

УДК 519.248+681.2.087

© А. Л. Буляница, 2024

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБОЧНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПЦР-АНАЛИЗА. Ч. 2. МЕТОДИКА УЧЕТА ОШИБОК, СВЯЗАННЫХ С ЧЕЛОВЕЧЕСКИМ ФАКТОРОМ

На примере работы прибора для проведения генетического анализа серии "НАНОФОР 05" рассмотрены источники возможной ошибки, связанные с работой человека-оператора. На основе известных моделей и эмпирических параметров проведена классификация и схематизация ошибок, характерных для различных этапов работы. Предложенные схемы и алгоритмы расчета могут быть обобщены на случай работы с приборами других типов, предполагающих диалоговый режим взаимодействия оператор – прибор. Также описан один из известных тестов на развитие внимательности, относящийся к корректурным пробам, работа с которым может уменьшить число ошибок, вызванных влиянием человеческого фактора. В целом фактор субъективных человеческих ошибок менее значим по сравнению с отказами элементов приборов или/и некорректностью формирования информативного сигнала — кинетической кривой полимеразной цепной реакции в реальном времени, например, по причине ингибирования реакции, образования пузырей в реакционной камере и т.п.

Кл. сл.: ошибка человека-оператора, вероятность ошибки, сочетание условий, тип операции, тест на внимательность, организационные и технические факторы

ВВЕДЕНИЕ

В качестве примера рассматривается проведение анализа на приборе серии "НАНОФОР 05" [1] (Институт аналитического приборостроения РАН, СПб.). Оператор проводит достаточно длинную последовательность операций разного типа, основные из которых: выбор нужного варианта из выпадающего списка, нажатие кнопки, набор последовательности символов (название файла, тип калибровки и т.п.) [2].

Для оценки вероятности ошибки человека-оператора проведена классификация его действий и расчет вероятности ошибок для каждого типа операций на основе известных расчетных методик. Некоторые типы операций повторяются неоднократно, что учитывается в расчетной формуле.

БАЗОВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основой является Инструкция по эксплуатации прибора "НАНОФОР 05" [2]. Перечень действий оператора при проведении генетического анализа методом капиллярного электрофореза при флуоресцентном детектировании содержит следующий набор, включающий 7 типов различных схематичных операций. При этом для отдельных типов операций указан вид ошибки.

1. Нажатие кнопки в меню (например, включение прибора, запуск анализа и т.п.) с подтверждением с помощью цветовой индикации.

2. Нажатие кнопки в меню (например, *Принять данные*) с подтверждением операции в виде всплывающего сообщения.

3. Выбор варианта при простейшей альтернативе Да/Нет (например, *Создать проект*).

4. Выбор нужной строки из выпадающего списка принципиально различной длины от 3–4 до примерно 50 строк.

5. Ручной набор а) имен файлов / пользователей, б) программ измерения и т.п.

При первом варианте (а) набирается последовательность символов, при втором (б) — набор примерно 10 чисел (температуры, напряжения и т.п.) из заданного диапазона.

6. Выбор из выпадающего списка нужной калибровки из примерно 20 вариантов. Требуется проверка выбора — цветовая и текстовая индикация (зеленый индикатор со словом *Хорошее качество калибровки*). Анализ по всем капиллярам. При обнаружении *Удовлетворительного* или *Плохого качества калибровки* по отдельному капилляру (индикаторы желтый и красный) изменить выбор матрицы и произвести переустановку 2–3 параметров программы.

7. Учет нумерации рядов в планшете (возможная ошибка в отсчете: не сверху вниз, а снизу вверх).

Общие аспекты методики расчета ошибок, связанных с человеческим фактором, представлены в работе [3]. Ключевая формула расчета вероятности ошибки имеет вид (1):

$$HEP = GEP \prod_{i=1}^{i=n} (R(i)(W(i)-1)+1), \quad (1)$$

где n — общее число вариантов условий, приводящих к ошибкам при реализации человеком рассматриваемой деятельности; $R(i)$ — коэффициенты важности при сочетании условий. Оценивание интенсивности проявления этих условий (оно находит отражение в "распределении" величин коэффициентов важности $R(i)$ между сочетаниями условий, что делается, как правило, экспертным путем); сумма $R(i)$ равна 1; $W(i)$ — идентификация условий, приводящих к ошибке человека в процессе рассматриваемой деятельности посредством задания/выбора весовых коэффициентов $W(i)$.

В нашем случае n равно 7 в соответствии с выбранными типами операций. Коэффициент важности будем полагать прямо пропорциональным числу повторов операций определенного типа. В рамках этой гипотезы вероятность ошибки при однократном выполнении операции определенно-го типа задается множителем $W(i)$.

Первый масштабный множитель GEP будем характеризовать следующим статусом совокупности задач и квалификации оператора/пользователя:

"Полностью знакомая, хорошо сформулированная, в высокой степени практическая задача, возникающая несколько раз в день и выполняемая согласно наилучшим из возможных стандартов высокомотивированным, хорошо обученным и опытным персоналом, при наличии времени для исправления потенциальной ошибки, но без значительной помощи в работе" с вероятностью ошибки GEP , равной 0.0004.

Из набора весовых коэффициентов условий, рассмотренных в [3] и связанных с проводимыми оператором действиями [2], ограничимся значениями $W(i)$, которые могут соответствовать выбранным 7 классам задач.

C1, неизвестная ситуация, потенциально важная, но случающаяся нечасто или впервые, — 17.

C2, дефицит времени для определения и коррекции ошибки — 11.

C3, отсутствие очевидных способов отмены непреднамеренных действий — 8.

C4, необходимость забыть привычную методику и применить другую, основанную на альтернативных подходах, — 6.

C5, слабая, неопределенная или неструктурированная системная обратная связь — 4.

C6, нет ясных, прямых и своевременных подтверждений намеченных действий со стороны той части системы, по отношению к которой осуществляется управление, — 3.

C7, неопытный оператор (например, только что получивший квалификацию, не относящийся к категории "эксперт") — 3.

C8, малая или не вполне независимая проверка (тестирование) результатов — 3.

C9, несоответствие уровня обучения персонала требованиям задания — 2.

C10, высокий уровень эмоционального стресса — 1.3.

Следует обратить внимание, что в рассматриваемом далее модельном варианте расчета выбраны и использованы не все из предложенных выше возможных (ожидаемых) условий реализации человеческой ошибки. Однако применительно к другим аналогичным типам приборов условия могут быть иные, как входящие в указанную "десятку", так и не входящие. В работе [3] этот набор условий расширен.

РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОШИБКИ ДЛЯ КАЖДОГО ТИПА ОПЕРАЦИЙ

Операции собственно анализа

Рассмотрим упрощенный модельный аналог с выбором уменьшенного иллюстративного числа повторов каждой операции. При использовании Инструкции по эксплуатации прибора "НАНО-ФОР 05" [2] можно более точно указать число повторов действий каждого типа.

Виды операций и примерное число их повторений.

1. Нажатие кнопки в меню (например, **Включение** прибора, **Вид калибровки** и т.п.) с подтверждением с помощью цветовой (зеленой или желтой) индикации.

Ошибка может быть связана, скорее всего, исключительно с высоким уровнем стресса (C10). Частое повторение этого действия не предполагается. Встречается по крайней мере трижды. $W(1) = 1.3$, число повторов 3.

2. Нажатие кнопки в меню (например, **Принять данные**) с подтверждением операции в виде всплывающего сообщения.

Источник ошибки схож с предыдущим. Однако всплывающее сообщение является менее надежным индикатором по сравнению с цветовой индикацией, т.к. текст сообщения может быть воспринят неверно, правда, с достаточно малой вероятностью. Таким образом, помимо высокого уровня стресса (C10) можно говорить про (C6) (отсутствие подтверждений намеченных действий со стороны системы, по отношению к которой

осуществляется управление). Если второй фактор считать существенно менее вероятным (например, 5%), то множитель $W(2) = 0.95 \cdot 1.3 + 0.05 \cdot 3 = 1.385$.

Подобная схема действий может быть при открытии новых окон. В случае сложного алгоритма анализа таких операций может быть не менее 10 (для модельной оценки примем значение 15).

3. Выбор варианта при простейшей альтернативе Да/Нет (например, *Создать проект*). Аналогичными представляются альтернативы Принять/Отмена или Далее/Отмена. Представляется, что источник ошибки аналогичен п. 1. Повторяемость не менее 5 раз. Примем в качестве модельного значения 7.

4. Выбор из выпадающего списка принципиально различной длины от 3–4 до примерно 50. К первому случаю проявления такой ошибки относится выбор из вариантов

Образец,
Положительный /отрицательный контроль,
Алельная лестница.

Ко второму — список вариантов по набору критериев. *Схема Анализа* и *Стандарт* выбираются из короткого выпадающего списка по всем 96 ячейкам. В этом случае источники ошибки могут быть более разнообразными, т.к. они касаются не только выбора нужной позиции из списка, но и подтверждения ошибочного выбора.

Если укрупнить первую часть — ошибка выбора нужной выпадающей строки из списка, в т.ч. длинного, с присутствием большого числа слов с названием полимера, длиной капилляра и т.п., то ошибка при выборе не выявляется программным способом, и ее классификация может относиться как к пункту (C5), так и к пункту (C6). Подтверждение ошибочно сделанного выбора следует относить к пункту (C3) при отсутствии дефицита времени и к пункту (C2) при его наличии.

Пусть вероятности соотношения указанных факторов 80 и 20%. Тогда $W(4)$ в первом случае считается как $0.80 \cdot 3 + 0.20 \cdot 8 = 4.0$, а во втором случае как $0.80 \cdot 4 + 0.20 \cdot 11 = 5.4$. Для оценочного расчета выберем среднее значение 4.7. Число повторов подобного типа действий оператора также достаточно велико. Примем число повторений за 10.

5. Ручной набор *Имен файлов / пользователей, Программ измерения.*

При первом варианте набирается последовательность символов, при втором — набор примерно 10 чисел (температуры, напряжения и т.п.) из заданного диапазона.

Ошибка набора имени файла никаким образом программно не выявляется. Соответственно, эта ситуация классифицируется как (C3). Набор 10 чисел — могут быть ошибки. Однако выход из приемлемого диапазона значений программно

выявляется. Выбор неточного, но допустимого значения не приведет к неисполнению программы, но может повлиять на результат анализа. Однако ошибка во вводе числа в большинстве случаев приобретает форму ввода лишней цифры (или недобор цифр в числе). В этом случае такая ошибка программой обнаружится. Соответственно, если, например, вместо 95 введено 94 или 96 градусов, то такая ошибка ввода может вообще не иметь последствий. В целом ошибку такого рода будем рассматривать из категории (C10).

Очевидно, что ошибка в наборе имени файла существенно более вероятна, чем второй вариант (модельно рассмотрим соотношение вероятностей 90 и 10%).

Оценка $W(5): 0.90 \cdot 8 + 0.10 \cdot 1.3 = 7.33$. Будем считать, что эта процедура проводится трижды.

6. Выбор из выпадающего списка нужной *Калибровки* из примерно 20 вариантов. Требуется проверка выбора — цветовая и текстовая индикация (зеленый индикатор со словом *Хорошее качество калибровки*). Анализ по всем капиллярам. При обнаружении *Удовлетворительного* или *Плохого качества калибровки* по отдельному капилляру (индикаторы желтый или красный) — изменить выбор матрицы и произвести переустановку 2–3 параметров программы.

Так как менять калибровку не рекомендуется, то эта операция и последующие ошибки соответствуют пункту (C1). Остальное, а именно ошибка, связанная с нераспознаванием слова "Хорошее" и зеленым индикатором, может быть вызвано исключительно высоким уровнем стресса (C10). Вероятность первой ошибки будем рассматривать, как 2%.

Коэффициент $W(6): 0.98 \cdot 1.3 + 0.02 \cdot 17 = 1.614$.

7. Учет нумерации рядов в планшете (возможная ошибка в отсчете не сверху вниз, а снизу вверх).

Здесь однозначно связываем ошибку с неопытностью оператора (C7).

Коэффициент $W(7)$ равен 3. Два последних типа ошибки будем считать проявляемыми однократно.

В нашем модельном случае общее число повторов равно 40. Таким образом, $R(1)$ равно 3/40, или 0.075; $R(2)$ равно 15/40, или 0.375 и т.д.

Согласно (1), произведение 7 множителей равно 4.212. Следовательно, с учетом базовой вероятности GEP , равной 0.0004, получим вероятность ошибки оператора, примерно равную 0.17%. Эта вероятность достаточно мала. Однако нужно обратить внимание на изначальную классификацию задачи и заданный этой классификацией масштабный множитель для вероятности ошибки $GEP = 0.0004$. При другой классификации [3], а именно "Обычная, в высокой степени практическая задача, для которой необходим относительно низкий

уровень квалификации", предлагаемая базовая вероятность GEP должна превышать 0.007 (среднее значение 0.02). Тогда для рассмотренной ранее модельной структуры источников ошибок оператора итоговая вероятность ошибки будет не менее 3%, а средняя оценка около 9%.

