

HUMAN FACTOR OF NAVIGATION IN THE ASPECT OF CYBERNETIC APPROACH

S. G. Fadyushin

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

The article presents the results of a study on the topic of the human factor in navigation, which is topical for navigation. The relevance of the topic lies in the fact that the human factor as shown by accident statistics in the fleet has a predominant effect on the safety of navigation. However, despite the recognition by the world marine community of the human factor as one of the main and positive dynamics of the growth of research on this topic, the human factor problem remains unresolved. According to the established tradition, the main approach to studying the phenomenon of the human factor is the psychological approach in the interpretation of the science of navigation and the factor itself is considered psychological. In this article, based on the activity approach in psychology, a cybernetic approach to the study of the human factor in navigation is proposed and justified. The object of the study is a complex dynamic control system, the main elements of which are the boatmaster, ship and object of maneuver. The subject of the study is the human factor of navigation in Poisson's notation, as the main determinant of the probabilistic state of this system. The aim of the study is to develop a probabilistic model for the normalization of the human factor of navigation from the standpoint of the cybernetic approach. The task of the study is to justify the methodology of probabilistic estimation of the human factor of navigation. The research hypothesis is based on the basic principle of the activity approach in psychology, which consists in the unity of consciousness and human activity. If consciousness is still a poorly researched area in comparison with activity and practically does not lend itself to formalization, then by examining activity, through it one can come nearer to understanding the laws of natural human behavior and the human factor. The obtained results are recommended to specialists in the field of automation of ship movement control, creation of intelligent control systems and as scientific knowledge to navigators of merchant marine and fishing fleets.

Keywords: navigation, navigator, human factor in navigation, activity approach in psychology, cybernetics, safety of navigation, ship control, entropy, proportional navigation, Poisson's law.

For citation:

Fadyushin, Sergey G. "Human factor of navigation in the aspect of cybernetic approach." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 922–935. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-922-935.

УДК 656.61.052

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР СУДОВОЖДЕНИЯ В АСПЕКТЕ КИБЕРНЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

С. Г. Фадюшин

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

В статье излагаются результаты исследования по актуальной для мореплавания теме человеческого фактора в судовождении. Актуальность темы заключается в том, что человеческий фактор, как показывает статистика аварийности на флоте, оказывает преобладающее влияние на безопасность мореплавания. Но несмотря на признание мировым морским сообществом человеческого фактора как одного из основных и положительную динамику роста исследований по этой теме, проблема человеческого фактора пока остается нерешенной. По сложившейся традиции основным подходом к изучению феномена человеческого фактора является психологический подход в интерпретации наук о судовождении, и сам фактор считается психологическим. В данной статье на основе деятельностного подхода в психологии предлагается и обосновывается кибернетический подход к изучению человеческого фактора в судовождении. Объектом исследования является сложная динамическая система управления, основными элементами которой являются судоводитель, судно и объект маневра, а предметом исследования — человеческий фактор судовождения в нотации Пуассона как основная детерминанта вероятностного состо-

яния системы управления. Цель исследования заключается в разработке вероятностной модели нормирования человеческого фактора судовождения с позиций кибернетического подхода. Задачей исследования служит обоснование методики вероятностной оценки человеческого фактора судовождения. Гипотеза исследования основана на принципе деятельностного подхода в психологии, который заключается в единстве сознания и деятельности человека. Если сознание пока представляет собой малоизученную область по сравнению с деятельностью и практически не поддается формализации, то посредством исследования деятельности можно приблизиться к пониманию законов естественного поведения человека и человеческого фактору. В результате проведенного исследования сформулировано понятие человеческого фактора в аспекте кибернетического подхода и предложен оценочный критерий вероятностного состояния системы управления. Полученные результаты рекомендуются для специалистов в области автоматизации управления движением судна, создания интеллектуальных систем управления и в качестве научных знаний судоводителям морских судов торгового и рыбопромыслового флота.

Ключевые слова: судовождение, судоводитель, человеческий фактор в судовождении, безопасность судовождения, управление судном, деятельностный подход в психологии, кибернетика, энтропия, пропорциональная навигация, закон Пуассона.

Для цитирования:

Фадюшин С. Г. Человеческий фактор судовождения в аспекте кибернетического подхода / С. Г. Фадюшин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 922–935. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-922-935.

Введение (Introduction)

В современной науке и практике управления подвижными объектами широко используется термин «человеческий фактор», который часто называют главной причиной аварийности на разных видах транспорта. По среднестатистическим данным, на долю этого фактора приходится в среднем 70–80 % аварий [1]–[4]. Аналогичная статистика существует и на водном транспорте, где эта цифра, по сведениям некоторых источников, достигает 90 % [5], [6].

Термин «человеческий фактор» обычно трактуется в психологическом аспекте. В психологии под ним подразумеваются «интегральные характеристики связи человека и технического устройства, проявляемые в конкретных условиях их взаимодействия в рамках так называемой системы человек-машина» [7, с. 546]. Совершенствование одного из звеньев этой системы — «машины» (судна) и недостаточное внимание к другому звену — «человеку» (судоводителю) привело к ситуации конца 80-х гг. XX в. — резкому росту аварийности, причины которого пока до конца не изучены. Парадокс заключался в том, что на фоне внедрения на морских судах высокотехнологичных систем управления, приборов и средств автоматизации аварийность не снизилась, а, наоборот, повысилась. Следует также отметить, что аналогичная ситуация наблюдалась и ранее при внедрении радиолокационных систем (РЛС). Таким образом, ряд серьезных морских аварий и катастроф, которые произошли в конце прошлого столетия и были явно вызваны человеческими ошибками и недостатками управления, заставил международное морское сообщество переосмыслить систему безопасности мореплавания и по-новому взглянуть на проблему человеческого фактора.

