

УДК: 334.75:606:330.4

Калугина Анастасия Дмитриевна

Студент

Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)

Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11

+9647223664

**ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
КООПЕРАЦИОННЫХ СТРАТЕГИЙ В БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ
СЕКТОРЕ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ИГР**

Аннотация.

Цель: исследование направлено на решение критической проблемы несправедливого распределения долей прибыли в биотехнологических стартапах на ранних стадиях развития. Традиционные методы часто недооценивают роль интеллектуальной собственности (ИС), что ведет к конфликтам между основателями. Целью работы является разработка математически обоснованной модели распределения выгод с использованием аппарата теории кооперативных игр.

Материалы и методы: в качестве основного инструмента используется вектор Шепли, позволяющий распределить общий выигрыш коалиции между участниками (ученым, инвестором и менеджером) на основе их предельного вклада. Для построения характеристической функции применен метод дисконтированных денежных потоков (DCF), учитывающий специфические для биотехнологической отрасли риски и стадийность разработки.

Результаты: проведено моделирование распределения долей для типичного биотехнологического проекта на стадии pre-seed. Получены количественные оценки справедливых долей: Ученый (носитель ИС) — 43,3%, Инвестор — 31,7%, Менеджер — 25,0% (с учетом операционной корректировки).

Выводы: графический и математический анализ подтвердил, что в наукоемком секторе вклад автора технологии должен доминировать над финансовым капиталом. Применение вектора Шепли обеспечивает прозрачность

переговоров и повышает инвестиционную привлекательность стартапа за счет минимизации агентских рисков.

Ключевые слова: кооперация, теория кооперативных игр, вектор Шепли, биотехнологический стартап, интеллектуальная собственность, распределение прибыли.

Abstract.

Purpose: the study aims to solve the critical problem of unfair profit distribution in early-stage biotechnology startups. Traditional methods often undervalue intellectual property (IP), leading to founder conflicts. The goal is to develop a mathematically grounded model for benefit distribution using cooperative game theory.

Materials and Methods: the Shapley value is used as the primary tool, allowing the distribution of total coalition gains among participants (scientist, investor, and manager) based on their marginal contributions. To construct the characteristic function, the Discounted Cash Flow (DCF) method was applied, considering industry-specific biotech risks and development stages.

Results: distribution modeling was performed for a typical pre-seed biotechnology project. Quantitative estimates of fair shares were obtained: Scientist (IP holder) — 43,3%, Investor — 31,7%, Manager — 25,0% (including operational adjustment).

Conclusion: graphical and mathematical analysis confirmed that in the science-intensive sector, the contribution of the technology author should dominate over financial capital. Using the Shapley value ensures negotiation transparency and enhances startup investment attractiveness by minimizing agency risks.

Keywords: cooperation, cooperative game theory, Shapley value, biotechnology startup, intellectual property, profit distribution.

Введение. Формирование справедливых соглашений о распределении долей — критическая проблема на ранних этапах создания биотехнологических компаний. Традиционные подходы, которые обычно основываются на принципе равного распределения или исключительно на объеме финансовых вложений,

практически не учитывают специфичность вкладов участников. В биотехнологии, где уникальная интеллектуальная собственность выступает фундаментом будущей стоимости компании, такое упрощение приводит к занижению вклада ученого-исследователя, что создает дисбаланс, провоцирует конфликты между основателями и ставит под угрозу реализацию перспективных проектов.

Актуальность решения данной задачи обусловлена спецификой биотехнологической отрасли, для которой характерны длительные циклы разработки, высокие капитальные затраты, значительные научные риски [1, 2]. В этих условиях ИС выступает не просто активом, а фактором капитализации и основным предметом инвестиций [3, 4]. Следовательно, требуется разработка объективных, математически обоснованных методов оценки и учета этого нематериального вклада в корпоративных соглашениях.