Вспомогательные операции

Помимо перечисленных ранее операций, для постановки анализа требуется выполнить еще 3 вида работ: а) провести смену картриджа, б) произвести замену геля и в) установить планшеты с пробирками. Эти действия связаны с осуществлением основополагающих операций с прибором и обычно осуществляются более опытными специалистами. Исходя из этого, согласно [3], классификация данного типа операций и базовая вероятность GEP более соответствуют следующему рассмотренному варианту: "Восстановление либо перевод системы в оригинальное или новое состояние в соответствии с установленными процедурами и с некоторой проверкой". Среднее значение GEP равно 0.003, а диапазон вероятностей определен как 0.0008–0.007. Для дальнейших оценок принято среднее значение 0.003.

Так как установка планшета выполняется чаще, чем две другие операции, то коэффициенты важности с суммой 1 распределяются как $R(1) = R(2) = 0.1$ и $R(3) = 0.8$. Соответствующие весовые коэффициенты будут равны $W(1) = W(2) = 8$, т.к. ошибка характеризуется описанием "Отсутствие очевидных способов отмены непреднамеренных (т.е. ошибочных) действий". Применительно к замене планшета существует цветовая индикация некорректной его фиксации. Для этого случая $W(3) = 3$, что соответствует действиям неопытного оператора.

Тогда увеличивающие множители $(1 + R(i)(W(i) - 1))$ для первых двух операций равны $1 + 0.1(8 - 1) = 1.7$, для третьей операции $1 + 0.8(3 - 1) = 2.6$. Соответствующее произведение в формуле (1) примерно равно 7.514. При масштабе GEP , равном 0.3%, эта вероятность составит примерно 2.25%.

Если принять вероятность ошибки оператора по набору первых 7 групп операций в 3%, то суммарная вероятность с учетом совместности, но независимости ошибок составит около 5.18%.

В любом случае полученная вероятность ошибки человека-оператора применительно к упрощенной модельной схеме анализа (работы с прибором "НАНОФОР 05") не превышает нескольких процентов. Даже с учетом того, что при реальной работе на приборе "НАНОФОР 05" число повторений каждого типа операций может быть большим, фактор человеческой ошибки не будет доминирующим, но его необходимо учитывать.

АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОШИБКИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА

А. Время рабочей смены

В [4] проанализировано влияние продолжительности рабочего дня как на производительность, так и на процент безошибочности ввода информации. Для первых 6 ч работы производительность условно оцениваем за 100%. За 7-й, 8-й, ..., 11-й ч она составит соответственно 94, 88, 81, 74 и 66%. Процент безошибочности, принятый на первых 6 ч за 96, уменьшается до значений 90, 85, 78, 71 и 64%. Этот фактор можно учесть, соответствующим образом увеличив вероятности ошибки при удлинении рабочей смены.

Б. Факторы, связанные с техническими аспектами отображения информации

Роль разрешения экрана [5] достаточно велика. Указано, что для офисной работы разрешение экрана допустимо 1920×1080 dpi (точек на квадратный дюйм). Согласно [6], область нажатия на сенсорном экране не менее 1×1 см, а размер кончика пальца 1.6–2 см. При этом для пилотов ошибки, связанные с недостаточной четкостью (плохое различение цифр), составляют 14% (четвертый ранг по значимости) [7].

Следует учесть требования, связанные с минимальным (допустимым) размером символов на экране [8, 9]. На дистанции 2 м символ 8 пикселей (пс) распознается с вероятностью 80%, 11 — 90%, 14 — более 98%. Для цифр Таймс 12 — порядка 97% [8]. Также приводятся формулы зависимости вероятности от освещенности и угла зрения [9]: с расстояния 0.5 м минимально различимый объект порядка 57 мкм при диаметре зрачка 8 мм и 458 мкм при диаметре зрачка 1 мм. Предельно малый кегль — 4 пс (для строчной буквы Таймса — 0.66 мм, для Ариал — 0.76 мм). Нормальный кегль сплошного чтения — 8 пс. Для оптимального размера шрифта 9–12 пс лучше добавлять дополнительный межстрочечный интервал 1–4 пс. Там же приведены оценки приемлемых соотношений между размерами шрифта, расстояний между линиями и словами.

Зашумление изображения, очевидно, уменьшает вероятность его правильного распознавания. Однако, как следует из [10], при соотношении сигнал/шум, превышающем 12 дБ, вероятность ошибки распознавания не более 1%.

В. Ошибки, связанные с вводом сообщений [11]

При вводе командной строки выделены ошибки 4 типов:

- 1 — пропуск знаков и слов (*Пропуск*),
- 2 — перестановка знаков в словах и слов в более длинном тексте (сообщении) (*Перестановка*),
- 3 — добавление (*Добавление*),
- 4 — трансформация (*Трансформация*).

При этом эмпирическая статистика указанных типов ошибок следующая.

Для ошибки типа *Трансформация* вероятность достижения $2.05 \cdot 10^{-3}$ с условной вероятностью ее обнаружения 0.70. Аналогичная пара значений для ошибок *Добавление* — $0.71 \cdot 10^{-3}$ и 0.55; *Пропуск* — $1.23 \cdot 10^{-3}$ и 0.32 и *Перестановка* — $0.10 \cdot 10^{-3}$ и 0.25. При этом, исходя из специфики требований к скорости выполнения операций на войсковых командных пунктах, в [11] указаны времена ввода и контроля одного знака 0.54 и 0.23 с соответственно.

В нашем случае, когда нет столь жестких требований к скорости ввода информации и оперативности контроля введенных данных, эти значения можно считать ориентировочными и завышенными.

Следует обратить внимание на распределение букв в сообщении, поскольку каждая буква распознается с разной вероятностью. Статистика распределения букв латинского алфавита, в частности, представлена в [12].

Фрагмент распределения приведен далее:

(E 0.130), (t 0.105), (a 0.081), (o 0.079), (n 0.071), (r 0.068), (l 0.063), (s 0.061), (h 0.052), (d 0.038), ..., (Y 0.019), (p 0.019), (w 0.015), (b 0.014), (v 0.009), (k 0.004), (x 0.0015), (j 0.0013), (q 0.0011), (z 0.0007).

В отличие от русского языка нет ярко выраженного статистического доминирования гласных [10]. В русском:

(о 0.0764), (е 0.0732), (а 0.0629), (и 0.0577), (т 0.0549), (н 0.049), (р 0.0459), (с 0.0404), (в 0.0355), ..., (ш 0.0026), (э 0.0023) и т.д.

