

УДК 614.8, 621.039.58

## О ПРОГНОЗИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ТЯЖЕСТИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПОРАЖЕНИЙ ПРИ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЯХ

Б. А. Бенецкий

*Для планирования мероприятий по оказанию помощи и охране жизни людей при ликвидации радиационных аварий недостаточен подход, основанный на использовании только средних показателей радиационных поражений. В связи с этим количественный анализ рисков и в особенности управления рисками становятся важным аспектом принятия решений и требует знания распределений количественных мер воздействия поражающих факторов. В статье рассмотрен один из вариантов прогноза таких распределений.*

**Ключевые слова:** радиационные поражения, анализ рисков, мера воздействия.

Согласно существующим представлениям и данным наблюдений при аварийных облучениях и при профессиональном облучении в отсутствие “управления дозозатратами” распределение индивидуальных доз  $D$  хорошо описывается логнормальным распределением [1]:

$$dN/dD = \frac{\exp[-(\ln D - m)^2/2\sigma^2]}{\sqrt{2\pi}\sigma D}. \quad (1)$$

Параметры этого распределения связаны с наиболее вероятной дозой (положение максимума распределения)  $D_{\max}$  и средней дозой  $\bar{D}$ :

$$\ln D_{\max} = m - \sigma^2, \quad (2.1)$$

$$\ln \bar{D} = m + \sigma^2/2. \quad (2.2)$$

Такие распределения дозовых характеристик (мер тяжести поражений) наблюдались при аварии на атомной подводной лодке с ЯЭУ и в Чернобыле как у ликвидаторов,

---

Институт ядерных исследований РАН, 117312 Россия, Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а; e-mail: benetsky@yandex.ru.

так и у свидетелей аварии. По оценке Агентства по ядерной энергии (NEA) [2], имеются лишь фрагментарные данные о дозах, полученных в начальный период аварии на ЧАЭС. Попытки организовать дозиметрическую службу по мнению авторов отчета [2] были “неадекватными” до середины июня 1986 года. В исследовании, проведенном совместно сотрудниками ЧАЭС и ИБФ Минздрава РФ [1], была сделана попытка проверки достоверности данных о полученных в этот период дозах внешнего облучения. Критерием служило сравнение распределений доз, следующих из данных официальной статистики, с логарифмическим нормальным распределением. В результате было установлено, что, несмотря на то, что средние индивидуальные дозы в различных выборках (коллективах ликвидаторов из различных организаций) отличаются более чем в  $10^2$  раз, дисперсия логарифма индивидуальной дозы фактически не зависит от среднего значения дозы и объема выборки. Такое свойство распределений относит логарифмы доз к классу так называемых гомоскедастичных или равноизменчивых случайных величин. Таким образом, распределение меры воздействия поражающего фактора при радиационных авариях обладает характерными особенностями: типом распределения и свойством гомоскедастичности её логарифма. Ранее нами был предложен подход для объяснения связи логнормального закона распределения с аварийными ситуациями [3–9], основанный на учете доминирующего влияния “человеческого фактора” (ЧФ), на формирование последствий экстремального внешнего воздействия на человека. Под “человеческим фактором” подразумевается влияние индивидуальных особенностей людей, которое при их участии в каких-либо видах деятельности (или при реагировании на какие-то процессы) способно изменить результаты или последствия этих видов деятельности (процессов). Влияние ЧФ описывается математической моделью, в которой изменение индивидуальной дозы  $D$ , являющейся мерой воздействия какого-либо компонента сочетанного радиационного поражения [10], за время облучения  $dt$  равно:

$$dD = \alpha D \cdot f(t)dt. \quad (3)$$

В уравнении (3)  $\alpha$  – коэффициент игнорирования радиационного риска (в общем случае – “коэффициент влияния ЧФ”) и  $f(t)$  – временная зависимость мощности дозы амбиентного (внешнего) облучения. Физический смысл коэффициента  $\alpha$  следует из (3): коэффициент игнорирования радиационного риска численно равен относительному увеличению индивидуальной дозы в единицу времени при неизменных условиях внешнего облучения. Рассматриваемая модель облучения предполагает также, что относительная изменчивость дозы при перемещении в пространстве учитывается индивидуальным значением коэффициента  $\alpha$ : данный индивид пренебрегает различием доз, или, наоборот,

избегает пространств с высокими относительными мощностями внешних доз.

