

## **КОНЦЕПЦИЯ РИСКА И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ. ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА**

П.П. Хачикян  
Международный центр анализа и выбора решений,  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

### **1. Введение**

Опасные природно-климатические явления оказывают серьезное негативное воздействие как на функционирование экономики государств, так и на повседневную жизнь населения нашей планеты. Глобальное потепление, засухи, торнадо, цунами, наводнения, извержения вулканов и другие катастрофические природные явления – неразрывно ассоциируются с большим числом пострадавших и значительным материальным ущербом, нарушением обычного уклада жизни для тысяч людей по всему миру.

Согласно докладу Всемирной метеорологической организации ООН (ВМО ООН), за 50-ти летний период число стихийных бедствий увеличилось в пять раз, однако, благодаря значительному развитию систем прогнозирования, предупреждения и смягчения последствий, количество смертей сократилось почти в три раза. По данным ВМО за период 1970-2019 гг. в мире было зарегистрировано более 11000 стихийных бедствий, в результате которых погибло более 2 миллионов человек, нанесён ущерб около 3,64 триллионов долларов США [1]. Подчеркивая важность проблемы, следует отметить, что в 1965 году Генеральная Ассамблея ООН обратилась к государствам-членам по вопросу создания национального аппарата, предназначенного для помощи в случае стихийных бедствий [2]. Для привлечения внимания к важности проблемы, ООН постановила ежегодно отмечать 13 октября как Международный день по снижению риска бедствий. В 1988 году ВМО ООН и Программой Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) с целью предоставления всеобъемлющих оценок состояния научного, технического и социально-экономического знания об изменении климата, его причинах, потенциальных последствиях и стратегиях реагирования была создана Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК).

Согласно данным ООН, за период с 1970 по 2019 годы 91% от всех случаев смерти в результате природных и климатических катастроф приходится на развивающиеся страны, где высока доля населения, живущего за чертой бедности, а сами страны не в состоянии обеспечить жителей системами раннего предупреждения о ЧС и не применяют современные эффективные инструменты [3]. Оценки специалистов из ООН также предполагают, что к 2030 году в мире будет происходить около 560 стихийных бедствий в год, при этом на сегодняшний день около 75% экстремальных погодных явлений связаны с изменением климата [4]. В целях снижения риска бедствий, государствами-членами ООН был принят международный документ: Сендайская рамочная программа по уменьшению опасности бедствий (2015-2030), которая устанавливает четыре основных приоритетных направления действий [5]: 1. Понимание риска бедствий; 2. Укрепление системы управления рисками стихийных бедствий для управления рисками стихийных бедствий; 3. Инвестирование в снижение риска бедствий для устойчивости; 4. Повышение готовности к стихийным бедствиям для эффективного реагирования и улучшения ситуации в восстановлении, реанимации и реконструкции.

ООН в рамках реализации Сендайской рамочной программы по уменьшению опасности бедствий также указывает на её взаимосвязь с основными 17-тью Целями в области устойчивого развития (ЦУР (SDGS), англ. Sustainable Development Goals) (рис.1). В начале августа 2015 года 193 государства — члена ООН достигли консенсуса по итоговому документу новой повестки дня «Преобразование нашего мира: повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года» [5].



**Рис. 1.** Цели устойчивого развития (ООН) [5]

Существующие достижения научно-технического прогресса, как и сам характер возникновения природных стихийных бедствий, не позволяют полностью исключить негативное влияние таких событий на население и

экономику, однако, возможным является повысить как качество прогнозирования чрезвычайных ситуаций, так и снижения негативных последствий таких событий. Решение задачи осложнено тем, что ЧС происходят в условиях частичной или полной неопределённости, что не позволяет применять вероятностные модели. Природные катастрофы, как правило, возникают внезапно, непредсказуемо, а масштаб их последствий может превосходить все ранее подготовленные прогнозы. В качестве эффективных инструментов принятия решений и оценки риска в таких случаях является возможным применение сценарного подхода, разработка многокомпонентных сложных сценариев развития будущего, а также использование игрового моделирования, критериев пессимистического или оптимистического взгляда на выбор решений.