При этом для кириллицы по мере удаления от экрана (или уменьшения размера шрифта) изменения вероятности правильного распознавания буквы "о" не происходит, а букв "а" и "в" — происходит [8]. Таким образом, для точного моделирования вероятностного аспекта, связанного с составом последовательности символов в набираемом сообщении, следовало бы учесть статистику встречаемости букв при случайном выборе названия файла и вероятности искажения различных символов для латиницы. Однако соответствующее моделирование требует учета слишком большого числа факторов, в т.ч. и субъективных и априорно неопределенных. Кроме того, при наборе названия файла, например, структура названия не бывает случайной.

Г. Роль обучения и тестирования

Как правило, минимальная вероятность ошибки для большинства операторов достигается после 4–5 тренировок. Соответствующая вероятность моделируется убывающей экспоненциальной зависимостью с параметром 1.

В [13] описаны различные тесты на внимательность. Некоторые из них, относящиеся к так называемым корректурным пробам (кольца Ландольта), содержат количественные характеристики прохождения теста.

Сам тест состоит в скоростном просмотре колец в течение 10 мин и вычеркивании колец согласно заданному критерию. Далее ведется подсчет числа просмотренных Q и ошибочно вычеркнутых (или не вычеркнутых) колец N .

Изображение колец Ландольта приведено на рис. Подобное изображение часто используется офтальмологами при проверке остроты зрения. Задача испытуемого состоит в скоростном выделении (вычеркивании) колец с одинаковым размещением выреза. Например, выделение колец с вырезом наверху. В верхнем ряду картинки такие кольца занимают места 1, 7 и 12.

Остановимся на одном из описанных показателей — скорости переработки информации S . Этот показатель вычисляется по формуле (2):

$$S = (0.5436Q - 2.807N) / 600. \quad (2)$$

Высокой считается скорость при $S > 1.36$ [13]. Если считать время просмотра одного кольца сопоставимым со временем распознавания одной буквы в бессмысленной буквенной последовательности, то это время составляет 960 мс [12]. В этом случае за 600 с в среднем удастся просмотреть 625 колец, и высокая скорость S не достигнута.

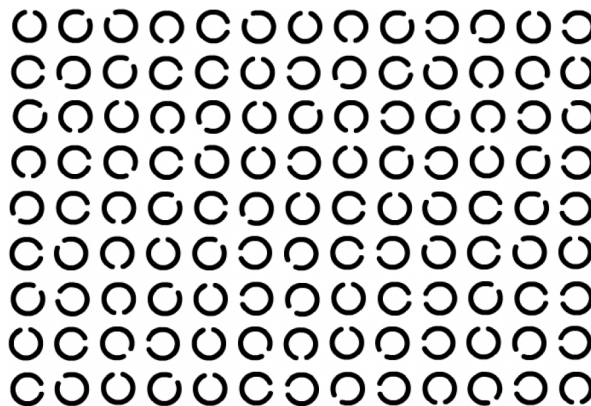


Рис. Изображение колец Ландольта [14]

Требуется выполнить просмотр колец с многократно более высокой скоростью. Например, если просмотрено 1500 колец, то для достижения требуемой высокой скорости переработки информации необходимо, чтобы число ошибок N было равно нулю. При большей скорости просмотра, когда Q составляет 1600 или 1700 колец за 10 мин, допустимое число ошибочно вычеркнутых и не вычеркнутых колец составит примерно 19 и 38. С одной стороны, наблюдается типичный для подобного рода задач "компромисс" между скоростью и точностью. С другой стороны, достижение требуемого показателя с большой вероятностью потребует от обучающегося довольно больших усилий. Таким образом, этот тест можно рассматривать в качестве тренировочного на внимательность практически безотносительно уровня исходной подготовки и конкретного содержания выполняемых задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере использования анализатора "НАНОФОР 05" проведены оценочные расчеты величины вероятности ошибки проведения генетического анализа, связанной с работой человека-оператора. Видно, что по сравнению с вероятностью отказа отдельных элементов или/и блоков прибора значимость рассматриваемого фактора невелика.

Тем не менее описанные подходы и предложенные формулы применимы к другим приборам, использующим развитое программно-математическое обеспечение и требующим работу человека-оператора в диалоговом режиме. В данном контексте прибор "НАНОФОР 05" выступает в качестве модельного объекта (своеобразного "учебного пособия"). Отдельные рекомендации, касающиеся организационно-технических аспектов (выбор размеров шрифта или/и разрешения экрана, организация рабочей смены оператора, выбор тестов для тренировки внимания и т.д.), могут быть распространены не только на случаи работы с наукоемкими приборами, но и на работу с компьютером.

В целом данная статья является частью и естественным продолжением публикаций [15, 16], касающихся оценки ошибок при проведении генетического анализа методом полимеразной цепной реакции в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синтол. Генетический анализатор "НАНОФОР 05". <https://www.syntol.ru/catalog/oborudovanie-i-raskhodnye-materialy-dlya-ptsr-i-geneticheskogo-analiza/geneticheskiy-analizator-nanofor-05.html> (дата обращения 28.03.2024).
2. "НАНОФОР 05" Руководство пользователя. https://www.syntol.ru/docs/Инструкции/Руководство%20НАНОФОР%2005_v032022.pdf (дата обращения 10.08.2024).
3. Ахмеджанов Ф.М., Крымский В.Г. Алгоритм оценки надежности человека-оператора на основе модифицированной методики HEART // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. Т. 15, № 1, С. 60–69. DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-60-69
4. Методологический подход к определению влияния человеческого фактора на работоспособность информационных систем. <https://habr.com/companies/cognitive/articles/209266/> (дата обращения 12.08.2024).
5. Выбираем диагональ и разрешение монитора, чтобы работать и играть с комфортом. <https://journal.citilink.ru/articles/vybiraem-diagonal-i-razreshenie-monitora-chtoby-rabotat-i-igrat-s-komfortom/> (дата обращения 15.08.2024).
6. Иваничкин А. Идеальный размер области касания. <http://uxfox.ru/idealnyj-razmer-oblasti-kasaniya-2/> (дата обращения 19.08.2024).
7. Подходы к анализу ошибок. 2.3. Классификация ошибок. <https://studfile.net/preview/7211082/page:8/> (дата обращения 19.08.2024).
8. Глуценко Л.А., Корзун А.М., Павлов Н.И., Силантьев А.Н., Янчук В.В. Определение вероятности распознавания алфавитно-цифровой информации на экране монитора // Материалы конференции "Прикладная оптика-2006", Санкт-Петербург. 2006. С. 181–184. URL: https://bibl.laser.nsc.ru/download/396-po_sec1.pdf
9. Тарасов Д.А. Зрение и чтение. Екатеринбург: УрФУ, 2015. 75 с.
10. Хорев А.А. Методика оценки вероятности распознавания текстовых символов на зашумленных изображениях // Вестник УрФО. 2019. № 4 (34). С. 5–14. DOI: 10.14529/secur190401
11. Багрецов С.А., Кулганов В.А., Матюшенков К.В., Фомичев А.Д. Ошибки оператора в режиме ввода информации и их контроль на командных пунктах войск // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 16. С. 37–49. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/oshibki-operatora-v-rezhime-vvoda-informatsii-i-ih-kontrol-na-komandnyh-punktah-voysk>

