравнения наблюдаемого уровня значимости p -value с выбранным уровнем значимости α . Если p -value (p) превышает выбранный уровень значимости, то для отклонения гипотезы о нормальности распределения нет достаточных оснований [5]. Вычисления значений статистики критерия Шапиро – Уилка (W) и наблюдаемого уровня значимости производятся с использованием функции *shapiro.test(x)* языка статистического программирования R (версия R 4.2.1). Согласно описанию этой функции в ней используется алгоритм Ройстона для больших выборок, а аргумент x является числовым вектором значений данных, размер выборки которых должен быть в интервале между 3 и 5000 элементами [6].

При анализе распределения данных асимметрия считается незначительной при $|Ax| < 0,25$, умеренной – при $|Ax| = 0,25-0,5$ и существенной – при $|Ax| > 0,5$. Правосторонняя асимметрия ($Ax > 0$) свидетельствует о наличии в распределении более высоких значений, а при левосторонней асимметрии ($Ax < 0$) чаще встречаются более низкие значения данных.

При анализе рассеяния данных по значению коэффициента вариации считается, что вариация очень слабая при $CV < 5\%$, слабая – $CV = 5-10\%$, средняя – при $CV = 10-20\%$, сильная – $CV = 20-30\%$ и очень сильная – $CV > 30\%$. Значения $CV > 30-33\%$ свидетельствуют о неоднородности совокупности данных.

В качестве обобщающих значений показателей ВР, измеряемых единицами времени, предлагается применять их среднее арифметическое значение с соответствующим доверительным интервалом, если гипотеза о нормальном распределении не отклоняется, а для показателей, имеющих распределения отличные от нормального, – медианные значения с доверительным интервалом для медианы.

Исходя из физического смысла показателей ВР, измеряемых количеством водолазных спусков и количеством человек, предлагается в качестве их обобщающих значений применять медианные значения с доверительным интервалом для медианы. При этом для показателей, выборки которых состоят из четного количества данных, используется следующий порядок округления: при наличии правосторонней асимметрии выбирается «правая» медиана, а при наличии левосторонней асимметрии – «левая» медиана. Такой подход дополнительно позволяет учесть направление смещения данных в сторону больших или меньших значений при выбранном способе округления данных.

Доверительный интервал для медианы определяется путем нахождения местоположения (позиции в последовательности данных после их ранжирования в неубывающем порядке) его нижней (Т1) и верхней (Т2) границ. Местоположение границ (номер позиции) определяется с использованием формул и таблиц при различных уровнях доверия [7]. Для вычисления доверительного интервала в настоящих исследованиях принимается уровень доверия равный 95 %.

Для обозначения медианы с рассчитанным доверительным интервалом обычно используется запись вида $Me (T1; T2)$, тогда для записи численного значения показателя (П) будем использовать выражение $П = Me (T1; T2)$.

Для обозначения среднего арифметического с рассчитанным доверительным интервалом обычно используется запись вида $\bar{x} \pm CI$, тогда для записи численного значения показателя, где используется среднее арифметическое значение, будем использовать выражение $П = \bar{x} \pm CI$. Различие формы записи для доверительных интервалов Me и \bar{x} выбраны с целью информирования пользователя о мере центральной тенденции, используемой в качестве обобщающего значения показателя.

Для удобства анализа исследуемых показателей выполняются визуализации характеристик их показательных статистик путем построения гистограмм распределения частот и диаграмм размаха.

Показатели общего объема ВР

Водолазные работы проводятся в ИТК ГЛ при выполнении следующих основных видов ИТР:

- испытания в интересах ВКД в скафандрах (ИСК);
- испытания в интересах ВКД в легководолазном снаряжении (ИЛВ);
- тренировки космонавтов по ВКД в скафандрах (ТСК);
- тренировки по ВКД в легководолазном снаряжении (ТЛВ);
- подводно-технические работы в легководолазном снаряжении (ПТР);
- водолазные спуски по подготовке и аттестации водолазов (ТВС);
- испытания скафандров под водой (СКИ);
- спуски в барокамере ПДК-2У (ПДК).

В данном перечне в скобках показаны сокращения, которые будут далее применяться в тексте, таблицах и графиках для условного обозначения видов ИТР.

В качестве показателей общего объема ВР были рассчитаны количество водолазных работ, водолазных спусков и времени их выполнения по всем и отдельным видам ИТР за период с января 2020 года по июнь 2022 года. Кроме того, было рассчитано время перерывов между двумя последовательно выполненными водолажными работами.