Решение уравнения (3) имеет вид

$$D = D_0 \exp(\alpha \times \Delta T_{\text{eff}}), \quad (4)$$

где  $D_0$  – доза, накопленная за время адаптации индивидуума к условиям чрезвычайной ситуации  $t_a$  и  $\Delta T_{\text{eff}}$  – эффективная продолжительность облучения, равная

$$\Delta T_{\text{eff}} = \int_{t_a}^t f(t) dt. \quad (5)$$

В модели доминирующего влияния ЧФ распределение доз  $D$  [5–7, 9] определяется распределением коэффициента  $\alpha$ . Если предположить, что (подобно распределениям антропометрических, физических, физиологических психофизиологических и иных характеристик человека) распределение  $\alpha$  нормальное со средним значением  $\bar{\alpha}$  и стандартным отклонением  $\sigma_\alpha$ , то распределение индивидуальных аварийных доз вследствие (4) примет форму нормального логарифмического распределения (1) с параметрами:

$$m = \ln D_0 + \bar{\alpha} \Delta T_{\text{eff}}, \quad (6)$$

$$\sigma = \sigma_\alpha \Delta T_{\text{eff}} \quad (7)$$

(по общему правилу преобразования распределений). Свойство гомоскедастичности также следует из рассматриваемой модели. Из формулы (1):

$$dN/d(\ln D) = \frac{\exp[-(\ln D - m)^2/2\sigma^2]}{\sqrt{2\pi}\sigma}. \quad (8)$$

Т.е. распределение логарифмов аварийных доз гауссово и в случае определяющего влияния ЧФ должно иметь параметры (6), (7). Если выборкой пострадавших является экипаж корабля, личный состав подразделения или трудовой коллектив, то эффективная продолжительность облучения  $\Delta T_{\text{eff}}$  (как и реальная его продолжительность  $\Delta T$ ) суть величины для различных индивидуумов примерно равные, поскольку они попадают в зону облучения и покидают ее организованно. Или не покидают, как часть населения, подвергшаяся облучению. Тогда параметр  $\sigma$  в (8) величина почти постоянная:  $\sigma = \sigma_\alpha \Delta T_{\text{eff}} \approx \text{const}$ , что и означает свойство гомоскедастичности. Качество описания моделью данных наблюдений иллюстрируется рис. 1.

Определение из данных наблюдений параметров  $m$  и  $\sigma$  в (1), описывающих реальные последствия поражений, дает возможность получить дополнительную информацию о