12. Частота встречаемости букв алфавита в текстах основных европейских языков.
URL: <https://beobaxter.livejournal.com/892772.html> (дата обращения 25.09.2024).
13. Васильева И.В. Практикум по психодиагностике: учебное пособие. Тюмень: изд-во Тюменского государственного университета, 2014. 376 с.
14. Кольца Ландольта, картинки. https://chudo-udo.info/media/k2/items/cache/24c01e452493eba0f9e741ef09a2d61a_XL.jpg (дата обращения 28.08.2024).
15. Буляница А.Л., Есикова Н.А., Евстапов А.А. Интерпретация результатов количественного генетического анализа на основе аппроксимации кинетической кривой полимеразной цепной реакции в реальном времени // Научное приборостроение. 2022. Т. 32, № 2. С. 3–19. URL: <http://iairas.ru/mag/2022/abst2.php#abst1>
16. Буляница А.Л. Оценка вероятности ошибочной интерпретации результатов ПЦР-анализа. Ч. 1. Отказы технических устройств // Научное приборостроение. 2023. Т. 33, № 2. С. 49–61.
DOI: 10.18358/23122951_2023_33_2_49

**Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург**

Контакты: Буляница Антон Леонидович,
antbulyan@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 07.09.2024

ESTIMATION OF THE PROBABILITY OF ERRONEOUS INTERPRETATION OF THE RESULTS OF PCR ANALYSIS. PART 2. METHODOLOGY FOR ACCOUNTING FOR HUMAN FACTOR ERRORS

A. L. Bulyanitsa

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint Petersburg, Russia

The sources of possible errors associated with the work of a human operator are considered using the example of the operation of a device for genetic analysis of the NANOFOR 05 series. Based on known models and empirical parameters, a classification and schematization of errors characteristic of various stages of work is carried out. The proposed schemes and calculation algorithms can be generalized to the case of using devices of other types that involve a dialog mode of interaction between the operator and the device. One of the known tests for the development of attentiveness, related to proofreading tests, is also described; its usage lets to reduce the number of errors caused by the influence of the human factor. In general, the factor of subjective human errors is less significant compared to failures of device elements and / or incorrect formation of an informative signal — the kinetic curve of the polymerase chain reaction in real time, for example, due to inhibition of the reaction, formation of bubbles in the reaction chamber, etc.

Keywords: human operator error, probability of error, combination of conditions, type of operation, attentiveness test, organizational and technical factors

REFERENCES

1. Sintol. *Geneticheskii analizator "NANOFOR 05"* [Genetic analyzer "NANOFOR 05"]. URL: <https://www.syntol.ru/catalog/oborudovanie-i-raskhodnye-materialy-dlya-ptsr-i-geneticheskogo-analiza/geneticheskii-analizator-nanofor-05.html> (accessed 28.03.2024). (In Russ.).
2. IAI RAS. *"NANOFOR 05" Rukovodstvo pol'zovatelya* ["NANOFOR 05" User Manual]. (In Russ.). URL: https://www.syntol.ru/docs/Инструкции/Руководство%20НАНОФОР%2005_v032022.pdf (accessed 10.08.2024).
3. Akhmedzhanov F.M., Krymsky V.G. [Heart algorithm for assessment of human operator reliability based on modified heart methodology]. *Ehlektrotechnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrical engineering

- and information complexes and systems], 2019, vol. 15, no. 1, pp. 60–69. (In Russ.). DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-1-60-69
4. HАBR. *Metodologicheskii podkhod k opredeleniyu vliyaniya chelovecheskogo faktora na rabotosposobnost' informatsionnykh sistem* [Methodological approach to determining the impact of the human factor on the performance of information systems]. URL: <https://habr.com/companies/cognitive/articles/209266/> (accessed 12.08.2024). (In Russ.).
 5. Citilink. *Vybiraem diagonal' i razreshenie monitora, chtoby rabotat' i igrat' s komfortom* [Choose the monitor diagonal and resolution to work and play comfortably]. (In Russ.). URL: <https://journal.citilink.ru/articles/vybiraem-diagonal-i-razreshenie-monitora-chtoby-rabotat-i-igrat-s-komfortom/> (accessed 15.08.2024).
 6. Ivanichkin A. *Ideal'nyi razmer oblasti kasaniya* [Ideal touch area size]. URL: <http://uxfox.ru/idealnyj-razmer-oblasti-kasaniya-2/> (accessed 19.08.2024). (In Russ.).
 7. StudFiles. *Podkhody k analizu oshibok. 2.3. Klassifikatsiya oshibok* [Approaches to error analysis. 2.3. Classification of errors]. (In Russ.). URL: <https://studfile.net/preview/7211082/page:8/> (accessed 19.08.2024).
 8. Glushchenko L.A., Korzun A.M., Pavlov N.I., Silantiev A.N., Yanchuk V.V. [Determination of probability of recognition of alphanumeric information on the monitor screen]. *Materialy konferentsii "Prikladnaya optika-2006"* [Proc. conf. "Applied Optics-2006"], Saint Petersburg, 2006. pp. 181–184. (In Russ.). URL: https://bibl.laser.nsc.ru/download/396-po_sec1.pdf
 9. Tarasov D.A. *Zrenie i chtenie* [Vision and reading]. Yekaterinburg, UrFU Publ., 2015. 75 p. (In Russ.).
 10. Horev A.A. [Technique of estimation of probability of recognition of text symbols on noisy images]. *Vestnik URFO* [Journal of the Ural Federal district. Information security], 2019, no. 4 (34), pp. 5–14. (In Russ.). DOI: 10.14529/secur190401
 11. Bagretsov S.A., Kulganov V.A., Matyushenok K.V., Fomichev A.D. [Operator errors in the data entry mode and their control at the troops command posts]. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika* [Aerospace forces. Theory and practice], 2020, no. 16, pp. 37–49. (In Russ.) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/oshibki-operatora-v-rezhime-vvoda-informatsii-i-ih-kontrol-na-komandnyh-punktah-voysk>
 12. LiveJournal. *Chastota vstrechaemosti bukv alfavita v tekstakh osnovnykh evropeiskikh yazykov* [Frequency of occurrence of letters of the alphabet in texts of major European languages]. (In Russ.). URL: <https://beobaxter.livejournal.com/892772.html> (accessed 25.09.2024).
 13. Vasil'eva I.V. *Praktikum po psikhodiagnostike: uchebnoe posobie* [Workshop on psychodiagnostics: textbook]. Tyumen, UTMN Publ., 2014. 376 p. (In Russ.).
 14. Chudo-Udo. *Kol'tsa Landol'ta, kartinki* [Landolt rings, pictures]. (In Russ.) URL: https://chudo-udo.info/media/k2/items/cache/24c01e452493eba0f9e741ef09a2d61a_XL.jpg (accessed 28.08.2024).
 15. Bulyanitsa A.L., Esikova N.A., Evstrapov A.A. [Interpretation of the results of quantitative genetic analysis based on the approximation of the kinetic curve of the polymerase chain reaction in real time]. *Nauchnoe Priborostroyeniye* [Scientific Instrumentation], 2022, vol. 32, no. 2, pp. 3–19. DOI: 10.18358/np-32-2-i319 (In Russ.).
 16. Bulyanitsa A.L. [Estimation of the probability of erroneous interpretation of the results of pcr analysis. Part 1. Failures of technical devices]. *Nauchnoe Priborostroyeniye* [Scientific Instrumentation], 2023, vol. 33, no. 2, pp. 49–61. (In Russ.). DOI: 10.18358/23122951_2023_33_2_49