В 1997 г. Международной морской организацией (ИМО) была принята Резолюция А.850(20). Концепция человеческого элемента, принципы и цели организации (ИМО). В пп. (а) приложения к этому документу дана следующая формулировка человеческого фактора (элемента): «человеческий элемент — комплексный, многогранный вопрос, затрагивающий безопасность на море и защиту морской окружающей среды. Он затрагивает весь спектр человеческой деятельности, выполняемой судовыми экипажами; береговыми службами управления; органами, издающими нормативные документы; классификационными обществами; судостроительными заводами; законодательными органами и другими соответствующими сторонами, и они нуждаются в сотрудничестве для того, чтобы эффективно решать вопросы человеческого элемента».

Резолюция ИМО явилась мощным стимулом к исследованию человеческого фактора во всех областях морехозяйственной деятельности. Обычно человеческий фактор рассматривается в психологическом аспекте как фактор, определяющий способности судоводителя по приему и обра-

ботке навигационной информации. Изучаются возможности судоводителя на основе поступившей информации принимать адекватные сложившимся условиям плавания решения, направленные на обеспечение безопасности, коммерческой эксплуатации судна и охраны окружающей среды. Исследуются способности судоводителя действовать в экстремальных навигационных ситуациях и сложных условиях плавания, таких как, например, описанные в работе [8]. При этом прослеживается формирование стереотипа человеческого фактора как психологической составляющей. Например, в работе [9] определяется роль человеческого фактора как психологической составляющей в обеспечении безопасности и профессиональной надежности в экстремальных, сложных условиях чрезвычайной ситуации. В работе [10] представлен обзор двадцати исследований человеческого фактора в следующих областях: усталость, стресс, здоровье, осведомленность о ситуации, совместная работа, принятие решений, связь, автоматизация и культура безопасности.

Такой (психологический) подход вполне оправдан и необходим при исследовании человеческого фактора в аспекте управления судном для обеспечения безопасности экипажа, пассажиров, груза и охраны окружающей среды. Однако при этом часто не принимается во внимание тот факт, что «система управления подвижным объектом (кораблем, судном, самолетом) является человеко-машинной и состоит из регулятора, в состав которого входит и оператор (вахтенный судоводитель, пилот), и объект регулирования, которым является подвижной объект как инженерное сооружение» [11, с. 1]. Возможно, именно в том, что при внедрении на морских судах средств автоматизации судоводитель как регулятор человеко-машинной системы утратил свои привычные функции и не успел адаптироваться к новой системе управления, заключается основная причина аварийности конца 80-х гг. XX в.

В настоящее время данный факт учитывается при внедрении на морских судах электронных средств для скоординированного сбора, интеграции, передачи, воспроизведения и анализа информации о ситуации на море, на борту судов и на берегу. В рамках проекта e-Navigation ИМО продиктована необходимость учета человеческого элемента (фактора) и в этом направлении проводятся научные исследования [12]. Тем не менее, учитывая стремительное развитие новых информационных технологий и их активное внедрение на морских судах, не исключено повторение негативной ситуации конца 80-х гг. XX в. Высокотехнологичные информационные системы морских судов привели к информационной избыточности вахтенного помощника капитана, которая достигла таких размеров, что является одной из проблем современного судоходства, как отмечается в работе [13]. Кроме того, нормативная рабочая нагрузка на экипаж, в соответствии с МКУБ, ПДМНВ, СОЛАС, МАРПОЛ и требованиями Кодекса ОСПС, усиливает стрессовое давление на судоводителя и негативным образом может сказаться на человеческом факторе судождения, на что указывается в работе [14].

Включение судоводителя в звено управления судном как регулятора или элемента технического регулятора вносит ряд существенных проблем, так как при этом необходимо одновременно учитывать и психофизиологическое состояние судоводителя, и его личностные характеристики, и характеристики управляемости судна как объекта управления. Но если характеристики управляемости в основном формализованы и учитываются техническим регулятором, то все решения по управлению движением судна, которые принимает судоводитель, носят субъективный характер и, следовательно, трудно поддаются формализации. При этом правила, которыми должен руководствоваться судоводитель при принятии решений, должны опираться на естественные законы поведения человека в условиях морской среды. Однако проблема заключается в том, что пока нет достаточных знаний об этих законах и причинно-следственных связях взаимодействия человека и машины. Одним из путей решения этой проблемы может быть нормирование (количественная оценка) человеческого фактора [11], [15], [16]. Например, в работе [11, с. 2] отмечается следующее: «... большой интерес может представить попытка нормирования человеческого фактора, т. е. количественная оценка степени нашей уверенности в том, что его влияние на безопасность судна будет сведено к минимуму». Для решения этой задачи нужно последовательно ответить на следующие вопросы:

- можно ли количественно учитывать отрицательное влияние человеческого фактора;
- можно ли прогнозировать степень влияния человеческого фактора;
- можно ли осуществлять нормирование человеческого фактора.

В этом научном направлении уже проводятся исследования. В качестве примера можно привести работу [15], в которой дано обоснование метода количественной оценки влияния человеческого фактора на навигационную безопасность плавания судна, который положен в основу превентивного регулирования человеческого фактора в процессе судовождения. По сути, предлагается новая методология (модель), которая «...позволяет отказаться от преобладающего в настоящее время в системах оценки качества систем управления безопасностью бинарного подхода и перейти к количественной оценке, используя бальную систему и различные уровни зрелости этих систем» [11, с. 2].

Несмотря на прогресс в решении проблемы человеческого фактора в судовождении, тем не менее следует отметить, что эта проблема пока еще далека от своего окончательного решения. Недаром в руководящих документах и конвенциях ИМО говорится о том, что человеческий элемент представляет собой сложную многомерную проблему, которая охватывает весь спектр человеческой деятельности на море. Тот же самый контекст выделен в работе [11] при изложении необходимости нормирования человеческого фактора, которое также является сложнейшей задачей управления подвижным объектом. Особенно это актуально для такого сложного технического объекта, каким является морское судно.

Выполненное в статье исследование человеческого фактора судовождения проведено в аспекте кибернетического подхода, основанного на деятельностном подходе в психологии. Возможно, именно кибернетика как наука об искусстве управления поможет найти ответ на вопрос о том, что такое человеческий фактор и какова его роль при управлении движением морского судна.