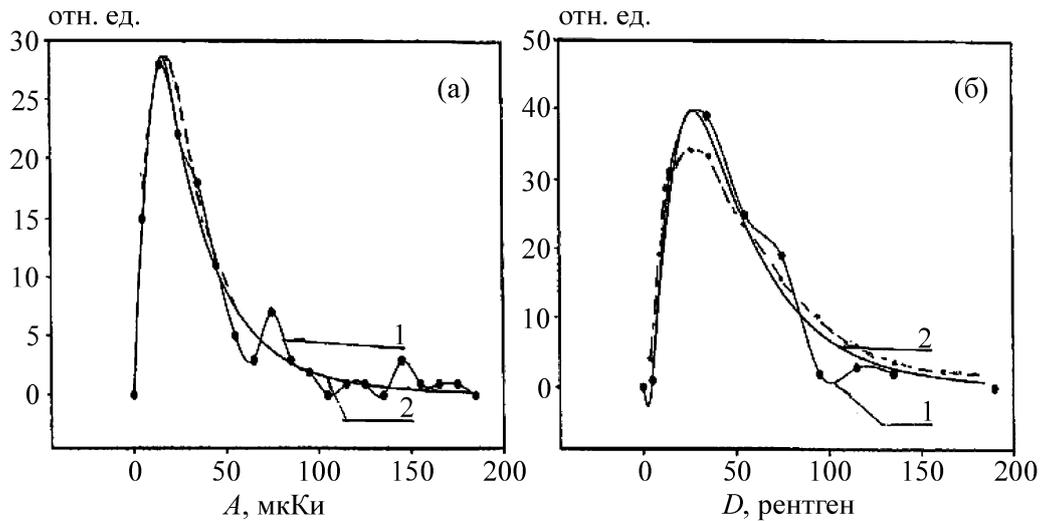


Рис. 1: (а) Кривая 1 – распределение активности радиоiodа в щитовидных железах у 122 членов экипажа подводной лодки после аварии ЯЭУ, данные измерений [10]. Кривая 2 – расчет по формуле (1) при подгонке параметров  $m$  и  $\sigma$ . По оси абсцисс – активность йода – 131, по оси ординат – количество  $N$  облученных на интервал активности. (б) Распределение доз гамма-излучения при той же аварии. Кривая 1 – данные измерений, кривая 2 – расчет по формуле (1) с соответствующей подгонкой параметров. По оси абсцисс – величина дозы, по оси ординат – количество  $N$  облученных на интервал доз. Пунктирные кривые – прогнозируемые (см. по тексту) распределения этих поражений.

коэффициенте игнорирования радиационного риска  $\alpha$  (или коэффициенте влияния ЧФ при облучении). Исключив из формул (6) и (7) эффективное время облучения  $\Delta T_{\text{eff}}$ , получим отношение стандартного отклонения этого коэффициента к его средней величине

$$\sigma_{\alpha}/\bar{\alpha} = \sigma/(m - \ln D_0), \quad (9)$$

или “меру относительной дисперсии” коэффициента игнорирования радиационного риска. В формуле (9)  $D_0$  – средняя доза, накопленная за время адаптации, – параметр модели, зависимость от которого достаточно слабая, логарифмическая. При расчетах  $\sigma_{\alpha}/\bar{\alpha}$  с использованием формулы (9) или оценивался интервал, в пределах которого находится значение  $D_0$ , а его пределы служили мерой ошибки величины меры относительной дисперсии  $\sigma_{\alpha}/\bar{\alpha}$ , или использовались какие-либо дополнительные данные. Например, в статистике гамма-доз в авариях на корабельных ЯЭУ уже имелся нижний предел доз,

который и был принят за  $D_0$ .

Кроме результатов, приведенных на рис. 1, получили аналогичные обоснования распределения и других случайных величин, характеризующие последствия различных экстремальных ситуаций. Они также описываются аналогами уравнения (3) со своими коэффициентами влияния ЧФ [8, 9]. При этом оказалось, что относительные дисперсии всех этих коэффициентов (включая и  $\alpha$ ) в пределах ошибок равны друг другу и являются, по-видимому, разными ипостасями одной безразмерной величины  $\sigma_\zeta/\bar{\zeta}$  – универсальной меры разброса индивидуальных характеристик человека, проявляющихся при чрезвычайных ситуациях

$$\sigma_\alpha/\bar{\alpha} = \sigma_\zeta/\bar{\zeta} = c, \quad (10)$$

оценка которой, согласно имеющимся в настоящее время данным наблюдений [10], составляет:

$$c = 0.40 \pm 0.05. \quad (11)$$

Если это так, то на основании вышеизложенного и значения универсальной величины  $c$  может быть осуществлен прогноз распределений тяжести радиационных поражений при авариях. Это подтверждается “прогнозом” распределений двух типов радиационных поражений для уже реализованной аварии, представленных на рис. 1 пунктиром. Для выполнения такого прогноза необходимо задать в качестве параметра аварии какую-либо общую характеристику облучения для частной выборки (например, среднюю индивидуальную дозу  $\bar{D}$ ) и применить математический аппарат модели влияния ЧФ. Из (9) и (10) следует соотношение, полученное на основании модели:

$$m = \ln D_0 + \sigma/c. \quad (12)$$

Исходя из него и общих свойств логнормального распределения (2), можно составить уравнения:

$$m = \ln D_0 + \sigma/c, \quad (13.1)$$

$$\ln \bar{D} = m + \sigma^2/2, \quad (13.2)$$

$$\ln D_{\max} = m - \sigma^2. \quad (13.3)$$

Решениями системы уравнений (13) являются параметры логнормального распределения  $\sigma$  и  $m$  как функции универсальной характеристики разброса индивидуальных качеств  $c$ , средней  $\bar{D}$  (или наиболее вероятной  $D_{\max}$ ) дозы, полученной при аварийном облучении, и средней дозы адаптации  $D_0$ :