Contacts: *Bulyaniza Anton Leonidovich*,
antbulyan@yandex.ru

Article received by the editorial office on 07.09.2024

INTRODUCTION

As an example, we consider the analysis performed on the "HAHOФOP 05" series device [1] (Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg). The operator performs a fairly long sequence of operations of various types, the main ones being selecting the desired option from a drop-down list, pressing a button, and entering a sequence of characters (file name, calibration type, etc.) [2].

To assess the probability of human operator error, we classified his actions and calculated the probability of errors for each type of operation based on known calculation methods. Some types of operations are repeated many times, which is taken into account in the calculation formula.

BASIC PROVISIONS

The basis is the Operating Instructions for the "HAHOФOP 05" device [2]. The list of operator actions during genetic analysis by capillary electrophoresis with fluorescence detection contains the following set, including 7 types of different schematic operations. In this case, the type of error is indicated for individual types of operations.

1. Pressing a button in the menu (for example, turning on the device, starting the analysis, etc.) followed by a color-indicated confirmation.

2. Pressing a button in the menu (for example, **Accept data**) followed by a pop-up message confirmation

3. Selecting the simplest Yes/No alternative option (for example, **Create Project**).

4. Select the desired line from the drop-down list of fundamentally different lengths from 3–4 up to about 50 lines.

5. Manual typing: a) file/user names, б) measurement programs, etc.

In the first option (a), a sequence of characters is entered; in the second (б) — a set of approximately 10 numbers (temperature, voltage, etc.) from a given range is entered.

6. Selecting the required calibration from a drop-down list of approximately 20 options. The selection check is required — color and text indication (green indicator with the text **Good calibration quality**). Analysis for all capillaries. If **Satisfactory** or **Poor calibration** is detected for a single capillary (yellow and red indicators), change the matrix selection and reset 2–3 program parameters.

7. Accounting for the numbering of rows in the plate (possible error in counting: not from top to bottom, but from bottom to top).

General aspects of the method for calculating human error are presented in work [3]. The key formula for calculating the error probability is (1):

$$HEP = GEP \prod_{i=1}^{i=n} (R(i)(W(i)-1)+1), \quad (1)$$

where n is the total number of options for conditions leading to human errors during considered human operations; $R(i)$ are the importance factors for a combination of conditions. Assessment of the intensity of manifestation of these conditions (it is reflected in the "distribution" of the values of the importance coefficients $R(i)$ between combinations of conditions, which is usually done by experts); the sum of $R(i)$ is 1; $W(i)$ is the identification of conditions leading to human error in the considered operations by setting/selecting weight coefficients $W(i)$.

In our case, n is equal to 7 according to the selected types of operations. The importance factor is assumed to be directly proportional to the number of repetitions of operations of a certain type. Within the framework of this hypothesis, the probability of error during performing a single operation of a certain type is given by the factor $W(i)$.

The first GEP scale factor is characterized by the following status of the set of tasks and operator/user qualifications:

"A fully familiar, well-defined, highly practical task that occurs several times a day and is performed according to the best possible standard by highly motivated, well-trained, and experienced personnel, with time to correct a potential error, but without significant assistance in work" with a GEP error probability of 0.0004.

From the set of condition weights discussed in [3] and related to operator actions [2], we limit ourselves to values $W(i)$ that can correspond to the selected 7 classes of tasks.

C1, an unknown situation, potentially important, but not frequent or for the first time — 17.

C2, the time shortage for error detection and correction is 11.

C3, there are no obvious ways to cancel unintended actions — 8.

C4, the need to forget the usual technique and apply another one based on alternative approaches is 6.

C5, weak, uncertain, or unstructured system feedback — 4.

C6, there are no clear, direct, and timely confirmations of planned actions from the part of the system in relation to which control is exercised — 3.

C7, inexperienced operator (e.g., newly qualified, non-expert) — 3.

C8, small or not completely independent verification (testing) of results — 3.

C9, non-compliance of the personnel training level with the task requirements — 2.

C10, high level of emotional stress — 1.3.

It should be noted that in the following model version of the calculation, not all of the possible (expected) conditions for the realization of human error proposed above have been selected and used. However, with regard to other similar types of devices, the conditions may be different, both included in the specified "ten" and not included. In the work [3], this set of conditions is expanded.

ESTIMATED ERROR PROBABILITIES FOR EACH TYPE OF OPERATION

Operations within the analysis

Let us consider a simplified model analog with the selection of a reduced illustrative number of repetitions of each operation. Using the operating instructions for the "НАНОФОР 05" device [2], it is possible to more accurately indicate the number of repetitions of actions of each type.

Types of operations and the approximate number of their repetitions.

1. Pressing a menu button (e.g., **Turning** on the device, **Type of calibration**, etc.) and then receiving a confirmation with a color (green or yellow) indication.

The error can be associated, most likely, exclusively with a high level of stress (C10). Frequent repetition of this action is not expected. It occurs at least three times. $W(1) = 1.3$, number of repetitions 3.

2. Pressing a button in the menu (e.g., **Accept data**) followed by a confirmation of the operation in the form of a pop-up message.

The source of the error is similar to the previous one. However, a pop-up message is a less reliable indicator compared to a color indication, since the message text can be perceived incorrectly, albeit with a fairly low probability. Thus, in addition to the high level of stress (C10), we can talk about (C6) (lack of confirmation of the intended actions from the system in relation to which control is carried out). If the second factor is considered significantly less probable (for example, 5%), then the factor $W(2) = 0.95 \cdot 1.3 + 0.05 \cdot 3 = 1.385$.