Доклад посвящен актуальной проблеме чрезвычайных ситуаций природного характера, принятию решений в условиях риска и неопределенности, применяемому для этих целей игровому моделированию и иным современным математическим подходам из области теории принятия решений.

## **2. Проблемы прогнозирования и снижения негативных последствий чрезвычайных ситуаций природного характера**

Управление в сфере безопасности при чрезвычайных ситуациях определяет два направления деятельности: 1) прогнозирование чрезвычайных ситуаций; 2) мероприятия по снижению негативных последствий чрезвычайных ситуаций. Современные системы мониторинга и отслеживания природно-климатической обстановки позволяют определить начало возникновения ряда событий, однако, в большинстве случаев, такие прогнозы являются оперативными или краткосрочными, а масштаб событий превосходит все ожидания экспертов и статистическую базу аналогичных явлений. Таким образом, существует проблема несоответствия прогностических сценариев возникновения и развития ЧС фактическим сценариям развития, что в результате и приводит к негативным последствиям. Перечисленная связь прогнозирования и наступления ЧС показана на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема прогнозирования и последствий наступления чрезвычайных ситуаций природного характера

Основными сдерживающими факторами в возможности предусмотреть наихудшие сценарии развития чрезвычайных ситуаций являются: условия глубокой неопределенности, в которых большинство природных явлений невозможно заранее спрогнозировать как по времени, так и по точному месту их возникновения; отсутствие возможности в перемещении на постоянное место жительства значительной численности населения в более безопасные условия; отсутствие финансового ресурса для реализации планово-предупредительных и подготовительных мер; недостатки организационно-управленческих процедур при эвакуации населения и ликвидации последствий в случае наступления ЧС. Перечисленные факторы определяют необходимость применения специальных подходов для принятия наиболее эффективных решений.

### 3. Принятие решений в условиях риска и неопределённости

Принятие решений для снижения последствий чрезвычайных ситуаций является задачей в условиях риска и неопределённости. Риск принимается как количественная величина возможности определенных негативных событий приносить вред человеку, мера опасности, характеризующая вероятность или частоту проявления опасности и последствий ее реализации за определенный промежуток времени. Как правило, принятие решений распределено по трём категориям, в зависимости от наличия входных данных: 1) принятие решений в условиях определенности (полной); 2) принятие решений в условиях частичной неопределенности; 3) принятие решений в условиях глубокой (полной)

неопределённости. Известно и более детализированное описание уровней неопределенностей, при котором глубокой неопределённости соответствует пятый уровень (рис. 3) [6-7].

Полная определённость		Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4	Уровень 5	Полное неведение
	Контекст	Полностью определённое будущее (с восприимчивостью факторам)	Альтернативные варианты будущего (с вероятностями)	Альтернативные варианты будущего (ранжированные)	Множество вероятных вариантов будущего (не ранжированных)	Неизвестное будущее	
	Модель системы	Модель единственной системы	Модель единственной системы с вероятностными параметрами	Модели нескольких систем, одна из которых наиболее вероятная	Модели нескольких систем с различной структурой	Неизвестная модель системы; знаем, что не знаем	
	Результаты работы системы	Точка, определённая с доверительным интервалом	Несколько наборов точек с доверительными интервалами и вероятностью попадания в них	Несколько наборов точек, ранжированных по вероятности попадания в них	Известный диапазон результатов	Неизвестные результаты; знаем, что не знаем	
	Значимость результатов работы системы	Единственная оценка весов	Несколько наборов весов, с вероятностью их реализации	Несколько наборов весов, ранжированных по вероятности их реализации	Известный диапазон весов	Неизвестные веса; знаем, что не знаем	

