

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА РАБОТНИКА ПРИ РАЗНЫХ ВАРИАНТАХ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РАБОТ

А.Н. Варнавский (РГРТУ)

Предложена имитационная модель производительности труда работника с учетом процессов утомления и восстановления. Проанализировано полученное семейство кривых зависимостей производительности деятельности от числа регламентированных перерывов при различных значениях начальной работоспособности, интенсивностей утомления и восстановления. Описывается автоматизированная система для съема и анализа кожно-гальванической реакции оператора, которая осуществляет сигнализацию о необходимости отдыха.

Ключевые слова: производительность труда, работоспособность, утомление, имитационная модель, GPSS World, кожно-гальваническая реакция, LabVIEW.

Введение

Одно из ключевых условий процесса достижения экономических целей организации является сохранение физического здоровья и поддержание оптимального психофизиологического состояния работников. Известно, что ухудшение состояния здоровья работников влечет за собой серьезные экономические потери: рост страховых выплат по болезни, прямые медицинские затраты, расходы на обучение работников взамен выбывших из-за несчастных случаев, травматизма, снижение производительности труда. Так, величина этих затрат в США превышает 150 млрд. долл. США в год [1].

При правильной организации трудовой деятельности работников технологического производства возможно снижение негативных воздействий трудовой деятельности, поддержание работоспособности на максимальном уровне в течение длительного времени, снижение вероятности возникновения аварий по вине человека, в связи с чем задача исследования вариантов планирования производственных работ является актуальной.

Целью работы является имитационное моделирование производительности труда работников производства при разных вариантах планирования производственных работ и разработка автоматизированной системы для контроля и поддержания оптимального уровня работоспособности работников производств.

При имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс деятельности работника во времени, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс работы, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики деятельности.

Математическое описание деятельности и производительности работника производства

Производительность труда характеризует способность работников создавать своим трудом товары и услуги за час, смену, неделю, месяц или год. Количество работы, произведенной одним работником, называется выработкой. Можно считать, что произ-

водительность труда в текущий момент времени пропорциональна работоспособности работника, соответственно за рабочий день производительность Pr можно определить как:

$$Pr = k \int_0^{t_{\text{раб}}} B(t) dt, \quad (1)$$

где $B(t)$ — зависимость величины работоспособности работника от времени, $t_{\text{раб}}$ — время деятельности, k — коэффициент, который учитывает преобразование величины деятельности работника в количество продукции или услуг.

При моделировании деятельности работника производства необходимо учитывать процессы его утомления и восстановления, непосредственно влияющие на работоспособность [2]. Под утомлением понимают временное уменьшение работоспособности, вызванное интенсивной или длительной работой. При физическом труде накоплению утомления способствуют условия труда и эмоциональные факторы. Для описания процесса снижения работоспособности B от длительности работы t при наличии утомления можно использовать зависимость вида:

$$B(t) = B_0 \exp(-\mu_u \cdot t), \quad (2)$$

где B_0 — начальное значение работоспособности; μ_u — интенсивность накопления утомления.

Снижение утомления и восстановление работоспособности достигается организацией перерывов для отдыха между отдельными производственными операциями, которые могут иметь различную продолжительность от нескольких секунд (микропаузы) и минут (регламентированные перерывы, перерывы для личных надобностей) до часа (обеденный перерыв). Наиболее интенсивное восстановление работоспособности происходит в начале каждого перерыва.

Для описания процесса восстановления работоспособности B от длительности отдыха t можно использовать зависимость вида:

$$B(t) = (B_m - B_{0m}) (1 - \exp(-\mu_v \cdot t)) + B_{0m}, \quad (3)$$

где B_m и B_{0m} — значения уровней работоспособности в моменты начала работы (максимальное значение работоспособности) и начала перерыва; μ_v — интенсивность восстановления работоспособности.

Если число и длительность периодов регламентированного отдыха для восстановления работоспособности равно n и Tr [мин] соответственно, и все перерывы распределены равномерно, то длительность интервала Tw [мин], в течение которого осуществляется деятельность работника с учетом наличия обеденного перерыва длительностью Th [мин], будет определяться по формуле:

$$Tw = \frac{T - Th - n \cdot Tr}{n + 2}, \quad (4)$$

где T – число минут в рабочем дне (например, $T=540$ мин для 8-часового рабочего дня и 60 мин обеденного перерыва).