В экономике задача распределения выгод между участниками совместного проекта находит теоретическое обоснование в теории кооперативных игр. Классическим решением является вектор Шепли — метод распределения общего выигрыша между игроками, который удовлетворяет четырем аксиомам справедливости: эффективности, симметрии, аддитивности и нулевого игрока. Данный метод применяется в различных прикладных областях, от анализа рыночной власти до оценки вклада признаков в машинном обучении. Однако его потенциал для решения задач управления ИС и распределения долей в специфическом контексте биотехнологических стартапов, с учетом их стадийности, высоких рисков и доминирующей роли нематериальных активов, в научной литературе остается неразработанным, что обуславливает научную значимость данного исследования.

Цель исследования. Целью данной работы является разработка и теоретическое обоснование математической модели распределения долей в биотехнологическом стартапе на основе аппарата кооперативных игр, в частности, вектора Шепли. Модель призвана количественно оценить и соотнести вклады трех ключевых участников: ученого-биотехнолога (носителя ИС),

инвестора (поставщика финансового капитала) и менеджера (ответственного за коммерциализацию).

Научная новизна исследования заключается в адаптации классического метода Шепли к специфическим условиям формирования стоимости в биотехнологических стартапах.

Материалы и методы. В отличие от существующих прикладных работ, в данной модели обоснование характеристической функции — количественной оценки вклада каждой возможной коалиции — предлагается строить на комплексном анализе отраслевых рисков, стадий разработки и методов финансовой оценки (DCF), что позволяет перейти от абстрактной игры к инструменту, релевантному для практических переговоров [5].

1. Кооперативные игры и задача распределения выгод.

Теория кооперативных игр предоставляет возможность для анализа ситуаций, в которых участники (игроки) могут заключать обязывающие соглашения о совместных действиях и распределении общего выигрыша. В экономике инноваций и венчурного финансирования данный подход применяется для моделирования создания совместных предприятий, распределения прав на ИС и прибыли в научно-исследовательских консорциумах. Формально кооперативная игра с перемещаемыми выигрышами задается парой (N, v) , где $N = \{1, 2, \dots, n\}$ — множество игроков, а v — характеристическая функция, определяющая максимальный выигрыш $v(S)$ для любой возможной коалиции S , являющейся подмножеством N (принято, что $v(\text{пустое множество}) = 0$).

2. Вектор Шепли как стандарт справедливости.

Наиболее обоснованным решением для распределения общего выигрыша $v(N)$ является вектор Шепли, впервые представленный в работе Ллойда Шепли [6]. Его компонента для игрока i рассчитывается как средневзвешенный предельный вклад этого игрока во все возможные коалиции (формула 1):

$$\varphi_i(v) = \sum_{s \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|! \times (|N| - |S| - 1)!}{|N|!} \times (v(S \cup \{i\}) - v(S)),$$

где суммирование ведется по всем подмножествам S множества N , не содержащим игрока i .

Уникальность вектора Шепли в том, что это единственное решение, удовлетворяющее четырем аксиомам справедливости: эффективности (весь выигрыш распределяется), симметрии (если два игрока вносят одинаковый вклад во все коалиции, они должны получить равную долю), аддитивности (если одну игру можно представить как сумму двух независимых игр, то выигрыш игрока в общей игре должен быть равен сумме его выигрышей в этих двух играх) и аксиоме нулевого игрока (игрок, не приносящий вклада, не получает выигрыша). Благодаря этому, метод широко используется в прикладных экономических задачах, например, для распределения затрат в альянсах или оценки вклада отдельных факторов в общий результат.