**Рис. 3** Эволюция уровней неопределённости (Evolution of uncertainty levels) [6-7]

Инструментами принятия решений в условиях глубокой неопределенности являются [6]:

- Робастное принятие решений (Robust Decision Making (RDM))
- Многоцелевое робастное принятие решений (Multi-Objective Robust Decision Making (MORDM))
- Планирование на основе предположений (Assumption-based planning (ABP))
- Динамическое адаптивное планирование (Dynamic Adaptive Planning (DAP))
- Динамическая адаптивная политика (Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP))
- Теория принятия решений с информационным пробелом (Info-gap (IG) decision theory)

- Анализ технических (технологических) возможностей (Engineering Options Analysis (EOA))
- Масштабирование решений (Decision Scaling (DS))
- Переломные моменты адаптации (Adaptation Tipping Point (ATP))
- Многоцелевая робастная оптимизация (Many-Objective Robust Optimization (MORO))

В качестве инструмента сценарного планирования выделяется динамическое адаптивное планирование (ДАП), которое успешно применялось для решения ряда стратегических задач государственного управления в зарубежных странах: управление рисками при наводнениях в Нидерландах в связи с изменением климата [8], при планировании внедрения инновационного городского транспорта [9], при оценке загруженности дорог [10], в интеллектуальных системах контроля скоростного режима [11]. Концепция ДАП и её применение для решения актуальных задач планирования вошли в программу курса «Специальные главы теории принятия решений» НИУ ВШЭ [12].

#### **4. Теория ожидаемой полезности и игровое моделирование**

Для решения ряда задач в сфере управления чрезвычайными ситуациями и оценки риска принятия решений, которые могут допускать оценку величины выигрыша или проигрыша, а также установление весов отдельным решениям, представляется возможным использование математического ожидания, теории ожидаемой полезности и игрового моделирования. Наибольшую известность в данном направлении получили фундаментальные труды известных учёных: Д. Бернулли, Дж. фон Неймана, О. Моргенштерна, Д. Канемана, А. Тверски, К. Эрроу, Д. Пратта и др. [13-17].

##### ***4.1. Теория ожидаемой полезности***

Склонность к риску лица, принимающего решения, можно распределить по следующим категориям: а) не расположен к риску; б) нейтрален к риску; в) любит риск.

Склонность к риску рассматривается с точки зрения устоявшихся в теории игр понятий выигрышей и проигрышей, при которых особое значение приобретают понятия величина и вероятность выигрыша. Соответственно, математическое ожидание изображается в следующем виде [13]:

$$U = \sum_{i=1}^n p_i x_i , \quad (1)$$

где  $U$  – функция полезности фон Неймана-Моргенштерна;  
 $x_i$  – величина выигрыша;  
 $p_i$  – вероятность выигрыша.

Учитывая, что речь идёт о лице, принимающем решение в условиях чрезвычайной ситуации (руководителе государственного органа, спасательной служб и др.), то есть о человеке со своим чувственным восприятием, моральными качествами и устоявшимися привычками, можно применить опыт Д. Бернулли в вопросах «морального ожидания» [14]. В таком случае вместо величины положительного исхода  $x_i$  следует рассматривать функцию полезности по Бернулли  $u(x_i)$ , что позволяет отобразить ожидаемую математическую полезность в следующем виде:

$$U = \sum_{i=1}^n p_i u(x_i) \quad (2)$$

Представляется возможность сравнивать различные решения по отношению к риску исходя из сравнения полезности гарантированного выигрыша, соответствующего математическому ожиданию с математическим ожиданием полезности. Полезность гарантированного выигрыша может быть больше, равна или меньше математическому ожиданию полезности, что в таком случае можно отобразить в следующем виде и определять принятые решения, которые:

а) не расположены к риску:

$$u\left(\sum_{i=1}^n p_i x_i\right) \geq \sum_{i=1}^n p_i u(x_i) \quad (3)$$

б) нейтральны к риску:

$$u\left(\sum_{i=1}^n p_i x_i\right) = \sum_{i=1}^n p_i u(x_i) \quad (4)$$

в) любят риск:

$$u\left(\sum_{i=1}^n p_i x_i\right) \leq \sum_{i=1}^n p_i u(x_i) \quad (5)$$

Следует также обратить внимание и на существующую практику математического выражения меры отношения к риску. Непринятие риска по Эрроу-Пратту описывается следующей функцией [15-16]:

$$r(x) = -\frac{u''(x)}{u'(x)} \quad (6)$$

Для решений, которые не расположены к риску эта функция будет строго положительна. Для решений, обладающих склонностью к риску:  $r(x) < 0$  при всех  $x$ , а в случае лиц с нейтральным отношением к риску:  $r(x) = 0$ .

Несмотря на возможность применения теории ожидаемой полезности для моделирования процессов принятия решений в условиях частичной неопределённости, следует отметить, что в вопросах поведенческого выбора применяются и более совершенные механизмы, которые могут применяться для принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций. Теория перспектив («Prospect Theory») Д. Канемана и А. Тверски позволяет (в отличие от теории полезности) учитывать избегание рисков - достаточно распространенный психологический аспект, при котором человек может переоценивать маленькие вероятности и недооценивать большие. Теория перспектив также характеризуется возможностью фиксировать начальную точку - положение сторон из которого был получен дальнейший результат (а не текущее положение, без учёта зависимости от какой точки каждая из сторон пришла к этому положению, как это производится в теории полезности) что, безусловно, важно для понимания и точности моделирования уровня удовлетворённости результатом. Формула Канемана и Тверски (7) для вычисления возможной ценности решения, где решение с наибольшей ценностью будет выбрано как предпочтительное, выглядит следующим образом [17]:

$$V = \sum_{i=1}^N \pi(p_i)v(x_i) \quad (7)$$

Пусть у решения  $A$  есть  $N$  возможных исходов, при этом каждый исход  $i$  имеет свою вероятность  $p_i$ .  $x_i$  – это значение исхода на горизонтальной оси функции ценности (ось убыток/прибыль), а  $v(x_i)$  сама функция ценности. Функция  $\pi(p_i)$  – функция коррекции вероятности (субъективной вероятности), которая по Канеману и Тверски как раз и предполагает, что люди недооценивают большие вероятности, но, переоценивают маленькие.

Таким образом:  $\pi(0.01)$  будет казаться больше, чем  $0.01$ , но  $\pi(0.99)$  будет казаться меньше, чем  $0.99$ . По Канеману и Тверски вероятность  $0.01$  это намного больше, чем вероятность  $0$ , при этом вероятности  $0.4$  и  $0.5$  обычно