$$\sigma = -1/c + \left( 1/c^2 + 2 \ln \frac{\bar{D}}{D_0} \right)^{1/2}, \quad (14.1)$$

$$\sigma = 1/2c - \left(1/4c^2 - \ln \frac{D_{\max}}{D_0}\right)^{1/2}, \quad (14.2)$$

$$m = -1/c^2 + \ln \bar{D} - \ln \frac{\bar{D}}{D_0} + \left(1/c^4 + \frac{2}{c^2} \ln \frac{\bar{D}}{D_0}\right)^{1/2}. \quad (15)$$

Для упомянутых выше доз справедливо неравенство:

$$D_0 < D_{\max} < \bar{D}. \quad (16)$$

Соотношения (11)–(16) позволяют получить количественный прогноз распределений тяжести поражений в виде распределений (1) и всей содержащейся в них информации. Для этого при заданной средней тяжести поражения (например, средней гамма-дозе  $\bar{D}$ ) необходимо и достаточно провести на основании формул (12)–(16) расчеты параметров логнормального распределения (1) при варьировании отношения  $\frac{\bar{D}}{D_0}$  в достаточно широких пределах. Ограничение на  $\frac{\bar{D}}{D_0}$  снизу установим произвольно, предположив, какую долю средней дозы может составлять доза адаптации. Учитывая (16), предположим не более одной трети. Ограничение  $\frac{\bar{D}}{D_0}$  сверху может быть получено из соотношений  $\frac{D_{\max}}{D_0} \leq \exp(1/4c^2)$  и  $\sigma \leq 1/2c$ , следующих из (14.2), а также из  $\frac{\bar{D}}{D_{\max}} = \exp(3/2\sigma^2)$  – общих свойств логнормального распределения (2). Тогда пределы варьирования определяются соотношением

$$3 \leq \frac{\bar{D}}{D_0} \leq 49.71. \quad (17)$$

Пример расчетов – прогноз для крупной гипотетической аварии со средней индивидуальной дозой  $\bar{D} = 110$  сГр представлен в табл. 1. Такая доза (примерно втрое меньше средней дозы пациентов клинической больницы № 6, наиболее тяжело пострадавших после аварии в Чернобыле) однозначно определяет наличие больных ОЛБ и возможность летальных исходов. В табл. 1: столбец 3 – вариация значений  $\frac{\bar{D}}{D_0}$  в пределах (17), столбцы 4 и 5 – значения параметров логнормального распределения  $m$  и  $\sigma$ , рассчитанные по формулам (14.1 и 15) для соответствующих (в данной строке) значений  $\frac{\bar{D}}{D_0}$ . Эти значения  $m$  и  $\sigma$  соответствуют, по формуле (2.2), величине  $\bar{D}$  в столбце 2. Однако, если усреднить их (с равным весом) по всей области варьирования (17), определяемая по правилу (2.2) средняя доза окажется ниже обусловленной начальной дозы  $\bar{D}$  ( $\bar{D}_{\text{calc}} < 110$  сГр). Имеются, однако, области усреднения (объединенные ячейки в столбцах 6–10), для которых значения

$$\bar{m} = 4.455 \pm 0.000, \bar{\sigma} = 0.7017 \pm 0.031 \quad (18)$$

Т а б л и ц а 1

Прогноз характеристик распределения доз при аварии со средним значением индивидуальной гамма-дозы 1.10 Гр