Цель исследования заключается в разработке вероятностной модели нормирования человеческого фактора судовождения с позиций кибернетического подхода.

Задачей исследования является обоснование методики вероятностной оценки человеческого фактора судовождения. В основе гипотезы исследования лежит принцип деятельностного подхода в психологии, который заключается в единстве сознания и деятельности человека. Сознание, формирующее человеческий фактор, пока представляет собой малоизученную область по сравнению с деятельностью и практически не поддается формализации. Деятельность человека, напротив, доступна для исследования и формализации. Отсюда следует, что посредством изучения деятельности можно приблизиться к пониманию законов естественного поведения человека и, соответственно, понять суть и роль человеческого фактора, в том числе и в судовождении.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Управление движением судна с точки зрения судоводителя можно интерпретировать как целенаправленную деятельность, направленную на достижение определенной цели (переход из точки отхода в точку прихода, расхождение с другим судном, маневрирование относительно подвижного объекта, наведение судна на косяк рыб и др.) с учетом условий среды. Для исследования человеческого фактора, прежде всего, проведем макроструктурный анализ этой деятельности в аспекте деятельностного подхода в психологии.

«Деятельностный подход в психологии — это совокупность теоретико-методологических и конкретно-эмпирических исследований, в которых психика и сознание, их развитие и формирование изучаются в различных формах предметной деятельности субъекта, а у некоторых представителей деятельностного подхода рассматриваются как особые формы (виды) этой деятельности, производные от внешне-практических ее форм» [17]. В рамках этого подхода макроструктура человеческой деятельности по А. Н. Леонтьеву [18] состоит из трех «единиц»: деятельность – действие – операция. Деятельность определяется мотивом, действие — целью, операция — конкретными условиями ее протекания: «...в общем потоке деятельности, который образует человеческую жизнь в ее высших, опосредствованных психическим отражением проявлениях, анализ выделяет,

во-первых, отдельные (особенные) деятельности — по критерию побуждающих их мотивов. Далее выделяются действия — процессы, подчиняющиеся сознательным целям. Наконец, операции, которые непосредственно зависят от условий достижения конкретной цели» [18, с. 157].

Структурные «единицы» в контексте рассматриваемой деятельности означают следующее: деятельность — управление движением судна (судовождение), действие — деятельностный акт, состоящий из спектра задач, решаемых судоводителем на ходовой вахте (расхождение с судном, сближение с косяком рыб и др.), операция — конкретное выполняемое действие в зависимости от условий плавания (изменение курса или скорости судна). Соответственно мотивом будет профессиональный долг судоводителя согласно Уставу и другим руководящим документам. Действия должны соответствовать правилам плавания и ведения промысла, операции зависят от знаний и практического опыта, полученного в конкретных условиях плавания. Теоретико-типологический анализ подборки литературы по теме человеческого фактора в судовождении показывает, что именно такой деятельностный подход в психологии, как правило, лежит в основе исследований по данной теме.

В работе А. Н. Леонтьева [18, с. 157] подчеркивается, что «... анализ выделяет, во-первых, отдельные (особенные) деятельности — по критерию побуждающих их мотивов». Выделение таких отдельных (особенных) деятельностей в теории деятельностного подхода тождественно сопоставимо с термином «опредмечивание» деятельности. Применительно к теме данного исследования рассмотрим «опредмечивание» на следующем примере. Судну, ведущему лов в районе промысла, необходимо сблизиться с подвижным косяком рыб. Сближение осуществляется по траектории, координаты и параметры которой предварительно рассчитаны по известным в промысловом судовождении методам, с которыми можно ознакомиться в работах [19]–[21]. К их числу относятся:

1. Методы с фиксированным направлением вектора скорости судна относительно линии пеленга с судна на объект маневра следующие: метод погони, метод постоянного угла упреждения.
2. Методы с изменяющимся направлением вектора скорости судна относительно линии пеленга с судна на объект маневра: метод параллельного сближения и метод пропорционального сближения.

Обобщением этих методов является метод пропорциональной навигации, изложенный в работе [22]. Закон пропорциональной навигации связывает угловую скорость поворота линии пеленга с угловой скоростью поворота вектора скорости судна через коэффициент пропорциональности, который называется *навигационной постоянной*. При реализации этого метода необходимо постоянно измерять угловую скорость поворота линии пеленга на объект маневра и сравнивать ее с угловой скоростью поворота вектора скорости судна.

Предположим, что при сближении судна с косяком рыб угол дрейфа равен нулю, т. е. вектор скорости судна направлен вдоль диаметральной плоскости. Тогда уравнение метода пропорциональной навигации будет иметь следующий вид:

$$\dot{K}_c = b\dot{\Pi}, \quad (1)$$

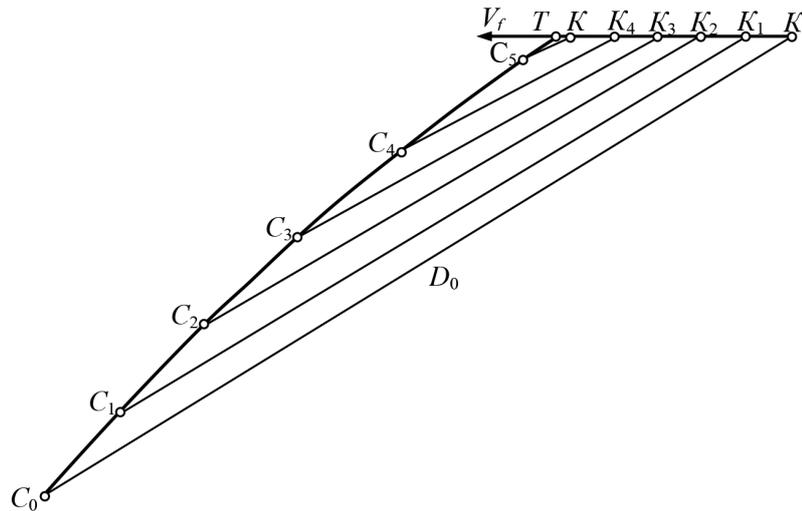
где \dot{K}_c — скорость изменения курса судна; $\dot{\Pi}$ — скорость изменения пеленга на объект маневра; b — коэффициент пропорциональности (навигационная постоянная).