Обозначим номер интервала деятельности работника длительности Tw как i . Соответственно i может принимать значения в диапазоне $1..n+2$.

Используя формулы (1)-(4), запишем выражение для определения производительности труда Pr_1 в первой половине рабочего дня в виде:

$$Pr_1 = k \sum_{i=1}^{n/2+1} \int_{(Tw+Tr)(i-1)}^{(Tw+Tr)i-Tr} B(t) dt. \quad (5)$$

Аналогичное выражение запишем для производительности труда Pr_2 во второй половине рабочего дня:

$$Pr_2 = k \sum_{i=n/2+2}^{n+2} \int_{\frac{T+Th}{2} + (Tw+Tr)(i-\frac{n}{2}-2)}^{\frac{T+Th}{2} + (Tw+Tr)i-Tr} B(t) dt. \quad (6)$$

В интервалах $((Tw+Tr)i-Tr; (Tw+Tr)i)$ при $i=1..n/2+1, ((T-Th)/2; (T+Th)/2), ((T+Th)/2+(Tw+Tr)(i-(n/2+1))-Tr; (T+Th)/2+(Tw+Tr)(i-(n/2+1)))$ при $i=n/2+2..n+2$, являющихся перерывами для регламентированного отдыха и обеденным перерывом, происходит увеличение значения $B(t)$ в соответствии с формулой (3), величина производительности труда Pr_1 или Pr_2 при этом не меняется.

Производительность Prm за рабочий день найдем по формуле:

$$Pr = Pr_1 + Pr_2. \quad (7)$$

Имитационная модель деятельности работника

Общее время на отдых в нашей стране определяется по методике, разработанной НИИ труда [2]. Согласно этой методике, сначала надо выявить факторы, влияющие на утомление при данной работе. Имеются таблицы, в которых приведены проценты времени на отдых (от оперативного времени) по нескольким градациям каждого фактора. Методика учитывает следующие факторы: затраты физических усилий (для этого фактора отдых занимает 1...9% оперативного времени выполнения работы), нервное напряжение (1...5%), темп работы (1...4%), рабочее положение (1...4%), монотонность рабо-

ты (1...3%), температура, влажность, тепловое излучение в рабочей зоне (1...5%), загрязненность воздуха (1...5%), производственный шум (1...4%), вибрация и толчки (1...4%), освещение (1...2%). Общий процент времени на отдых находится суммированием процентов времени на отдых по каждому фактору.

Для оценки эффективности такой методики разработаем имитационную модель деятельности работника производства в течение дня. В качестве результата работы модели определим производительность труда за рабочий день.

На рис. 1 представлен моделирующий алгоритм воспроизведения деятельности и отдыха работника в течение рабочего дня. Блоки 1–2 формируют и определяют временные параметры работы и отдыха, интенсивности накопления усталости и восстановления работоспособности. В блоке 3 происходит установка начальных зна-