№№ строк	$\bar{D}$ , сГр	$\frac{D}{D_0}$	$\sigma$	$m$	$\bar{\sigma} =$ 0.7055, $\bar{m} =$ 4.455, $\bar{D}$ , сГр	$\bar{\sigma} =$ 0.7025, $\bar{m} =$ 4.455, $\bar{D}$ , сГр	$\bar{\sigma} =$ 0.6970, $\bar{m} =$ 4.455, $\bar{D}$ , сГр	$\bar{\sigma} =$ 0.6920, $\bar{m} =$ 4.455, $\bar{D}$ , сГр	$\bar{\sigma} =$ 0.6858, $\bar{m} =$ 4.454, $\bar{D}$ , сГр
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	110	3	0.406	4.62					
2	110	4	0.504	4.57					
3	110	5	0.577	4.53					
4	110	6	0.636	4.50					
5	110	7	0.685	4.47	110.4	110.1	109.7	109.3	108.8
6	110	8	0.726	4.43					
7	110	9	0.763	4.41					
8	110	10	0.795	4.39					
9	110	12	0.850	4.34					
10	110	15	0.916	4.28					
11	110	19	0.984	4.22					
12	110	24	1.051	4.15					
13	110	30	1.113	4.08					
14	110	37	1.170	4.02					
15	110	45	1.223	3.95					
16	110	49.7	1.250	3.92					
17	110				$\sigma = 0.70 \quad m = 4.455$				

отвечают начальному условию  $\bar{D}(\bar{m}, \bar{\sigma}) = 110$  сГр. Эти значения и определяют конкретный вид прогнозируемого распределения доз при аварии со средней дозой гамма-излучения 110 сГр. Если проинтегрировать его в интервале от 0 до  $D$ , то  $n$  – доля облученных в дозе не более  $D$  – составит:

$$n = \int_0^D \frac{\exp[-(\ln D - m)^2/2\sigma^2]}{\sqrt{2\pi}\sigma D} dD = 1/2 \pm \Phi_0(z), \tag{19}$$

где  $\Phi_0(z)$  – нормированная функция Лапласа со значением аргумента  $z = (m - \ln D)/\sigma$  и знаком “–” перед ней, если  $m > \ln D$ , или  $z = (\ln D - m)/\sigma$  и знаком “+” перед ней, если  $m < \ln D$ . Тогда ожидаемое распределение последствий аварийного гамма-облучения со средним значением индивидуальной гамма-дозы 110 сГр должно характеризоваться данными, приведенными в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

*Клинические последствия аварийного гамма-облучения со средним значением индивидуальной гамма-дозы 1.10 Гр*

Дозовые пределы, сГр	Степень тяжести ОЛБ	Ведущий критерий (рвота)	Общая слабость	Головная боль, сознание, температура	Лейкоциты на 8 сутки, $10^9$ /литр	Срок госпитализации, сутки	Доля пострадавших
1	2	3	4	5	6	7	8
$\leq 20$	Доклиническая форма	Клинические симптомы острой лучевой болезни 3-6 отсутствуют				Не требуется	0.02
20–100	Лучевая реакция без последствий	Клинические симптомы острой лучевой болезни 3-5 отсутствуют. В течение 2-го месяца умеренные и нестойкие снижения числа лейкоцитов				Не требуется	0.56
100–200 (100–250)	Легкая ОЛБ-1	Нет, или спустя более 3 ч однократно	Легкая	Кратковременная. Сознание ясное. В норме	Более 3	Не требуется	0.30 (0.35)
200–400 (250–400)	Средняя ОЛБ-2	Через 1.5–3 ч на протяжении 4–6 ч	Умеренная	Постоянная. Сознание ясное. Чаше нормальная	2–3	С 20-х	0.11 (0.06)

Т а б л и ц а 2 (продолжение)

400– 600	Тяжелая ОЛБ-3	Через 0.5– 3 ч, много- кратно, до 12 ч	Выра- женная	Постоян- ная, силь- ная. Созна- ние ясное. В норме или субфе- брильная	1–2	С 8-х	~0.01
> 600	Крайне тяжелая	Через 0.5 ч неукроти- мая, более 12 ч	Резко вы- раженная	Упорная, сильная. Сознание может быть спут- анным до потери. Субфеб- рильная или феб- рильная	Менее 1	С 1-х	$\leq 0.003$