При сближении ошибка наведения представляет собой разность между вычисленным значением угловой скорости линии пеленга на объект маневра и текущей скоростью поворота вектора скорости судна:

$$\Delta = b\dot{\Pi} - \dot{K}_c. \quad (2)$$

В аспекте деятельностного подхода в этом примере «опредмеченная» деятельность — пропорциональная навигация, мотив — закон пропорциональной навигации (1), действие — измерение угловой скорости линии пеленга на объект маневра и сравнение ее с угловой скоростью поворота вектора скорости судна, цель — нивелирование ошибки наведения (2), операция — следование заданными курсом и скоростью и изменение угла перекладки руля при появлении ошибки наведения.

Судоводитель как регулятор управления не в состоянии реализовать закон (1). Для этого ему бы понадобилось в каждый момент времени измерять угловую скорость линии пеленга на объект маневра и сравнивать ее с угловой скоростью поворота вектора скорости судна, что практически для человека неосуществимо. Поэтому при наведении судна на подвижный объект (косяк) при заданном векторе его движения V_f по дистанции D и пеленгу рассчитываются координаты промежуточных точек траектории движения относительно точек местоположения объекта маневра K_0, K_1, \dots, K_n . При таком способе сближение осуществляется по промежуточным точкам C_0, C_1, \dots, C_m на прямых курсах до точки встречи (показано на рисунке).



Кинематическая траектория судна при сближении с объектом маневра методом пропорциональной навигации

При сближении по промежуточным точкам «опредмеченная» деятельность, мотив и цель остаются прежними, действие представляет собой расчет промежуточных точек и построение траектории движения, операция — принятие решения в каждой промежуточной точке об изменении курса или перерасчете траектории сближения. Таким образом, в процессе «опредмечивания» методология исследования человеческого фактора из сферы психологии управления перешла в сферу кибернетики. Поэтому логично такой подход к теме исследования назвать *кибернетическим*. При этом основной принцип деятельностного подхода остался неизменным, так как судоводитель по-прежнему является регулятором системы управления. Следовательно, в макроструктуре «опредмеченной» деятельности человеческий фактор будет содержаться в одной из ее «единиц», а именно в операции.

Операция — это принятие решения в промежуточной точке траектории. Поэтому промежуточные точки имеют двойственное значение: с одной стороны, это детерминированные точки кинематической траектории движения, с другой — точки, в которых судоводитель принимает решения по управлению движением судна. Т. е. это точки, частота которых зависит от множества случайных причин, включая человеческий фактор. При этом закономерно возникает вопрос, как из множества причин, оказывающих влияние на принятие решений по управлению движением судна, выделить именно субъективные. Ответ на этот вопрос заключается в стохастическом анализе промежуточных точек и прежде всего в выборе случайной величины X и закона ее распределения.

Случайное распределение точек в поле траектории движения, как следует из характеристики исследуемого процесса, должно удовлетворять следующим условиям:

1. Точки распределяются статистически равномерно со средней плотностью λ (математическое ожидание числа точек, приходящихся на единицу длины).
2. Точки распределяются независимо друг от друга.

3. Вероятность попадания на малый участок двух или более точек пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одной точки, т. е. точки появляются поодиночке.

Обозначим траекторию движения как отрезок AB длины l и рассмотрим дискретную случайную величину X — число точек, попадающих на этот отрезок. Возможными значениями случайной величины будут:

$$0, 1, 2, \dots, m, \dots \quad (3)$$

Так как точки попадают на отрезок независимо друг от друга, теоретически не исключено, что их окажется сколь угодно много, т. е. ряд (3) продолжается неограниченно. Тогда вероятность попадания отдельной точки на отрезок AB будет низка, и вероятности точек будут равны. При заданных условиях низкой и равной вероятности событий появление каких-либо примечательных событий, таких, например, как выход судна в расчетную точку, можно с определенной вероятностью соотнести с влиянием человеческого фактора: судоводитель в условиях неопределенности среды стремится привести судно в заданную точку. В теории вероятностей заданным условиям соответствует закон распределения случайной величины, называемый *законом Пуассона*.

Примечательно, что этот закон получен и использовался С. Д. Пуассоном для исследования вероятности приговоров в уголовных и гражданских делах. Так, в книге «Исследование о вероятности приговоров в уголовных и гражданских делах» ученый дает следующее обоснование этого закона: «Когда возможно очень большое число событий, априорно имеющих равные и очень низкие вероятности, появление одного из тех, которые представляют что-либо примечательное, следует весьма вероятно приписать особой причине C , аналогичной, к примеру, человеческой воле, а не случаю» [23, с. 11]. В этом высказывании выражение «человеческая воля» можно истолковать и как «человеческий фактор». Отсюда следует, что в нотации Пуассона человеческий фактор является особой причиной появления случайных примечательных событий, имеющих равную и низкую вероятность субъективной природы. Таким образом, в качестве случайной величины X можно принять количество промежуточных точек (точек принятия решений) на траектории движения, распределенных по закону Пуассона. Строгое математическое доказательство того, что распределение X на прямой AB подчиняется данному закону, приведено в источнике [24]. Там же приведены основные формулы, которые будут использоваться в дальнейших расчетах при формировании методики вероятностного нормирования человеческого фактора.

По закону Пуассона, вероятность того, что величина X примет определенное значение m , выражается формулой

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a} \quad (m = 0, 1, \dots),$$

где a — некоторая положительная величина, называемая *параметром закона Пуассона*. Величина a по смыслу представляет собой среднее число точек, приходящихся на отрезок l .