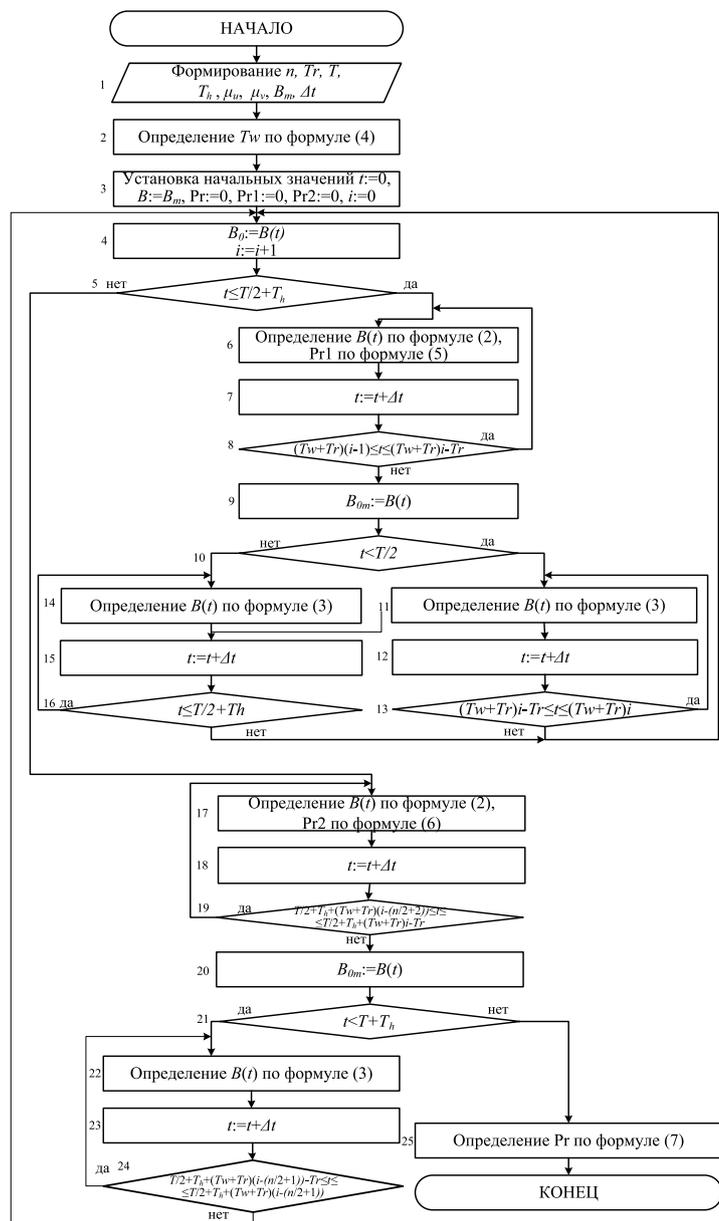


Рис. 1. Моделирующий алгоритм воспроизведения деятельности и отдыха работника

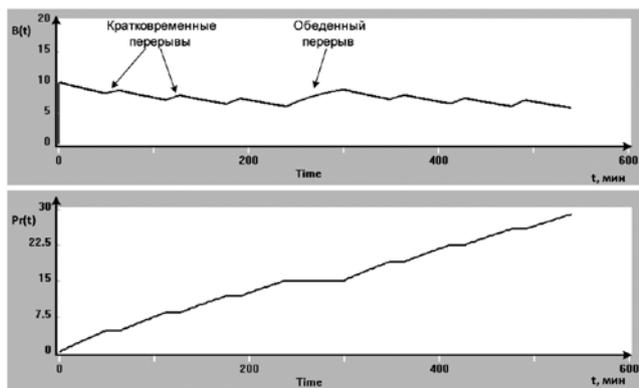
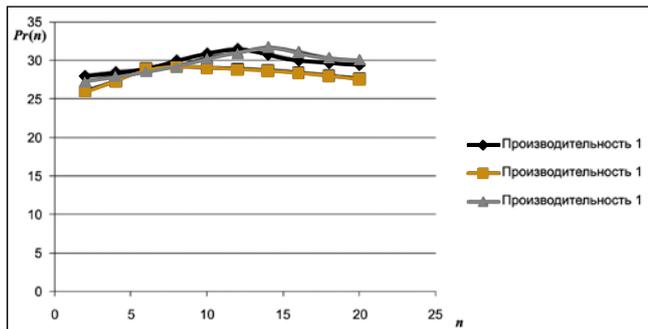


Рис. 2. Результаты моделирования

Рис. 3. Семейство кривых зависимостей $Pr(n)$ при разных значениях B_m, μ_u, μ_v

чений работоспособности, производительности, счетчика интервалов работы. Для установки начального значения работоспособности очередного интервала работы используется блок 4. Блок 5 сравнивает модельное время с суммой длительностей половины рабочего дня и обеденного перерыва, осуществляя тем самым моделирование деятельности работника либо до обеденного перерыва (блоки 5-16), либо после (блоки 17-24).

Блоки 6-8 и 17-19 описывают деятельность работника и его производительность на i -ом интервале работы, а блоки 11-13 и 22-24 — отдых и восстановление на периоде, следующем за i -м интервалом работы. Блоки 9 и 20 задают значения уровня работоспособности в момент начала перерыва. Для описания отдыха и восстановления во время обеденного перерыва используются блоки 14-16.