Их можно сопоставить с данными по Чернобылю. При этом особый вопрос – летальные исходы вследствие острой лучевой болезни. По статистике, приведенной в [11], из 791 свидетеля аварии на ЧАЭС были диагностированы: ОЛБ-1 у 41 человека, ОЛБ-2 у 50, ОЛБ-3 у 22, ОЛБ-4 у 21 человек. Из них умерли, соответственно, 1, 6, 7, 14 человек. В этой выборке средняя индивидуальная гамма-доза составляла 104 сГ, что очень близко (с точки зрения точности измерений – одно и то же) к условиям нашего прогноза. Необходимо отметить, что реальное количество летальных исходов ОЛБ для таких доз несоразмерно велико (всего погибших в упомянутой выборке 28 человек в течение 3 месяцев). А само понятие “легкая форма ОЛБ-1” (см. строку 3 табл. 2) вообще не сочетается с фактом летального исхода от опустошения кроветворного костного мозга. Объяснение этой ситуации требует рассмотрения особенностей сочетанного аварийного облучения [10, 12]. Причиной столь высокой смертности, по-видимому, явился вклад “неосновных” поражающих радиационных факторов, в первую очередь – местной лучевой травмы (лучевого ожога) и инкорпорации радиоактивности в организме. Эта тема выходит за рамки данной статьи и требует отдельного рассмотрения. По предварительным оценкам, такой вклад должен приводить к перераспределению данных о тяжести

последствий в 8 столбце табл. 2. Вместо последовательности долей пострадавших по тяжести последствий от гамма-облучения: 0.02; 0.56; 0.30; 0.11; 0.01, должна быть последовательность: 0.02; 0.37; 0.32; 0.28; 0.01. Тогда на основании совокупности данных, ожидаемое количество смертельных случаев составит 32 человека из 791. Учитывая сложность таких оценок, вполне удовлетворительное согласие.

В целом, предложенный способ прогноза воздействия поражающих факторов при аварийном облучении, по-видимому, достаточно согласуется с реальностью (см. также рис. 1) и может оказаться полезным на практике для планирования мер контроля и ликвидации последствий ядерных и радиационных аварий.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. Н. Васильченко, А. В. Носовский и др., *“Принципы ретроспективного восстановления доз и их взаимосвязь с состоянием здоровья участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС”*, в сб. *Радиационные поражения и перспективы развития средств индивидуальной защиты от ионизирующих излучений*. Под ред. Филатова В.Н., Бенецкого Б.А., Гогиной Е.Е. (М., ЦНИИТЭИЛЕГ-ПРОМ, 1994), с. 26–35.
- [2] Отчет NEA. Оценки Чернобыля. Атомная техника за рубежом, № 9, 26 (2003).
- [3] Б. А. Бенецкий, *“О распределении индивидуальных доз и тяжести поражений при радиационных авариях”*. Тезисы докладов 59 Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, ЯДРО, 2009 (СПб., Физ. фак. СПбУ, 2009), с. 304.
- [4] Б. А. Бенецкий, Влияние человеческого фактора на распределение индивидуальных доз и тяжести поражений при радиационных авариях. *Материалы 22 Международной научно-практической конференции*. Часть 2 (М., ВНИИПО, 2010), с. 35.
- [5] Б. А. Бенецкий, Изв. РАН, сер. физ. № 4, 649 (2011).
- [6] Б. А. Бенецкий, *Влияние человеческого фактора на формирование тяжести поражений при радиационных авариях. Средства спасения. Противопожарная защита* (РИА Изд. Дом ВДПО спецвыпуск 2011), с. 69.
- [7] Б. А. Бенецкий, Краткие сообщения по физике ФИАН **39**(1), 34 (2012).
- [8] Б. А. Бенецкий, Влияние человеческого фактора на время оперативного реагирования на сигнал о пожаре. Тезисы докладов XXIV Международной научно-практической конференции по проблемам пожарной безопасности, посвященной

75-летию создания института. Балашиха МО, 2012 г. Ч. 2. Россия (М., ВНИИ-ПО, 2012), с. 87.

- [9] Б. А. Бенецкий, Краткие сообщения по физике ФИАН **41**(1), 12 (2014).
- [10] Е. Е. Гогин, В. М. Емельяненко, Б. А. Бенецкий, В. Н. Филатов, *Сочетанные радиационные поражения* (М., Известия, 2000).
- [11] 20 лет чернобыльской катастрофы. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. Российский национальный доклад. Под общей ред. Шойгу С.К., Большова Л.А. (М., 2006).
- [12] Б. А. Бенецкий, М. Н. Лифанов, М. В. Плотникова, Препринт ИЯИ РАН 1380/2014 (М., ИЯИ, 2014).

Поступила в редакцию 24 сентября 2014 г.