Вероятность того, что величина X примет положительное значение, т. е. вероятность того, что на отрезок l попадет хотя бы одна точка, определяется в виде

$$R_1 = 1 - e^{-a}. \quad (4)$$

Вероятность того, что величина X примет значение не больше заданного k , можно определить по формуле

$$R_k = P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1} = \sum_{m=0}^{k-1} P_m. \quad (5)$$

Вероятность того, что величина X примет значение не меньше заданного k , можно определить из вероятности противоположного события:

$$R_k = 1 - (P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1}) = 1 - \sum_{m=0}^{k-1} P_m. \quad (6)$$

С учетом того, что промежуточные точки имеют значение точек принятия решений и при условии их случайного распределения на траектории движения по закону Пуассона сформулируем и опишем алгоритм решения следующей задачи управления движением судна: дана сложная динамическая система: «судоводитель – судно – объект маневра», основными элементами которой являются: судоводитель – субъект маневрирования, судно – объект маневрирования, объект маневра – подвижный или неподвижный объект, относительно которого судно совершает маневрирование. Судно, управляемое судоводителем, должно сблизиться с объектом маневра на заданное расстояние или вплотную. Траектория движения и ее параметры судоводителю известны.

Требуется:

1. Рассчитать количество промежуточных точек траектории для случая максимальной неопределенности и наилучшего случая при их планировании (нормировании) по критерию заданной вероятности.
2. Оценить вероятностное состояние системы по количеству планируемых промежуточных точек траектории.
3. Оценить вероятностное состояние системы при сближении судна с объектом маневра в текущих промежуточных точках траектории.

Решение

1. *Расчёт количества промежуточных точек траектории для случая максимальной неопределенности и наилучшего случая при их планировании по критерию заданной вероятности.*

Возможные состояния рассматриваемой системы (X_a) по количеству планируемых промежуточных точек траектории за время сближения (частота принятия решений судоводителем) будут:

x_1 — количество промежуточных точек примет значение не больше заданного k ;

x_2 — количество промежуточных точек примет значение не меньше заданного k .

При этом получим следующие вероятности состояний:

$$x_1: R_{k1} = P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1};$$

$$x_2: R_{k2} = 1 - (P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1}).$$

Количество промежуточных точек на траектории движения достигнет своей максимальной неопределенности или (с учетом двойственного значения этих точек) наступит максимальная неопределенность принятия решений судоводителем при равновероятных состояниях x_1 и x_2 . Т. е. можно записать следующее равенство:

$$P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1} = 1 - (P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1}),$$

решая которое можно получить значение параметра закона Пуассона a . Полученное значение параметра a по определению есть математическое ожидание количества точек при распределении Пуассона или по смыслу — это среднее число точек, приходящихся на длину траектории.

В этом случае вероятность состояний x_1 и x_2 будет равна 0,5. Для получения более надежного результата зададимся «предельной» вероятностью состояния x_2 , которую примем на уровне 0,99. Тогда, решая равенство

$$R_{k2} = 1 - (P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1}) = 0,99,$$

получим значение параметра a и, соответственно, среднее количество точек на траектории при заданной «предельной» вероятности.

2. *Оценка вероятностного состояния системы по количеству планируемых промежуточных точек траектории.*

Для перехода от вероятностей состояний системы к вероятности состояния системы в целом по количеству планируемых промежуточных точек траектории введем в рассмотрение широко используемый в теории информации обобщающий статистический показатель — энтропию. Так как события x_1 и x_2 независимы, то энтропию можно рассчитать по известной формуле К. Шеннона:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad (7)$$

где p_i — вероятности возможных состояний системы.

В случае равновероятных событий энтропия системы достигнет максимального значения и будет равна $H(X) = 1$. Максимальное значение энтропии показывает максимальную неопределенность состояния системы управления и может служить в качестве основного критерия (своеобразного «нуля» оценочной шкалы) оценки вероятностного состояния системы «судоводитель – судно – объект маневра».

3. *Оценка вероятностного состояния системы при сближении судна с объектом маневра в текущих промежуточных точках траектории.*

Возможные состояния системы X_a при сближении судна с объектом маневра в текущих промежуточных точках траектории будут:

x_1 — судно вышло в расчетную промежуточную точку;

x_2 — судно не вышло в расчетную промежуточную точку.

При этом получим следующие вероятности состояний:

$$x_1: P_1 = 1 - e^{-a};$$

$$x_2: P_2 = e^{-a}.$$

Определим максимальную неопределенность состояния системы X_a , которая появляется при равновероятных состояниях системы. Т. е. можно записать следующее равенство:

$$1 - e^{-a} = e^{-a}.$$

После преобразований получим

$$a = \frac{1}{\log_2 e} = 0,6931.$$

При этом значении параметра a энтропия системы достигнет максимального значения $H(X) = 1$.

Величина параметра a по смыслу представляет собой среднее число точек, приходящихся на отрезок l линии пеленга, проходящей через расчетную точку, судно и объект маневра, и рассчитывается по формуле

$$a = \lambda l.$$

Тогда можно рассчитать дистанцию от судна до объекта маневра, при которой неопределенность системы X_a достигнет максимального значения:

$$l = \frac{a}{\lambda},$$

где $\lambda = l_s^{-1}$; l_s — расчетная дистанция до объекта маневра.

Текущее значение параметра закона Пуассона можно рассчитать по формуле

$$a_i = \lambda l_i,$$

где l_i — текущая дистанция до объекта маневра.

Тогда с учетом уравнения плотности λ получим

$$a_i = \frac{l_i}{l_s}.$$

Текущее значение энтропии рассматриваемой системы с вероятностью состояний x_1 и x_2 можно рассчитать по формуле (7). При этом для x_1 вероятность состояния будет $p_1 = 1 - e^{-a_i}$, для x_2 — $p_2 = e^{-a_i}$.

Результаты (Results)

Для проверки валидности теоретических выкладок конкретной практической ситуации решим следующий пример: судно должно сблизиться с подвижным косяком рыб вплотную для его отлова. Предполагается, что сближение будет осуществляться методом пропорциональной навигации. Траектория сближения рассчитана и известны параметры сближения (см. рисунок с. 925). По расчетам в одной из контрольных промежуточных точек дистанция сближения должна быть равна 5 кбт. При выходе судна на линию расчетного значения пеленга фактическое значение дистанции оказалось равным 4 кбт.