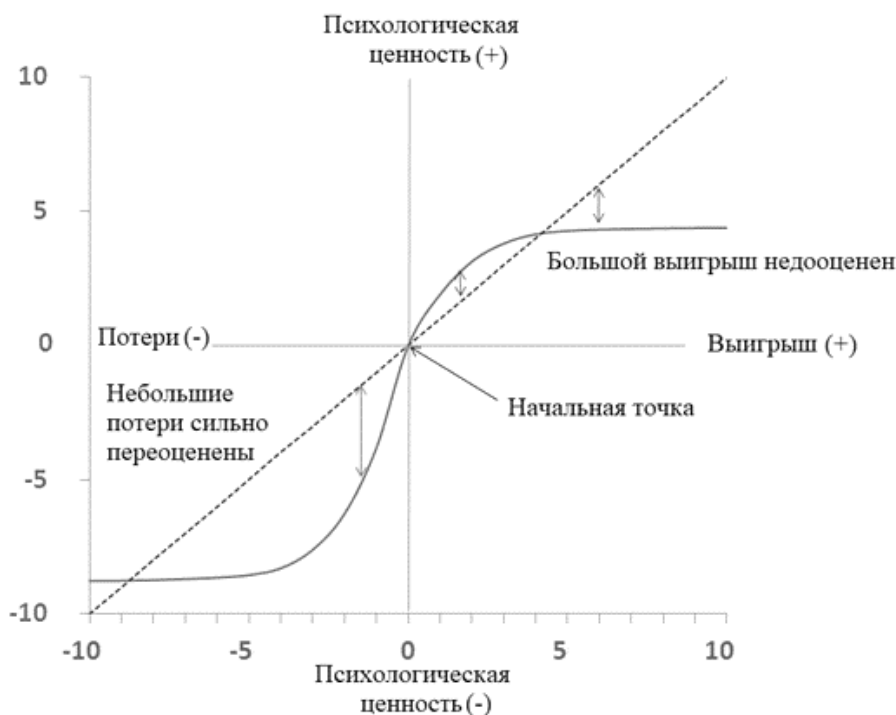
воспринимаются людьми как примерно одинаковые, при этом в качестве условной психологической границы раздела вероятностей «больше-меньше», авторы теории предлагают принимать число 0.33. При этом следует выделить, что  $\pi(0) = 0$ , как и  $\pi(1) = 1$ , так как психологически человек не будет завышать ожидания того, что событие должно произойти, если оно гарантировано не может случиться, также и не будет занижать ожидания события, которое гарантированно произойдет.

Фактически, ценность избранного решения равна сумме произведений субъективной вероятности каждого исхода на значение этого исхода на функции ценности и чем выше ценность решения – тем больше её предпочтительность для лица, принимающего решение.

Характерными свойствами приведённой функции являются:

- асимметричное восприятие прибылей и потерь (потери воспринимаются примерно в 2 раза сильнее, чем выигрыши);
- различное отношение к риску при потерях и выгодах (неприятие риска в случае выгод и склонность к риску в случае потерь);
- наличие начальной точки отсчета для оценивания психологической ценности результата;
- оценивается только изменение, а не абсолютный уровень;
- искаженное восприятие вероятности.

Изложенное показано на графике выигрыша и потерь, который поясняет теорию Канемана и Тверски (рис. 4):



#### Рис. 4. Восприятие выигрыша и потери по теории перспектив

### 4.2. Игровое моделирование

При теоретико-игровом подходе существует некоторое количество игроков (лиц принимающих решения, ответственных за действия в чрезвычайных ситуациях природного характера), у которых есть свои стратегии поведения. При выборе конкретной стратегии (принятию решения) – игрок может получить выигрыш. В случае с неопределенностями, существует модель игры, в которой осознанно действует только один из игроков – в таком случае, такие игры называются игрой с «Природой». «Природа» – это обобщенное понятие противника, не преследующего собственных целей в данном конфликте, хотя такую ситуацию конфликтом можно назвать лишь условно. Природа может принимать одно из своих возможных состояний и не имеет целью получение выигрыша. Игра с природой представляется в виде платежной матрицы, элементы которой – выигрыши игрока  $A$ , но не являются проигрышами природы  $P$ . Каждый элемент платежной матрицы  $a_{ij}$  – выигрыш игрока  $A$  при стратегии  $A_i$  в состоянии природы  $P_j$  (рис. 5) [18-19].

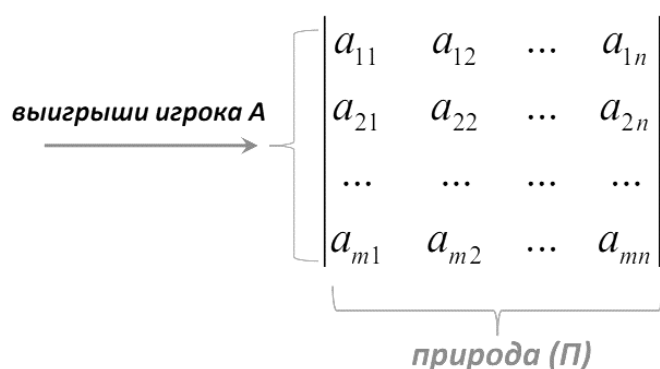


Рис. 5. Матрица стоимости (доходности)

Матрица также называется матрицей стоимости или доходности, которая агрегирует информацию о возможной доходности вариантов стратегии при различных сценариях развития экономической ситуации.