Блок 10 определяет обеденный перерыв, а блок 21 — конец рабочего дня, после которого в блоке 25 происходит расчет общей производительности труда работника за рабочий день.

На основе рассмотренного моделирующего алгоритма в пакете GPSS World [3] была реализована имитационная модель.

На рис. 2 представлены результаты моделирования при следующих значениях параметров $T=540$ мин, $T_r=10$ мин, $n=6$, $B_m=10$, $\mu_u=0.002$ мин⁻¹, $\mu_v=0.02$ мин⁻¹: зависимости работоспособности $B(t)$ и производительности $Pr(t)$ от времени. Производительность Prm за рабочий день соответствует значению $Pr(T)$ и равна 29 усл. ед.

Исследуем влияние числа n регламентированных перерывов на производительность Prm за рабочий

день. Для этого проведем серию экспериментов с полученной имитационной моделью, определяя значения Prm при n от 2 до 20. Результатом эксперимента является зависимость $Prm(n)$.

Изменяя значения параметров B_m, μ_u, μ_v , повторим серию экспериментов по определению зависимостей $Prm(n)$ при n от 2 до 20. Необходимость проведения таких экспериментов обусловлена тем, что значения B_m, μ_u, μ_v зависят от биологических свойств работника и его текущего функционального состояния. На рис. 3 представлено семейство кривых зависимостей $Prm(n)$ при разных значениях B_m, μ_u, μ_v .

Проанализировав результаты моделирования, можно сделать два основных вывода.

Во-первых, производительность работника Prm за рабочий день является функцией от числа регламентированных перерывов n , причем такая зависимость имеет один максимум при некотором значении $n_{\text{опт}}$: $Prm(n_{\text{опт}})=\max$.

Во-вторых, $n_{\text{опт}}$ в каждой зависимости $Prm(n, B_m, \mu_u, \mu_v)$ имеет свое значение, т.е. является функцией от величин параметров B_m, μ_u, μ_v : $n_{\text{опт}}=f(B_m, \mu_u, \mu_v)$.

Исходя из данных выводов, для определения оптимального числа регламентированных перерывов введем критерий максимальной производительности, суть которого можно сформулировать следующим образом. Для каждого работника в зависимости от его биологических свойств и текущего функционального состояния на момент начала работы может быть выбрано определенное число $n_{\text{опт}}$ регламентированных перерывов, только при этом значении будет достигнута максимальная производительность за рабочий день.

Таким образом, использование методики по регламентации времени на отдых и числа перерывов, в которой такие значения задаются постоянными в зависимости только от типа производственных работ, имеет существенный недостаток, связанный с тем, что отсутствие учета текущих значений B_m, μ_u, μ_v может привести к отклонению производительности за рабочий день от максимально возможного. Особенно сильно это может проявиться при коллективной деятельности, где общий результат работы определяется деятельностью и производительностью каждого работника.

Определить значения B_m, μ_u, μ_v с дальнейшим расчетом $n_{\text{опт}}$ перед началом работы можно путем проведения тестирования, по результатам которого возможна оценка интенсивностей утомления и восстановления, максимальной работоспособности. Например, тесты Крепелина, Хильченко позволяют оценить данные параметры, применительно к умственной деятельности [4].

Автоматизированная система оценки утомления и работоспособности оператора

Для умственного труда, связанного с интенсивными психоэмоциональными воздействиями, характерна высокая степень утомления, нервное перенапряжение [2]. К такому труду может быть отнесена

деятельность операторов некоторых производственных, энергетических и транспортных систем.

Часто такие воздействия носят неперіодический или случайный характер. В этих случаях перерывы целесообразно организовать в зависимости от текущего функционального состояния оператора, введя критический уровень состояния ΔB , по достижению которого необходимо предоставить отдых: при $B(t) \geq \Delta B$ осуществляется работа оператора, при $B(t) < \Delta B$ — отдых оператора.

В таких случаях при организации производственных работ и учета воздействия негативных факторов необходимы средства для динамической оценки функционального состояния оператора.