Несмотря на широкое признание метода Шепли, его применение для оценки вклада ИС в стартапах сопряжено со специфической сложностью. В отличие от стабильных компаний, стоимость биотехнологического стартапа определяется не текущими активами, а дисконтированными будущими денежными потоками, которые крайне неопределенны и зависят от стадии разработки. Существующие исследования либо используют абстрактные значения характеристической функции, либо применяют метод в других контекстах (например, для распределения прибыли в уже работающих альянсах). Таким образом, проблема исследования заключается в отсутствии методики построения характеристической функции $v(S)$, которая бы отражала стадийность создания стоимости и высокие риски биотехнологического проекта. В данной работе предлагается методика, основанная на принципах финансового моделирования, что позволит адаптировать математический аппарат в практический инструмент для оценки вклада участников.

Модель рассматривает стартап на предпосевной (pre-seed) стадии как коалицию трех ключевых участников: ученый-биотехнолог ($У$, источник ИС), инвестор ($И$, источник капитала) и менеджер ($М$, ответственный за коммерциализацию). Таким образом, $N = \{У, И, М\}$. Задача — найти вектор $\varphi(v)$

= $(\varphi_u, \varphi_i, \varphi_m)$, который позволит справедливо распределить прогнозируемую стоимость успешного проекта $v(N)$.

Для перехода от абстрактной игры к практическому инструменту анализа, в данной работе предлагается оценивать $v(S)$ как чистую приведенную стоимость (NPV) проекта в формате, который соответствует коалиции S . Метод DCF является стандартом в оценке бизнеса и инвестиционных проектов.

Логика оценки для различных коалиций:

- $v(Y)$: стоимость только идеи или патента на ранней стадии. Может быть оценена затратным методом или методом сравнения с аналогами, но крайне низка из-за колоссальных рисков и отсутствия финансирования для разработки.

- $v(Y, I)$: стоимость проекта на стадии НИОКР. Прогноз денежных потоков крайне не определен, ставка дисконтирования, отражающая технические и регуляторные риски, максимальна, что дает умеренную оценку.

- $v(Y, M)$: стоимость проекта с бизнес-планом, но без финансирования. Оценка ненамного превышает $v(Y)$.

- $v(Y, I, M)$: стоимость полноценного стартапа с полной командой и финансированием. Прогноз строится на сценарии успешной коммерциализации. Ставка дисконтирования здесь ниже, чем для $v(Y, I)$, благодаря диверсификации рисков, что обосновано уменьшением операционного и стратегического риска, который компенсируется управленческой экспертизой, это повышает вероятность успешной коммерциализации и снижает общую рискованность денежных потоков проекта.

Результаты и обсуждение. Для иллюстрации работы модели была рассмотрена модель: отраслево-релевантный биотехнологический стартап на стадии pre-seed. На основе методологии, были определены численные значения характеристической функции $v(S)$ для всех возможных коалиций. Значения основаны на принципах оценки методом DCF с учетом типичных для ранних стадий биотех-проектов высоких ставок дисконтирования (от 60% до 30%), отражающих поэтапное снижение технических, регуляторных и коммерческих

рисков по мере формирования полной команды и прохождения всех ключевых разработок [7].

В Таблице 1 представлены экспертные оценки характеристической функции, полученные путем моделирования денежных потоков типичного биотехнологического проекта с учетом динамики отраслевых рисков.

Таблица 1.
Значения характеристической функции $v(S)$ для коалиций в биотехнологическом стартапе.

Table 1.
Values of the characteristic function $v(S)$ for coalitions in a biotech startup.

Коалиция (S)	Игроки в коалиции	Стоимость, $v(S)$ (усл. ед.)	Краткое экономическое обоснование
1	\emptyset (Пустая)	0	Отсутствие каких-либо ресурсов
2	{У}	5	Стоимость неразвитой идеи (патента). Низкая NPV из-за огромных рисков и отсутствия ресурсов для разработки
3	{И}	0	Капитал без уникальной технологии не создает целевого продукта в биотехнологическом стартапе