Требуется:

1. Рассчитать количество промежуточных точек траектории для случая максимальной неопределенности и наилучшего случая при их планировании по критерию заданной вероятности.
2. Оценить вероятностное состояние системы по количеству планируемых промежуточных точек траектории.
3. Оценить вероятностное состояние системы при сближении судна с объектом маневра в контрольной промежуточной точке траектории.

Решение

1. Рассчитаем количество промежуточных точек траектории для случая максимальной неопределенности и наилучшего случая при их планировании по критерию заданной вероятности $R_x = 0,99$.

1.1. Рассчитаем количество промежуточных точек траектории (частоту принятия решений судоводителем) для случая максимальной неопределенности при заданном исходном количестве точек $m = 5$ (см. рисунок с. 925).

Составим равенство:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 - (P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4),$$

из которого численными способами находим, что значение параметра закона Пуассона $a = 4,67$. Учитывая, что параметр a — среднее количество точек на траектории, сделаем вывод о том, что в наихудшем случае количество планируемых промежуточных точек траектории (частота принятия решений судоводителем) должно быть примерно равным заданному исходному количеству точек. Т. е. если при сближении исходное количество точек $m = 5$ и траектория разбита на пять точек (планируется, что будет принято пять решений), то это будет наихудший вариант решения поставленной задачи. При этом исходное количество точек m задается исходя из практических соображений в соответствии с условиями среды, правил плавания и ведения промысла.

1.2. Рассчитаем количество промежуточных точек траектории сближения для наилучшего случая при заданной вероятности $R_x = 0,99$. Составим равенство

$$1 - (P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4) = 0,99,$$

из которого найдем значение параметра закона Пуассона $a = 11,60$. Т. е. в наилучшем случае при заданном $m = 5$ траекторию движения необходимо разбить на 12 точек. Для успешного решения поставленной перед судоводителем задачи ему необходимо следовать плану, т. е. осуществлять движение по 12 точкам, тогда с вероятностью 0,99 будет обеспечен выход в не менее чем пяти заданных точках. С учетом двойственного значения точек — не менее пяти решений из 12 будут наилучшими по критерию заданной вероятности.

2. Выполним оценку вероятностного состояния системы по количеству планируемых промежуточных точек траектории.

Энтропия системы «судоводитель – судно – объект маневра» в случае максимальной неопределенности будет равна максимальному значению $H(X)_{\max} = 1$ бит.

В наилучшем случае при заданной вероятности $R_x = 0,99$ для расчета энтропии используем формулу (7):

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i = -(0,01 \log 0,01 + 0,99 \log 0,99) = 0,08079 \text{ бит.}$$

3. Выполним оценку вероятностного состояния системы при сближении судна с объектом маневра в контрольной промежуточной точке траектории.

3.1. Рассчитаем дистанцию до объекта маневра, при которой энтропия системы «судоводитель – судно – объект маневра» достигнет максимального значения и будет равна $H(X)_{\max} = 1$ при $\lambda = \frac{1}{5}$ точек / кбт и $a = 0,6931$:

$$l_{\max} = \frac{a}{\lambda} = 0,6931 \cdot 5 = 3,5 \text{ кбт.}$$

2.2. Рассчитаем текущее значение параметра закона Пуассона при $\lambda = \frac{1}{5}$ точек / кбт и текущем значении дистанции до объекта маневра $l_i = 4$ кбт:

$$a_i = \lambda l_i = \frac{1}{5} \cdot 4 = 0,8.$$

2.3. Рассчитаем вероятность состояния x_1 :

$$p_1 = 1 - e^{-a_i} = 1 - e^{-0,8} = 0,5506.$$

2.4. Рассчитаем вероятность состояния x_2 :

$$p_2 = e^{-a_i} = e^{-0,8} = 0,4493.$$

2.5. Рассчитаем текущее значение энтропии системы «судоводитель – судно – объект маневра»:

$$H(X)_i = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i = -(0,5506 \cdot \log 0,5506 + 0,4493 \cdot \log 0,4493) = 0,9925 \text{ бит.}$$

Вывод. По результатам расчета получено: $l_i > l_{\max}$; $H(X)_i < H(X)_{\max}$. Следовательно, текущее состояние системы «судоводитель – судно – объект маневра» можно считать удовлетворительным, и судно может продолжать сближение с объектом маневра по запланированной траектории с учетом коррекции ошибки сближения.

Обсуждение (Discussion)

Таким образом, с учетом теоретических выкладок и результатов решения контрольного примера, можно сделать следующие выводы.

1. В нотации Пуассона человеческий фактор — особая детерминанта появления случайных примечательных событий, имеющих равную и низкую вероятность субъективной природы.

2. В интерпретации деятельностного подхода примечательное событие — результат целенаправленной деятельности судоводителя по управлению движением судна (например, выход судна в заданную промежуточную точку на траектории движения).

3. При оценке вероятностного состояния управляемой системы особая пуассоновская детерминанта может быть выражена количеством энтропии, приходящейся на одно принятое решение.

В аспекте кибернетического подхода человеческий фактор судовождения — это статистический параметр, который измеряет среднее количество энтропии вероятностного состояния системы «судоводитель – судно – объект маневра», приходящееся на одно принятое судоводителем решение. Человеческий фактор находится поверх детерминированного фактора, т. е. принятию решений судоводителем должна предшествовать строгая логическая проработка задачи управления в математическом виде.

Частота принятия решений судоводителем в процессе выполнения задачи управления должна превышать исходную заданную частоту, которая основана на опыте и задается исходя из практических соображений в соответствии с условиями среды, правил плавания и ведения промысла. Например, если при планировании задачи управления траекторию движения разбить на то же самое (одинаковое) количество точек, которое соответствует исходному заданному, то это будет наихуд-

ший вариант решения поставленной задачи. В данном случае энтропия системы управления будет максимальной. Для обеспечения наилучшего варианта развития событий в процессе решения поставленной задачи траекторию движения необходимо разбить на количество промежуточных точек, примерно в 2,5 раза (по данным контрольного примера) превышающее исходное заданное.