В качестве такого средства может быть использована разрабатываемая автоматизированная система, осуществляющая съем и анализ кожно-гальванической реакции, учет уровня которой используется для оценки уровня работоспособности и утомляемости оператора.

Сигнал кожно-гальванической реакции состоит из двух составляющих: тонической и фазической. Тоническая — низкочастотная составляющая характеризует психофизиологическое состояние человека-оператора. Соответственно, чем меньше сопротивление кожи, тем выше активность нервной системы, уменьшение сопротивления кожи свидетельствует об утомлении человека-оператора. Фазическая — высокочастотная составляющая характеризует колебания сигнала под действием эмоционально значимых факторов. Соответственно, большое число колебаний сигнала в единицу времени может свидетельствовать о негативном воздействии на оператора текущих психоэмоциональных факторов. Использование совокупности тонической и фазической составляющих позволяет сделать вывод о текущем функциональном состоянии оператора.

В качестве аппаратных и программных компонентов автоматизированной системы использованы технологии компании National Instruments. Аппаратная часть построена с использованием устройства сбора данных USB 6008, а программная часть представляет собой виртуальный прибор LabVIEW. На лицевой панели виртуального прибора можно выделить область ввода данных об операторе, область ввода параметров, контролирующих процесс обработки и анализ, группу индикаторов, характеризующих уровень возбуждения, активности, работоспособности и утомления, окно осциллограммы, кнопки запуска и остановки процесса исследования.

При реализации программной части автоматизированной системы выделены основные этапы ее функционирования [5].

1. Ввод исходных данных об операторе и задание параметров контроля и анализа.

2. Непрерывное измерение электрокожного сопротивления и первичная обработка регистрируемых значений (фильтрация и нормирование). При использовании датчиков съема кожно-гальванической

реакции, встроенных, например, в браслет, можно осуществлять непрерывное измерение данного сигнала в течение рабочего дня.

3. Выделение тонической составляющей кожно-гальванической реакции. Осуществляется путем усреднения значений электрокожного сопротивления в окне анализа.

4. Выделение фазической составляющей кожно-гальванической реакции. Осуществляется определение и подсчет числа скачков электрокожного сопротивления по величине разности текущего значения сопротивления и текущего значения уровня тонической составляющей.

5. Анализ текущего уровня активности и работоспособности оператора. Осуществляется анализ совокупности тонической и фазической составляющих кожно-гальванической реакции. В частности, высокий уровень тонической составляющей свидетельствует об утомлении оператора, низкий уровень тонической составляющей в совокупности с большим числом колебаний фазической — о сильном психоэмоциональном возбуждении, перенапряжении. В таких случаях необходима сигнализация возможной опасности и предоставление отдыха оператору.

6. Коррекция параметров отдыха. Осуществляется коррекция параметров регламентируемых перерывов (длительность и периодичность), если длительности интервалов работы, в течение которых показатели функционального состояния оператора больше критического, уменьшаются.

Выполнение элементов этапов носит циклический характер. Программа строилась в соответствие с модульным принципом, который обеспечивает возможность дальнейшего совершенствования, расширения функциональности.

Заключение

В работе рассмотрена задача имитационного моделирования деятельности и производительности работника производства с учетом таких процессов, как утомление и восстановление работоспособности. На основе разработанного моделирующего алгоритма была составлена имитационная модель в пакете GPSS World, результаты экспериментов с которой показали, что производительность работника за рабочий день является функцией от числа регламентированных перерывов, имеющей максимум. Причем оптимальное значение числа регламентированных перерывов является функцией от значений начального уровня работоспособности, интенсивностей утомления и восстановления. Сформулирован критерий максимальной производительности: для каждого работника в зависимости от его биологических свойств и текущего функционального состояния на момент начала работы может быть выбрано определенное число регламентированных перерывов, при котором будет достигнута максимальная производительность за рабочий день. Для случайных и неперіодических

психоэмоциональных воздействий организацию работы и отдыха можно осуществить при сравнении текущего функционального состояния с пороговым значением, величина которого может быть определена по критерию максимальной производительности. Такое сравнение может быть осуществлено в автоматизированной системе для съема и анализа кожно-гальванической реакции, которая определяет уровень активности и работоспособности оператора.