A similar scheme of actions may be used to open new windows. In the case of a complex algorithm for analyzing, there can be at least 10 such operations (for a model estimate, we take the value 15).

3. Select the simplest alternative option Yes/No (for example, **Create Project**). The alternatives Accept/Cancel or Next/Cancel seem similar. The source of the error appears to be similar to item 1). Repeatability is not less than 5 times. Let's take 7 as a model value.

4. Selection from the drop-down list of fundamentally different lengths from 3-4 to about 50.

The first case of such an error is the choice of options

Sample,
Positive/negative control,
Allelic ladder.

The second is a list of options for a set of dyes. The **Analysis Scheme** and **Standard** are selected from a short drop-down list for all 96 cells. In this case, the sources of the error can be more diverse, since they concern not only the selection of the desired item from the list but also the confirmation of the erroneous selection.

If you enlarge the first part, it is an error to select the desired drop-down line from the list, including a long one, with a large number of words — polymer name, capillary length, etc. — then the selection error is not detected programmatically, and its classification can refer to both (C5) and (C6). Confirmation of an erroneous choice should be attributed to point (C3) in the case of a time shortage and to item (C2) if it exists.

Let the probabilities of the ratio of these factors be 80% and 20%. Then $W(4)$ in the first case is calculated as $0.80 \cdot 3 + 0.20 \cdot 8 = 4.0$, and in the second case as $0.80 \cdot 4 + 0.20 \cdot 11 = 5.4$. For the estimated calculation, we choose the average value of 4.7. The number of repetitions of this type of operator action is also quite large. Let's take the number of repetitions as 10.

5. Manual typing of **File/User Names**, **Measurement Programs**.

In the first case, a sequence of characters is typed; in the second case — a set of approximately 10 numbers (temperature, voltage, etc.) from a given range.

An error in entering a file name is not detected by the program in any way. Thus, this situation is classified as (C3). Typing of 10 numbers can lead to the errors. However, going beyond the acceptable range of values is detected by the program. Choosing an inaccurate but acceptable value will not cause the program to fail but may affect the analysis result. However, an error in entering a number in most cases takes the form of entering an extra digit (or a shortage of digits in the number). In this case, the program will detect such an error. Accordingly, if, for example, 94 or 96 degrees are entered instead of 95, then such an input error may have no consequences at all. In general, we refer an error of this kind to category (C10).

It is obvious that an error in entering a file name is much more probable than the second option (we will consider the ratio of probabilities of 90 and 10% as a model).

Grade $W(5)$: $0.90 \cdot 8 + 0.10 \cdot 1.3 = 7.33$. Let's assume that this procedure is carried out three times.

6. Select the desired **Calibration** from about 20 options in the drop-down list. A selection check is required — color and text indications (green indicator with the words **Good calibration quality**). Analysis

for all capillaries. If **Satisfactory** or **Poor quality calibration** is detected for an individual capillary (yellow or red indicators), change the matrix selection and reset 2–3 program parameters.

Since it is not recommended to change the calibration, this operation and subsequent errors correspond to item (C1). The rest, namely the error associated with the failure to recognize the word "Good" and a green indicator, can be caused by an exceptionally high level of stress (C10). The probability of the first error will be considered as 2%.

The coefficient $W(6)$: $0.98 \cdot 1.3 + 0.02 \cdot 17 = 1.614$.

7. Accounting for the numbering of rows in the plate (a possible error in counting not from top to bottom, but from bottom to top).

Here we unambiguously associate the error with the inexperience of the operator (C7).

The coefficient $W(7)$ is 3. The last two types of errors we consider to appear only once.

In our model case, the total number of repetitions is 40. Thus, $R(1)$ is $3/40$, or 0.075; $R(2)$ is $15/40$, or 0.375, etc.

According to (1), the product of 7 factors is 4.212. Therefore, taking into account the basic probability of GEP being equal to 0.0004, we get the probability of operator error approximately equal to 0.17%. This probability is quite small. However, one needs to pay attention to the initial classification of the problem and the scale factor specified by this classification for the error probability $GEP = 0.0004$. In another classification [3], namely, "An ordinary, highly practical task for which a relatively low level of qualification is required", the proposed base probability of GEP should exceed 0.007 (average value 0.02). Then, for the previously considered model structure of the sources of operator errors, the total error probability will be at least 3%, and the average score is about 9%.

Auxiliary operations

In addition to the operations listed above, 3 more types of work are required to carry out the analysis: a) change the cartridge, b) change the gel, and c) install the plate with tubes. These actions are linked to the main operations with the device and are usually carried out by more experienced specialists. Based on this, according to [3], the classification of this type of operation and the basic probability of GEP are more consistent with the following considered option: "Restoration or transfer of the system to an original or new state in accordance with established procedures and some verification". The average GEP is 0.003, and the probability range is determined as 0.0008–0.007. An average of 0.003 was used for further evaluations.

Since the installation of the plate is performed more often than the other two operations, the importance coefficients with the sum of 1 are distributed as

$R(1) = R(2) = 0.1$ and $R(3) = 0.8$. The corresponding weighting factors are $W(1) = W(2) = 8$, since the error is characterized by the description "Absence of obvious ways to cancel unintentional (i.e., erroneous) actions". In relation to the replacement of the tablet, there is a color indication of its incorrect fixation. For this case $W(3) = 3$, which corresponds to the actions of an inexperienced operator.

Then the increasing factors $(1 + R(i) \cdot (W(i) - 1))$ for the first two operations are $1 + 0.1 (8 - 1) = 1.7$, for the third operation is $1 + 0.8 (3 - 1) = 2.6$. The corresponding product in formula (1) is approximately 7.514. With a GEP scale of 0.3%, this probability will be approximately 2.25%.

If we take the probability of operator error for the set of the first 7 groups of operations at 3%, then the total probability, taking into account compatibility but independence of errors, will be about 5.18%.

In any case, the resulting probability of human operator error in relation to a simplified model analysis (of the NANOFOR device operation) does not exceed several percent. Even taking into account the fact that during real work on the NANOFOR device the number of repetitions of each type of operation can be large, the human error factor will not be dominant, but it must be taken into account.

ANALYSIS OF ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL ASPECTS AFFECTING HUMAN OPERATOR ERRORS

Shift time

In [4] the impact of working hours both for productivity and for the percentage of error-free information input. For the first 6 hours of work, we conditionally estimate the performance for 100%. For the 7th, 8th, ..., 11th hour, it will be co-responsibly 94, 88, 81, 74 and 66%. Error-free percentage taken at the first 6 hours in 96, decreases to values of 90, 85, 78, 71 and 64%. This factor can be taken into account by increasing the probability of error when lengthening the work shift accordingly.