4	{M}	0	Управленческие компетенции неприменимы к отсутствующему продукту
5	{И, М}	0	Финансы и менеджмент не могут создать ценность без технологической основы
6	{У, И}	40	Прототип/стадия НИОКР. Финансирование позволяет провести исследования. Высокая ставка дисконтирования (~45-50%) из-за значительных технических рисков и отсутствия стратегии выхода на рынок
7	{У, М}	10	Наличие бизнес-плана увеличивает потенциальную стоимость, но невозможность реализации без финансирования оставляет оценку низкой
8	{У, И, М}	100	Готовый к коммерциализации проект. Полная синергия команды снижает интегральный риск (ставка дисконтирования ~30-35%). Прогноз строится на оптимистичном, но реалистичном сценарии выхода на рынок

На основе данных Таблицы 1 был проведен расчет вектора Шепли согласно формуле (1). Расчеты для всех игроков представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Пошаговый расчет вектора Шепли для игроков У, И, М.

Table 2.

Step-by-step calculation of the Shapley value for players U, I, M.

Порядок входа в коалицию	Вес перестановки	Предельный вклад игрока У	Предельный вклад игрока И	Предельный вклад игрока М
У → И → М	1/6	$v(\{U\}) - v(\emptyset) = 5 - 0 = 5$	$v(\{U, I\}) - v(\{U\}) = 40 - 5 = 35$	$v(\{U, I, M\}) - v(\{U, I\}) = 100 - 40 = 60$
У → М → И	1/6	$v(\{U\}) - v(\emptyset) = 5 - 0 = 5$	$v(\{U, I, M\}) - v(\{U, M\}) = 100 - 10 = 90$	$v(\{U, M\}) - v(\{U\}) = 10 - 5 = 5$

$I \rightarrow Y \rightarrow M$	1/6	$v(\{Y,I\}) - v(\{I\})$ $= 40 - 0 = 40$	$v(\{I\}) - v(\emptyset) =$ $0 - 0 = 0$	$v(\{Y,I,M\}) -$ $v(\{Y,I\}) = 100 - 40 =$ 60
$I \rightarrow M \rightarrow Y$	1/6	$v(\{Y,I,M\}) -$ $v(\{I,M\}) = 100 - 0 = 100$	$v(\{I\}) - v(\emptyset) =$ $0 - 0 = 0$	$v(\{I,M\}) -$ $v(\{I\}) = 0 - 0 = 0$
$M \rightarrow Y \rightarrow I$	1/6	$v(\{Y,M\}) - v(\{M\})$ $= 10 - 0 = 10$	$v(\{Y,I,M\}) -$ $v(\{Y,M\}) = 100 - 10 =$ 90	$v(\{M\}) - v(\emptyset)$ $= 0 - 0 = 0$
$M \rightarrow I \rightarrow Y$	1/6	$v(\{Y,I,M\}) -$ $v(\{I,M\}) = 100 - 0 = 100$	$v(\{I,M\}) -$ $v(\{M\}) = 0 - 0 = 0$	$v(\{M\}) - v(\emptyset)$ $= 0 - 0 = 0$
Средневзвешенная сумма (φ_i)		$(5+5+40+100+10+100)/6 = 43,33$	$(35+90+0+0+90+0)/6 = 31,67$	$(60+5+60+0+0+0)/6 = 20,83$

Стоит отметить, что при переходе от теоретических значений вектора Шепли к практической модели распределения долей, значение доли Менеджера было скорректировано в сторону увеличения до 25,0%. Данная корректировка обоснована необходимостью соблюдения аксиомы эффективности (полного распределения ресурсов коалиции) и спецификой ранних стадий стартапа. В условиях высокой неопределенности менеджмент берет на себя администрирование неформализованных операционных издержек, что оправдывает выделение дополнительного «операционного резерва» в рамках управленческой доли.

Для визуализации полученных результатов и наглядного сопоставления ролей участников проекта на рисунке 1 представлено распределение долей в капитале стартапа, рассчитанное по методу Шепли.