Данный вывод в интерпретации кибернетического подхода может претендовать на один из естественных законов поведения человека (судоводителя) при управлении сложной системой. На практике эта закономерность нашла отражение в одном из принципов судовождения, который формулируется как «*считай себя ближе к опасности*». Согласно этому принципу, опытный судоводитель стремится повысить частоту принятия решений при выполнении стоящей перед ним сложной задачи управления. Например, при подходе к узкости с точки зрения логики достаточно одной точной обсервации, чтобы судно вошло в нее. Тем не менее опытный судоводитель, как правило, выполняет несколько обсерваций. Для этого примера, согласно выполненным расчетам, необходимо сделать не менее пяти обсерваций при заданной «предельной» вероятности.

Заключение (Conclusion)

Основные результаты проведенного исследования заключаются в следующем:

- в нотации Пуассона сформулировано понятие человеческого фактора судовождения;
- в вероятностной трактовке показан один из возможных законов естественного поведения человека при управлении движением судна;
- предложен оценочный критерий вероятностного состояния системы управления «судоводитель – судно – объект маневра» в виде максимального значения энтропии системы управления при равенстве вероятностей ее возможных состояний.

Кибернетический подход к решению проблемы человеческого фактора в судовождении позволяет в качестве универсального оценочного параметра состояния системы управления «судоводитель – судно – объект маневра» использовать одно из основных понятий теории информации — энтропию. Нормирование энтропии как оценочного параметра позволяет в количественном виде нормировать человеческий фактор, а также учитывать и прогнозировать его влияние на систему управления.

Несмотря на полученные результаты, тем не менее, следует отметить, что проблема человеческого фактора в судовождении пока еще далека от своего окончательного решения. Продолжение исследований в рамках предлагаемого подхода является целесообразным в направлении решения актуального вопроса планирования задачи управления и ее реализации.

Полученные результаты рекомендуются для использования специалистами в области автоматизации управления движением судна, создания интеллектуальных систем управления и в качестве научных знаний для судоводителей морских судов торгового и рыбопромыслового флота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пазовский В. М. Аварийность на мировом флоте // Безопасность судоходства в Дальневосточном бассейне: сб. докл. науч.-практ. конф. 24–25 октября 2007 г. — Владивосток: Морской гос. ун-т, 2007. — С. 108–113.
2. Информационный бюллетень «INTERTANKO». Tanker incidents. — 2008. — 27 с.
3. Субанов Э. Э. Адаптация метода анализа иерархий для принятия решений при оценке степени опасности столкновения морских судов / Э. Э. Субанов, А. В. Миронов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. — 2012. — № 3 (167). — С. 8–12.
4. Tzannatos E. Human element and accidents in greek shipping / E. Tzannatos // The Journal of Navigation. — 2010. — Vol. 63. — Is. 1. — Pp. 119–127. DOI: 10.1017/S0373463309990312.
5. Количество аварий на водном транспорте в 2015 году увеличилось на 62 %, большая часть приходится на рыбопромысловые суда [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://portnews.ru/top_news/216552/ (дата обращения: 28.08.2018).

6. Human Element. International Maritime Organization [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.imo.org/OurWork/HumanElement/Pages/Default.aspx> (дата обращения: 28.08.2018).
7. Копорулина В. Н. Психологический словарь / В. Н. Копорулина, М. Н. Смирнова, Н. О. Гордеева. — 3-е изд., доп. и перераб. — Ростов н/Д: Феникс, 2004. — 640 с.
8. Akten N. Analysis of shipping casualties in the Bosphorus / N. Akten // The Journal of Navigation. — 2004. — Vol. 57. — Is. 3. — Pp. 345–356. DOI: 10.1017/S0373463304002826.
9. Даниленко А. А. Профессиональная надёжность плавсостава как важнейшее условие безопасности судоходства / А. А. Даниленко, А. А. Даниленко // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 3 (53). — С. 30–35.
10. Hetherington C. Safety in shipping: The human element / C. Hetherington, R. Flin, K. Mearns // Journal of safety research. — 2006. — Vol. 37. — Is. 4. — Pp. 401–411. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.04.007.
11. Сазонов А. Е. Человеческий фактор и безопасность управления подвижными объектами / А. Е. Сазонов // Сб. материалов XVI Общего собрания академии навигации и управления движением. — 2003. — С. 6–8.
12. Patraiko D. e-Navigation and the Human Element / D. Patraiko, P. Wake, A. Weintrit // Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — CRC Press, 2009. — Pp. 55–60. DOI: 10.1201/9780203869345.ch5
13. Маурер А. И. Информационная перегрузка как фактор аварийности / А. И. Маурер, О. А. Истомина // Вестник Морского государственного университета. — 2007. — № 15. — С. 60–69.
14. Loginovsky V. A. “The ISPS code as a component of onboard resources in Bayesian Analysis.” / V. A. Loginovsky, A. P. Gorobtsov, V. E. Kuzmin // Maritime Security and MET: 6th General Assembly of IAMU, Malmö, Sweden 24.-26.10.2005. — Southampton: WIT Press, 2005. — Pp. 215–224.
15. Ермаков С. В. Превентивное регулирование человеческого фактора в морском судождении / С. В. Ермаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5(39). — С. 39–50. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-39-50.
16. Коровин А. Г. Разработка методов влияния человеческого фактора на безопасность судна / А. Г. Коровин // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2009. — № 10. — С. 31–36.
17. Психологический словарь / Под ред. В. П. Зинченко, Б. Г. Мещерякова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Педагогика-Пресс, 1999. — 440 с.
18. Леонтьев А. Н. Избранные психологические произведения: в 2-х т. / А. Н. Леонтьев. — М.: Педагогика, 1983. — Т. II — 320 с.
19. Фадюшин С. Г. Сближение судна с подвижным объектом методом пропорциональной навигации / С. Г. Фадюшин // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 4. — С. 121.
20. Фадюшин С. Г. Методы наведения судна на движущийся косяк рыбы / С. Г. Фадюшин // Вестник Морского государственного университета. — 2012. — № 25. — С. 90–95.
21. Fadyushin S. G. The Linear Assessment Model for Navigational Factors / S. G. Fadyushin // World Applied Sciences Journal. — 2014. — Vol. 29. — Is. 5. — Pp. 689–693. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.29.05.13904.
22. Канн В. Л. Теория пропорциональной навигации / В. Л. Канн, А. С. Кельзон. — Л.: Судостроение, 1965. — 423 с.
23. Пуассон С. Д. Исследования о вероятности приговоров в уголовных и гражданских делах / С. Д. Пуассон; пер. О. Б. Шейнина. — Изд. 2-е испр. — Берлин: N. G. Verl. (Viatcheslav Demidov), 2013. — 328 с.
24. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — 11-е изд., стер. — М.: КНОРУС, 2010. — 664 с.