Factors related to technical aspects of information display

The role of screen resolution [5] is quite significant. It is indicated that for office work, the acceptable screen resolution is 1920×1080 dpi (dots per square inch). According to [6], the pressing area on the touch screen is not less than 1×1 cm, and the fingertip size is 1.6–2 cm. For pilots, errors associated with insufficient clarity (poor discrimination of numbers) make up 14% (the fourth rank in significance) [7].

It is necessary to take into account the requirements associated with the minimum (acceptable) size of symbols on the screen [8, 9]. At a distance of 2 m,

the symbol of 8 pixels (ps) is recognized with a probability of 80%, 11 — 90%, 14 — more than 98%. For Times 12 numbers — about 97% [8]. Formulas for the dependence of probability on illumination and viewing angle are also given [9]: from a distance of 0.5 m, the minimum distinguishable object is about 57 μm with a pupil diameter of 8 mm and 458 μm with a pupil diameter of 1 mm. The smallest font size is 4 ps (for a lowercase Times letter — 0.66 mm, for Arial — 0.76 mm). The normal font size for continuous reading is 8 ps. For an optimal font size of 9–12 ps, it is better to add an additional line spacing of 1–4 ps. Estimates of acceptable ratios between font sizes, distances between lines and words are also given there.

Image noise obviously reduces the probability of its correct recognition. However, as follows from [10], with a signal-to-noise ratio exceeding 12 dB, the probability of recognition error is no more than 1%.

Message entry errors [11]

When entering the command line, 4 types of errors are distinguished:

- 1 — omission of characters and words (*Omission*),
- 2 — permutation of characters in words and words in a longer text (message) (*Permutation*),
- 3 — addition (*Addition*),
- 4 — Transformation (*Transformation*).

The empirical statistics of the indicated error types are as follows.

For an error of the *Transformation* type, the probability of reaching $2.05 \cdot 10^{-3}$ with a conditional probability of its detection is 0.70. A similar pair of values for errors *Addition* — $0.71 \cdot 10^{-3}$ and 0.55; *Skip* — $1.23 \cdot 10^{-3}$ and 0.32 and *Permutation* — $0.10 \cdot 10^{-3}$ and 0.25. Based on the requirements for the speed of operations at military command posts, in [11] the input and control times of one character are indicated as 0.54 and 0.23 s, respectively.

In our case, when there are no such strict requirements for the speed of entering information and the efficiency of monitoring the entered data, these values can be considered approximate and overstated.

Attention should be paid to the distribution of letters in the message, since each letter is recognized with different probability. Statistics on the distribution of letters of the Latin alphabet, in particular, are presented in [12].

A fragment of the distribution is given below:

(E 0.130), (t 0.105), (a 0.081), (o 0.079), (n 0.071), (r 0.068), (I 0.063), (s 0.061), (h 0.052), (d 0.038), ..., (Y 0.019), (p 0.019), (w 0.015), (b 0.014), (v 0.009), (k 0.004), (x 0.0015), (j 0.0013), (q 0.0011), (z 0.0007).

Unlike the Russian language, there is no clearly expressed statistical dominance of vowels [10]. In Russian:

(o 0.0764), (e 0.0732), (a 0.0629), (и 0.0577), (т 0.0549), (н 0.049), (р 0.0459), (с 0.0404), (в 0.0355), ..., (ш 0.0026), (э 0.0023) and etc.

For the Cyrillic alphabet, as the distance from the screen increases (or the font size decreases), the probability of correct recognition of the letter "o" does not change, but for the letters "a" and "v" it does [8]. Thus, for accurate modeling of the probabilistic aspect associated with the composition of the sequence of symbols in the typed message, it would be necessary to take into account the statistics of the occurrence of letters in a random selection of a file name and the probability of distortion of various symbols for the Latin alphabet. However, the corresponding modeling requires taking into account too many factors, including subjective and a priori uncertain ones. In addition, when typing a file name, for example, the structure of the name is never random.

Role of training and testing

As a rule, the minimum probability of error for most operators is achieved after 4–5 training sessions. The corresponding probability is modeled by a decreasing exponential dependence with a parameter of 1.

Various tests for attention are described in [13]. Some of them, related to the so-called proofreading tests (Landolt rings), contain quantitative characteristics of passing the test.

The test consists of quickly viewing the rings for 10 minutes and crossing out the rings according to a given criterion. Then the number of viewed Q and erroneously crossed out (or not crossed out) rings N is counted.

The image of Landolt rings is shown in Fig. A similar image is often used by ophthalmologists for checking visual acuity. The task of the subject is to quickly select (cross out) rings with the same placement of the cutout. For example, selecting rings with a cutout at the top. In the top row of the picture, such rings occupy places 1, 7 and 12.

Fig. Image of Landolt rings [14]

Let's dwell on one of the described indicators — the speed of processing information S . This indicator is calculated by the formula (2):

$$S = (0.5436Q - 2.807N) / 600. \quad (2)$$

Speed is considered high at $S > 1.36$ [13]. If we consider the time of viewing of one ring comparable with the time of recognition of one letter in a meaningless letter sequence, then this time is 960 ms [12].

In this case, 625 rings can be viewed in 600 s on average, and the high speed S is not reached.

It is necessary to view the rings at a much higher speed. For example, if 1500 rings are viewed, then in order to achieve the required high speed of information processing, the number of errors N must be zero. At a higher viewing speed, when Q is 1600 or 1700 rings in 10 minutes, the permissible number of erroneously crossed out and not crossed out rings will be approximately 19 and 38. On the one hand, there is a typical "compromise" between speed and accuracy for this kind of task. On the other hand, achieving the required indicator is likely to require quite a lot of effort from the student. Thus, this test can be considered as a training for attentiveness, almost regardless of the level of initial training and the specific content of the tasks being performed.

CONCLUSION

Using the "HAHOΦOP 05" analyzer as an example, estimated calculations of the probability of error in

genetic analysis associated with the work of a human operator were carried out. It is evident that, compared to the probability of failure of individual elements and/or units of the device, the significance of the factor under consideration is insignificant.

Nevertheless, the approaches described and the formulas proposed are applicable to other devices that employ advanced software and mathematical support and require the work of a human operator in a dialog mode. In this context, the "HAHOΦOP 05" device acts as a model object (a kind of "training manual"). Individual recommendations concerning organizational and technical aspects (choosing font sizes and/or screen resolution, organizing the operator's work shift, choosing tests for training attention, etc.) can be extended not only to cases of working with science-intensive device, but also to working with a computer.

In general, this article is a part and a natural continuation of publications [15, 16] concerning the assessment of errors in genetic analysis using the real-time polymerase chain reaction method.