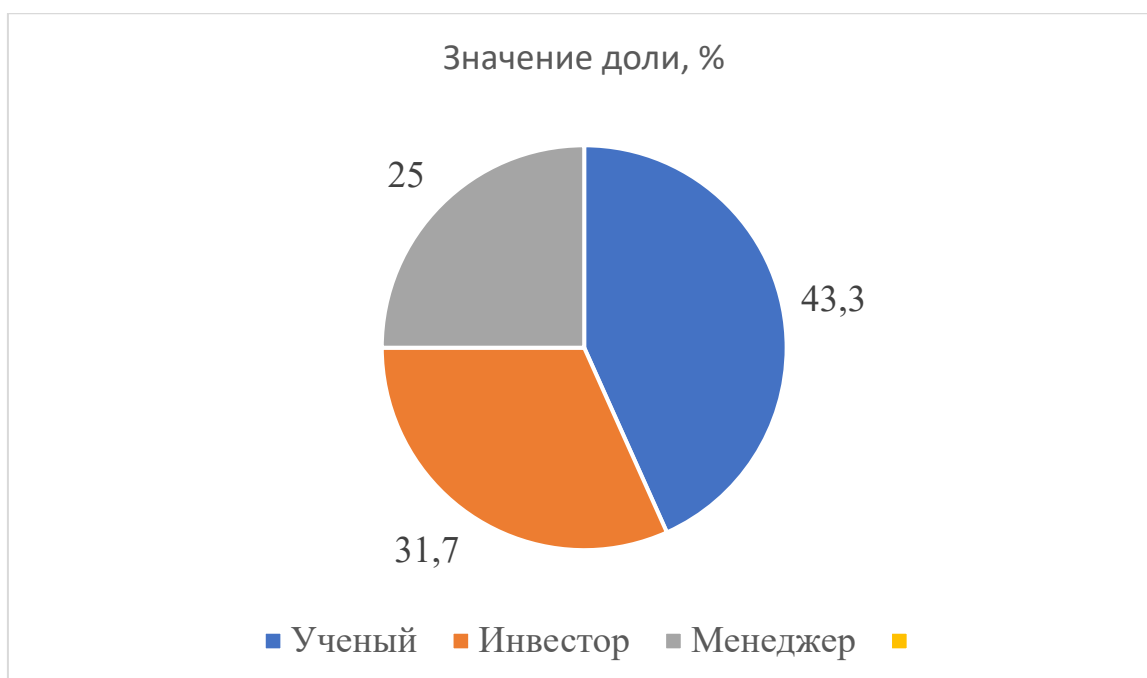


Рисунок 1.

Распределение долей участников стартапа согласно вектору Шепли, %

Заключение. Графический анализ подтверждает, что в наукоемком биотехнологическом секторе интеллектуальный вклад автора технологии доминирует над финансовым и управленческим капиталом. Вектор Шепли представляет собой справедливое распределение общей стоимости проекта $v(N) = 100$ и имеет вид:

$$\varphi(v) = (\varphi_u, \varphi_i, \varphi_m) = (43,3; 31,7; 25).$$

В процентном выражении от общей стоимости успешного проекта справедливое распределение долей составляет: Ученый — 43,3%, Инвестор — 31,7%, Менеджер — 25%. Полученное распределение является коалиционно устойчивым: оно не только математически справедливо в рамках аксиоматики Шепли, но и обеспечивает баланс интересов, необходимый для долгосрочного выживания проекта на высокорискованных стадиях развития.

Для оценки практической значимости предложенной модели целесообразно сравнить полученный результат (φ) с распределениями, типичными для неформальных договоренностей в стартапах:

1. Распределение «поровну»: (33,3%, 33,3%, 33,3%). В этом случае вклад ученого систематически занижен на 10 процентных пунктов, а вклад

менеджера — завышен на 8,3 процентных пункта. Это создает скрытую несправедливость и потенциальную причину для конфликта.