В результате выполненных расчетов установлено, что исследуемый массив данных включает 200 водолазных работ, в процессе которых было выполнено 5536 водолазных спусков с общим временем пребывания под водой 8043 часа. Водолазные спуски выполнили 56 человек, включая 7 штатных водолазов и 14 нештатных водолазов ЦПК, а также 10 нештатных водолазов ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва», 23 российских космонавта и 2 астронавта НАСА. Данные о суммарном количестве водолазных работ и водолажных спусков, общем времени работы под водой по каждому виду ИТР представлены в виде диаграмм Парето на рис. 1–3, позволяющих наглядно продемонстрировать вклад каждого вида работ в суммарный результат.

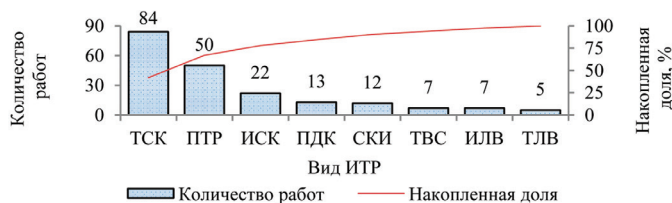


Рис. 1. Распределение суммарного количества ВР по видам ИТР

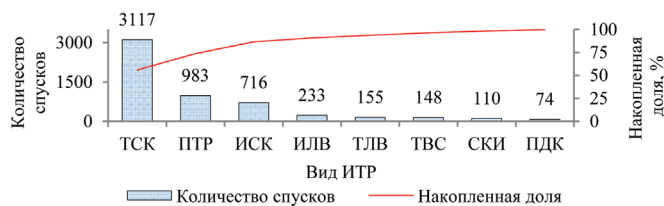


Рис. 2. Распределение суммарного количества водолажных спусков по видам ИТР

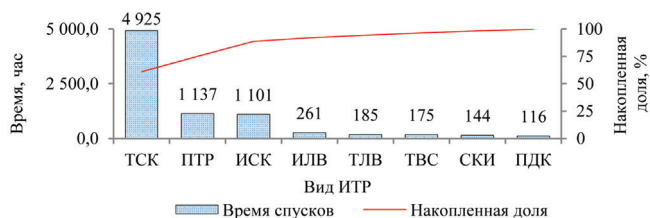


Рис. 3. Распределение суммарного времени водолажных спусков по видам ИТР

При этом результаты, представленные на рис. 2 и 3, включают суммарные значения для спусков под воду в водолазном снаряжении и в скафандрах.

В результате анализа полученных данных установлено, что 78 % от общего количества ВР приходится на тренировки космонавтов в скафандрах, испытания в интересах ВКД в скафандрах и подводно-технические работы. На выполнение этих трех видов ИТР было затрачено 87 % общего и 89 % суммарного количества времени водолазных спусков. В связи с этим для проведения дальнейшего анализа показателей, характеризующих затраты ресурсов ВР на проведение различных ИТР, были выбраны ТСК, ИСК и ПТР.

Одним из важных показателей, характеризующих режимы труда и отдыха водолазов, является перерыв между водолажными работами. С целью анализа этого показателя были рассчитаны перерывы между двумя последовательно выполняемыми водолажными работами. При этом в выборке данных были отфильтрованы интервалы, превышающие 14 суток, связанные с технологическими перерывами для пуска наладочных работ, испытаниями технологического оборудования ИТК ГЛ и новогодними каникулами. Результаты расчета числовых характеристик выборки показателя ВрП и диаграмма размаха представлены в табл. 2, а частоты распределения показаны в виде гистограммы на рис. 4.

Таблица 2

Выборочные характеристики показателя ВрП

Статистика	Значение	Диаграмма размаха
Среднее арифметическое, сут	2,58	
Стандартная ошибка среднего, сут	0,12	
Медиана, сут	2	
Мода, сут	2	
Стандартное отклонение, сут	1,56	
Дисперсия выборки, сут ²	2,43	
Эксцесс	1,62	
Асимметричность	1,35	
Интервал, сут	7	
Минимум, сут	1	
Максимум, сут	8	
Счет	181	
Доверительный интервал (p = 95,0 %)	0,23	
Первый квартиль, сут	2	
Третий квартиль, сут	3	
Межквартильный интервал, сут	1	
Коэффициент вариации, %	60	