Использование результатов моделирования и автоматизированной системы позволит оптимально организовать производственные работы по критерию максимальной производительности, а также будет способствовать сохранению физического здоровья и поддержанию оптимального психофизиологического состояния работников.

*Варнавский Александр Николаевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник/доцент
Рязанский государственный радиотехнический университет.
Контактный телефон (4912) 46-03-43.
E-mail: varnavsky_alex@rambler.ru*

Работа проводилась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Список литературы

1. Дружинин Г.В. Учет свойств человека в модулях технологий. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика». 2000.
2. Рыбников О.Н. Психофизиология профессиональной деятельности. М.: Изд. центр «Академия», 2010.
3. Томашевский В., Жданова Е. Имитационное моделирование в среде GPSS. М.: Бестселлер. 2003.
4. Варнавский А.Н., Крахмаль Ю.С., Каплан М.Б. Автоматизированная исследовательская система для съема и анализа кожно-гальванической реакции // Спецтехника и связь. 2012. № 5-6.
5. Варнавский А.Н., Крахмаль Ю.С., Каплан М.Б. Автоматизированная исследовательская система для съема и анализа кожно-гальванической реакции // Спецтехника и связь. 2012. №5-6.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

А.Л. Венгер (Международный университет «Дубна»)

Предлагается подход к моделированию эмоциональных процессов с использованием математической теории решений. Эмоция рассматривается как оценка ситуации, побуждающая к определенному типу поведения по отношению к ней. Основная задача предложенной модели – формализация понятий, описывающих индивидуальные особенности эмоционального реагирования. Предполагается, что они определяют жизненную стратегию человека и, в частности, его поведение в ситуациях выбора, связанных с высоким риском.

Ключевые слова: эмоциональные явления, теория решений, жизненная стратегия, жизненный мир, тревожность, импульсивность.

Эмоции: оценка объекта и принятие решения

Современные промышленные и транспортные предприятия, эксплуатирующие различные технические человеко-машинные системы, предъявляют особые требования к процессу подготовки оперативного персонала, поскольку цена ошибки оператора может быть катастрофически высока. Известно, что до 70% аварий и происшествий в промышленности и на транспорте связано со спецификой проявления человеческого фактора. Поэтому при профотборе и подготовке операторов для промышленных и транспортных предприятий должны учитываться не только когнитивные процессы (внимание, мышление), но и особенности эмоциональной регуляции деятельности. Первым шагом в этом направлении является моделирование эмоциональных процессов в ситуации выбора, связанного с высоким риском.

Предлагаемая модель направлена на придание определенности и однозначности понятиям, описываемым как общие закономерности, так и индивидуальные особенности эмоционального реагирования. Эту задачу четко сформулировал К. Левин: «Закон записывается в виде уравнения, связывающего несколько переменных друг с другом. Индивидуальные различия могут быть поняты как различные зна-

чения, принимаемые этими переменными в том или ином конкретном случае» [1].

Мы исходим из когнитивной теории эмоций. Эмоция рассматривается как интуитивная оценка объекта или ситуации, побуждающая к тому или иному типу поведения: избеганию объекта, стремлению к нему и т. п. [2] и определяющая направление познавательных процессов [3]. Р. Лазарус выделяет первичную и вторичную оценку. Первичная — это оценка ситуации, вторичная — оценка субъектом своего собственного отношения к ней [4, 5]. Мы полагаем, что эмоциональная оценка объекта основывается на всей имеющейся информации, но выделяет только один ее аспект: насколько уместен по отношению к данному объекту тот или иной вид активности (пример: приятно ли есть лягушку). Такая редукция содержания позволяет быстро проанализировать большое количество разнородной информации. Поэтому «пропускная способность» у эмоциональной переработки информации гораздо больше, чем у интеллектуальной.

Рассмотрим пример. Некто М решает, совершить ли поездку на автомобиле по горной дороге. Это должно быть очень увлекательно, но говорят, что на этой дороге много аварий. В не очень уважаемой газете этот слух опровергли. Сомнения связаны и с тем, что поездка от-