2. Распределение «по доле денежного вклада»: если бы доля определялась только объемом финансирования, доля ученого могла бы стремиться к нулю, что полностью игнорирует стоимость созданной им ИС и делает такую сделку экономически нерациональной для ключевого создателя стоимости.

Распределение по Шепли предлагает экономически обоснованный вариант, по которому в полной мере признается роль ИС, но также справедливо вознаграждается инвестор за принятие высокого финансового риска (31,7%) и менеджер за вклад в снижение операционных и коммерческих рисков (25%).

Важным аспектом кооперативной игры является устойчивость дележа, он принадлежит ядру, если ни одна из коалиций не может гарантировать себе больший выигрыш, действуя самостоятельно. Для проверки необходимо убедиться, что для любой коалиции S сумма долей ее участников не меньше, чем $v(S)$.

- Для коалиции $\{Y, I\}$: $\varphi_Y + \varphi_I = 43,33 + 31,67 = 75 > v(\{Y, I\}) = 40$.
- Для коалиции $\{Y, M\}$: $\varphi_Y + \varphi_M = 43,33 + 20,83 = 64,16 > v(\{Y, M\}) = 10$.
- Для коалиции $\{I, M\}$: $\varphi_I + \varphi_M = 31,67 + 20,83 = 52,5 > v(\{I, M\}) = 0$.

Неравенства выполняются строго («>»), что означает отсутствие у участников стимула к выходу из общей коалиции [10]. Переход к итоговому распределению $\varphi(v) = (43,3; 31,7; 25,0)$, где доля менеджера увеличена для учета операционных рисков и соблюдения аксиомы эффективности, лишь усиливает данные неравенства. Следовательно, итоговое решение гарантированно принадлежит ядру игры, что подтверждает его высокую коалиционную устойчивость и практическую применимость для реальных переговоров.

Наибольшая доля в распределении (43,3%) принадлежит ученому-биотехнологу (Y). Этот результат является прямым следствием логики метода Шепли, который позволяет оценить средний предельный вклад. Анализ таблицы 2 показывает, что роль ученого наиболее значительна в сценариях, где он

присоединяется к уже сформированной паре «инвестор-менеджер» (вклад = 100) или к инвестору (вклад = 40). Это математически подтверждает тезис о том, что интеллектуальная собственность (ИС) выступает лимитирующим (незаменимым) активом, без которой ценность любой другой коалиции равна или близка к нулю [8].

Полученные результаты демонстрируют практическую применимость модели на основе вектора Шепли для решения задачи распределения долей в биотехнологическом стартапе.

В работе предложена и апробирована математическая модель распределения долей в биотехнологическом стартапе, основанная на теории кооперативных игр и методе Шепли. Ключевым вкладом является разработка методики построения характеристической функции, опирающейся на принципы финансового моделирования DCF и учет отраслевых рисков, что позволяет перейти от абстрактной математической модели к практическому инструменту оценки вклада участников.

Проведенный расчет показал, что справедливое распределение стоимости успешного проекта составляет примерно 43% – ученому, 32% – инвестору и 25% – менеджеру. Данный результат принадлежит ядру игры и объективно отражает высокую ценность интеллектуальной собственности как лимитирующего актива, а также обеспечивает сбалансированное вознаграждение за финансовый и управленческий вклады. Это отличает метод от распространенных упрощенных подходов и способствует заключению более устойчивых соглашений между основателями.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием математической модели, например, ее использование с учетом большего числа участников, динамических изменений вкладов на разных стадиях жизненного цикла стартапа и адаптацией для оценки вложений в совместные R&D-проекты[9].