Предположим, что лицо, принимающее решение, может выбрать одну из возможных альтернатив, обозначенных номерами  $i = 1, 2, \dots, m$

Ситуация является полностью неопределенной, т. е. известен лишь набор возможных вариантов состояний внешней (по отношению к лицу, принимающему решение) среды, обозначенных номерами  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Если будет принято  $i$ -е решение, а состояние внешней среды соответствует  $j$ -й ситуации, то лицо, принимающее решение, получит доход  $a_{ij}$

Необходимо провести оценку риска в условиях, когда реальная ситуация неизвестна, как это часто бывает в случае чрезвычайными ситуациями природного происхождения. Если игрок знает, что осуществляется  $j$ -е состояние природы, то выбрал бы наилучшее решение, то есть то, которое принесет наибольший выигрыш  $b_j = \max(a_{ij}), j = 1, 2, \dots, n$

Принимая  $i$ -е решение, игрок  $A$  рискует получить не  $b_j$ , а только  $a_{ij}$ , то есть, если игрок примет  $i$ -е решение, а в природе реализуется  $j$ -е состояние, то произойдет недополучение дохода в размере:  $r_{ij} = b_j - a_{ij} = a_{\max j} - a_{ij}$  (по сравнению с тем, как если бы игрок знал точно, что реализуется  $j$ -е состояние природы, и выбрал бы решение, приносящее наибольший доход  $b_j = \max(a_{ij}), j = 1, 2, \dots, n$ )

$a_{ij}$  – значение показателя доходности варианта стратегии с максимальной доходностью из имеющихся  $i$ -ых вариантов при наступлении  $j$ -ого сценария развития событий

$a_{\max j}$  - значение показателя доходности  $i$ -ого варианта стратегии при наступлении  $j$ -ого сценария развития событий (элемент платежной матрицы).

Матрица рисков (сожалений) отражает риск реализации вариантов стратегии для каждой альтернативы развития событий (характеризует риск выбора определенного варианта стратегии) (рис. 6).

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{i1} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & & r_{mj} & & r_{mn} \end{pmatrix} \text{ где } r_{ij} = b_j - a_{ij} = a_{\max j} - a_{ij}$$

**Рис. 6.** Матрица сожалений

Наибольшую известность получили следующие критерии, которые позволяют определить вариант действий [18-19]:

1. Критерий Вальда (критерий гарантированного результата, максиминный критерий);
2. Критерий оптимизма (критерий максимакса);
3. Критерий пессимизма;
4. Критерий Сэвиджа (критерий минимаксного риска Сэвиджа);
5. Критерий Гурвица (взвешивает пессимистический и оптимистический подходы к анализу неопределенной ситуации).

Как правило, для выбора наиболее эффективного варианта действий, ко всем возможным вариантам развития событий применяются все критерии оптимальности одновременно: в результате оптимальным будет являться тот из них, на который указало большинство критериев.

## 5. Список литературы

1. Weather-related disasters increase over past 50 years, causing more damage but fewer deaths. World Meteorological Organization (WMO). 31.08.2021. // <https://smartwatermagazine.com/news/world-meteorological-organization/weather-related-disasters-increase-over-past-50-years-causing> (дата обращения: 04.03.2024).

2. United Nations. Организация Объединенных Наций (ООН). Генеральная Ассамблея - Двадцатая сессия. Резолюции, принятые по докладам Третьего комитета. 2034(XX).07 декабря 1965 г. Официальный веб-сайт // <https://documents-dds-ny.un.org/doc/RESOLUTION/GEN/NR0/220/47/PDF/NR022047.pdf?OpenElement> (дата обращения: 04.03.2024).