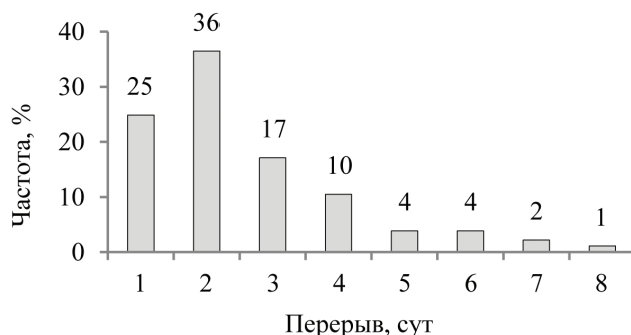


Рис. 4. Перерывы между ВрП

Для проверки гипотезы о нормальном распределении показателя ВрП при уровне значимости $\alpha = 0,05$ с использованием функции *shapiro.test()* определены значения тестовой статистики $W = 0,8342$ и наблюдаемого уровня значимости $p = 0$ ($p < 0,0001$). На имеющихся данных распределения показателя ВрП, на уровне значимости 5 % имеются основания ($p < \alpha$) в пользу принятия альтернативной гипотезы об отличии распределения от нормального.

Анализ частот распределения перерывов между водолазными работами показал, что наиболее часто (78 %) работы выполнялись с перерывом от одних до трех суток, из них 36 % работ выполнялись через двое суток, через одни сутки – 25 % работ, а через трое суток – 17 % работ. При этом продолжительные перерывы (семь и более суток) между работами суммарно составили 3 %.

Распределение данных для показателя ВрП имеет существенную правостороннюю асимметрию и очень сильную вариацию.

Применив правила округления, установленные методикой проведения исследований для выбора медианного значения, и проведя вычисления границ доверительного интервала для Me при уровне доверия 95 %, получаем значение показателя ВрП = 2 (2; 3) суток.

Окончание следует

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Предложения по методике регистрации, обработке и анализу параметров водолазных спусков в гидролаборатории на основе данных, регистрируемых водолазными компьютерами / А.А. Алтунин, А.О. Брель, П.П. Долгов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. – 2021. – С. 251–252.
- [2] Анализ индивидуальной нагрузки на специалистов, выполняющих работы под водой / А.А. Алтунин, А.О. Брель, Е.Ю. Иродов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. – 2021. – С. 245–246.

- [3] Анализ глубин погружения водолазов в процессе работ в гидролаборатории / П.П. Долгов, В.С. Коренной, А.О. Брель [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. – 2021. – С. 243–244.
- [4] Орлов, А.И. Прикладная статистика. Учебник / А.И. Орлов. – Москва: «Экзамен», 2004.
- [5] Лемешко Б.Ю. Критерии проверки отклонения распределения от нормального закона. Руководство по применению: монография / Б.Ю. Лемешко. – Москва: ИНФРА-М, 2018.
- [6] R: A Language and Environment for Statistical Computing. Reference Index. The R Core Team. Version 4.3.0 Under development (unstable). – URL: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-devel/fullrefman.pdf> (дата обращения 26.09.2022).
- [7] ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004. Статистические методы. Статистическое представление данных. Медиана. Определение точечной оценки и доверительных интервалов.

REFERENCES

- [1] Proposals for the Methodology of Processing and Analysis of Diving Operations in Hydrolabs Based on Data Recorded by Dive Computers / A.A. Altunin, A.O. Brel, P.P. Dolgov [et al.] // Manned Space Flights. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference. – 2021. – P. 251–252.
- [2] Analysis of the Load Per Person During Underwater Operations / A.A. Altunin, A.O. Brel, E.Yu. Irodov [et al.] // Manned Space Flights. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference. – 2021. – P. 245–246.
- [3] Analysis of Diver Depths in the Hydrolaboratory / P.P. Dolgov, V.S. Korennoy, A.O. Brel [et al.] // Manned Space Flights. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference. – 2021. – P. 243–244.
- [4] Orlov, A.I. Applied Statistics. Textbook / A.I. Orlov. – Moscow: Ekzamen Publishing House, 2004.
- [5] Lemeshko B.Yu. Criteria for Checking the Deviation of Distribution From Normal Law. Application Manual: Monograph / B.Yu. Lemeshko. – Moscow: INFRA-M, 2018.
- [6] R: A Language and Environment for Statistical Computing. Reference Index. The R Core Team. Version 4.3.0 Under Development (unstable). – URL: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-devel/fullrefman.pdf> (accessed on 26.09.2022).
- [7] GOST R ISO 16269-7-2004. Statistical Methods. Statistical Representation of Data. Median. Determining Point Estimation and Confidence Intervals.