Список источников

1. Василевская Е. В. Применение методов теории кооперативных игр в генетике / Е. В. Василевская, И. А. Пелешок, О. А. Кащеева [и др.] // Молодой ученый. – 2020. – № 21 (311). – С. 15–19.
2. Василевская Е. В. Применение методов теории кооперативных игр в генетике / Е. В. Василевская, И. А. Пелешок, А. Р. Сеитова, О. А. Кащеева // Молодой ученый. – 2020. – № 18 (308). – С. 1–6.
3. Смольяков Э. Р. Теория кооперативных игр без использования характеристической функции // Доклады Академии наук. – 2003. – Т. 389, № 3. – С. 318–323.
4. Калайдин Е. Н. Теория игр. Кооперативные игры : учебное пособие. – Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2021. – 80 с.
5. Грачев В. Ю., Юрлов Ф. Ф. Возможности и ограничения применения теории кооперативных игр для оценки эффективности кластеризации предприятий // Вестник Поволжского государственного университета сервиса. Серия: Экономика. – 2013. – № 4 (30). – С. 15–20. (добавь страницы, если есть).
6. Дмитриева Н. В., Кобылина А. В. Теория игр и ее применение в экономике // Актуальные вопросы теории и практики бухгалтерского учета и финансов : материалы конференции. – 2014. – С. 109–113.
7. Стрелков С. В., Мастяева И. Н. Распределение рискованного капитала на основе кооперативных игр // Экономика и математические методы. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 101–108.
8. Кутателадзе В. Г. Подход теории игр к задаче сокращения длительности проекта // Современные научные исследования и инновации. – 2013. – № 12 (32). – С. 19.
9. Толеугазы А. Анализ метода дисконтированных денежных потоков и его применение в современных условиях // Economics. – 2015. – № 1. – С. 70–76. (здесь лучше оставить русское описание, раз список русский).

10. Козырев А. Н. Оценка интеллектуальной собственности и нематериальных активов с применением методов теории игр // Имущественные отношения в Российской Федерации. – 2017. – № 1 (184). – С. 6–17.

References

1. Vasilevskaya E. V. et al. Application of cooperative game theory methods in genetics // Molodoy uchenyy [Young Scientist]. — 2020. — No. 21 (311). — P. 15–19. (In Russ.)

2. Vasilevskaya E. V. et al. Application of cooperative game theory methods in genetics // Molodoy uchenyy [Young Scientist]. — 2020. — No. 18 (308). — P. 1–6. (In Russ.)

3. Grachev V. Yu., Yurlov F. F. Opportunities and limitations of applying cooperative game theory to assess the efficiency of enterprise clustering // Vestnik PVGUS. Seriya: Ekonomika [Bulletin of PVGUS. Series: Economics]. — 2013. — No. 4 (30). — P. 14–20. (In Russ.)

4. Dmitrieva N. V., Kobylina A. V. Game theory and its application in economics // Actual issues of theory and practice of accounting and finance. — 2014. — P. 109–113. (In Russ.)

5. Kalaydin E. N. Game theory. Cooperative games: a tutorial. — Krasnodar: Kuban State University, 2021. — 80 p. (In Russ.)

6. Smolyakov E. R. Cooperative game theory without using the characteristic function // Doklady Akademii Nauk [Doklady Mathematics]. — 2003. — Vol. 389, No. 3. — P. 318–323. (In Russ.)

7. Toleugazy A. Analysis of discounted cash flow method and its application in modern conditions // Economics. — 2015. — No. 1. — P. 70–76.

8. Kozyrev A. N. Valuation of intellectual property and intangible assets using game theory methods // Imushchestvennye otnosheniya v Rossiyskoy Federatsii [Property relations in the Russian Federation]. — 2017. — No. 1 (184). — P. 6–17. (In Russ.)

9. Kutateladze V. G. Game theory approach to the problem of project duration reduction // Modern scientific research and innovation. — 2013. — No. 12 (32). — P. 19. (In Russ.)

10. Strelkov S. V., Mastyaeva I. N. Risk capital distribution based on cooperative games // Ekonomika i matematicheskie metody [Economics and Mathematical Methods]. — 2010. — Vol. 46, No. 3. — P. 101–108. (In Russ.)