3. United Nations. UN Office for Disaster Risk Reduction, UNDRR // <https://www.undrr.org/> (дата обращения: 04.03.2024).

4. United Nations. Организация Объединенных Наций (ООН). К 2030 году в мире будет происходить около 560 стихийных бедствий в год. Официальный веб-сайт. 13.10.2023 г. // <https://news.un.org/ru/story/2023/10/1445762> (дата обращения: 05.03.2024).

5. United Nations. Организация Объединенных Наций (ООН). Генеральная Ассамблея - Двадцатая сессия. Резолюции, принятые по докладам Третьего комитета. 2034(XX).07 декабря 1965 г. Официальный веб-сайт // <https://documents-dds-ny.un.org/doc/RESOLUTION/GEN/NR0/220/47/PDF/NR022047.pdf?OpenElement> (дата обращения: 05.03.2024).

6. Walker W.E., Lempert R. J., Kwakkel J.H. Deep Uncertainty // Encyclopedia of Operations Research and Management Science. New York: Springer, 2013 P. 395–402 DOI: 10 1007/978- 1-4419-1153-7\_1140

7. Шипкова О.Т., Акимова Е.Н., Шатаева О.В. Инструменты планирования и принятия решений в условиях глубокой неопределённости как основа проактивной позиции экономического субъекта // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Экономика. 2022. № 2 С.127–141. DOI: 10 18384/2310-6646-2022-2-127-141

8. Rahman, S. A., Walker, W. E., & Marchau, V. A. W. J. (2008). Coping with uncertainties about climate change in infrastructure planning: An adaptive policymaking approach. Rotterdam: Ecorys
9. Marchau, V. A. W. J., Walker, W. E., & van Duin, R. (2008). An adaptive roach to implementing innovative urban transport solutions. *Transport Policy*, 15(6), 405–412
10. Marchau, V. A. W. J., Walker, W. E., & van Wee, G. P. (2010). Dynamic adaptive transport policies for handling deep uncertainty. *Technological Forecasting and Social Change*, 77, 940–950.
11. Agusdinata, D. B., Marchau, V. A. W. J. & Walker, W. E. (2007). Adaptive policy approach to implementing intelligent speed adaptation. *IET Intelligent Transport Systems (ITS)*, 1(3), 186–198.
12. Программа курса «Специальные главы теории принятия решений», Международный центр анализа и выбора решений (МЦАВР) НИУ ВШЭ. <https://www.hse.ru/ba/bi/courses/646476187.html?ysclid=1gtuid58of586653943> , электронный ресурс, дата обращения: 03.03.2024.
13. Дж. фон Нейман, О. Моргенштерн. Теория игр и экономическое поведение». — М.: «Наука», 1970. — 707 с.
14. Бернулли Д. Опыт новой теории измерения жребия // Теория потребительского поведения и спроса. — СПб.: Экономическая школа, 1993. — 380 с.
15. Pratt J. W. Risk Aversion in the Small and in the Large. *Econometrica*, 1964, Vol. 32, no. 1-2, pp. 122-136.
16. Arrow, K. J. The theory of risk aversion // *Collected Papers of Kenneth J. Arrow: Individual choice under certainty and uncertainty*. — Harvard University Press, 1984. — Vol. 3. — 284 p.
17. Tversky, Amos. Advances in Prospect Theory : Cumulative Representation of Uncertainty : [англ.] / Amos Tversky, Daniel Kahneman // *Journal of Risk and Uncertainty*. — 1992. — Vol. 5, p. 297—323.
18. Петросян Л. А. Теория игр. — 2-е изд. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. — 424 с.
19. Печерский С. Л. Теория игр для экономистов. Вводный курс. — СПб.: Изд-во Европейского университета, 2001. — 342 с.