REFERENCES

1. Pazovskiy, V. M. “Avariynost’ na mirovom flote.” *Bezopasnost’ sudokhodstva v Dal’nevostochnom bassejne: Sbornik dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Vladivostok: Maritime State University Press, 2007. 108–113.
2. *Informatsionnyy byulleten’ «INTERTANKO». Tanker incidents*. 2008.
3. Subanov, E. E., and A. V. Mironov. “Hierarchy analysis adoption in taking decisions while evaluation of danger degree in sea vessels collision.” *University news. North-Caucasian region. Technical sciences series* 3(167) (2012): 8–12.

4. Tzannatos, Ernestos. "Human Element and Accidents in Greek Shipping." *Journal of Navigation* 63.1 (2010): 119–127. DOI: 10.1017/S0373463309990312.
5. Kolichestvo avariya na vodnom transporte v 2015 godu uvelichilos' na 62%, bol'shaya chast' prikhoditsya na rybopromyslovyye suda. Web. 28 Aug. 2018 <http://portnews.ru/top_news/216552/>.
6. Human Element. International Maritime Organization. Web. 28 Aug. 2018 <<http://www.imo.org/OurWork/HumanElement/Pages/Default.aspx>>.
7. Koporulina, V. N., M. N. Smirnova, and N. O. Gordeyeva. *Psikhologicheskii slovar'*. 3d ed. Rostov n/D: Feniks, 2004.
8. Akten, Necmettin. "Analysis of Shipping Casualties in the Bosphorus." *Journal of Navigation* 57.3 (2004): 345–356. DOI: 10.1017/S0373463304002826
9. Danilenko, A. Al., and A. An. Danilenko. "Professional reliability of crew as the most important prerequisite of the safety of the shipping." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(53) (2008): 30–35.
10. Hetherington, Catherine, Rhona Flin, and Kathryn Mearns. "Safety in shipping: The human element." *Journal of safety research* 37.4 (2006): 401–411. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.04.007
11. Sazonov, A. Ye. "Chelovecheskiy faktor i bezopasnost' upravleniya podvizhnymi ob'yektami." *Sbornik materialov XVI Obshchego sobraniya akademii navigatsii i upravleniya dvizheniyem*. 2003. 6–8.
12. Patraiko, D., P. Wake, and Adam Weinrit. "e-Navigation and the Human Element." *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. CRC Press, 2009. 55–60. DOI: 10.1201/9780203869345.ch5
13. Maurer, A. I., and O. A. Istomina. "Informatsionnaya peregruzka kak faktor avariynosti." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 15 (2007): 60–69.
14. Loginovsky, V. A., A. P. Gorobtsov, and V. E. Kuzmin. "The ISPS code as a component of onboard resources in Bayesian Analysis." In: *Nielsen, D. (ed.). Maritime Security and MET: 6th General Assembly of IAMU, Malmö, Sweden 24.-26.10.2005*. Southampton: WIT Press, 2005: 215–224.
15. Ermakov, Sergey Vladimirovich. "Preventive regulation of the human factor in marine navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 39–50. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-39-50.
16. Korovin, A. G. "Razrabotka metodov vliyaniya chelovecheskogo faktora na bezopasnost' sudna." *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 10 (2009): 31–36.
17. Zinchenko, V. P., and B. G. Meshcheryakova, eds. *Psikhologicheskii slovar'*. 2nd ed. M.: Pedagogika-Press, 1999.
18. Leont'yev, A. N. *Izbrannyye psikhologicheskiye proizvedeniya*. Vol. 2. M.: Pedagogika, 1983.
19. Fadyushin, S. G. "Proportional navigation and its use at control of vessel as an approach method to mobile object." *Modern problems of science and education* 4 (2012): 121.
20. Fadyushin, S. G. "Metody navedeniya sudna na dvizhushchiysya kosyak ryby." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 25 (2012): 90–95.
21. Fadyushin, S. G. "The Linear Assessment Model for Navigational Factors." *World Applied Sciences Journal* 29.5 (2014): 689–693. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.29.05.13904.
22. Kann, V. L., and A. S. Kel'zon. *Teoriya Proportsional'noy Navigatsii*. L.: Sudostroyeniye, 1965.
23. Puasson, S. D. *Issledovaniya o veroyatnosti prigovorov v ugovolnykh i grazhdanskikh delakh*. Translated by O. B. Sheynina. 2nd ed. Berlin: N. G. Verl. (Viatcheslav Demidov), 2013.
24. Venttsel', Ye. S. *Teoriya veroyatnostey*. 11th ed. M.: KNORUS, 2010.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Фадюшин Сергей Геннадьевич —
 кандидат технических наук, доцент
 Дальневосточный федеральный университет
 690091, Российская Федерация, г. Владивосток,
 Суханова, 8
 e-mail: fadyushin.sg@dvfu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Fadyushin, Sergey G. —
 PhD, associate professor
 Far Eastern Federal University
 8 Sukhanova Str., Vladivostok, 690091,
 Russian Federation
 e-mail: fadyushin.sg@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию 28 августа 2018 г.
 Received: August 28, 2018.