

# Агентная модель процесса формирования научных результатов

Е.Е. Васильева<sup>1</sup>, О.В. Иванов<sup>1</sup>, А.В. Колобов<sup>1</sup>, А.В. Леонидов<sup>1,2</sup>,  
В.А. Нечитайло<sup>1</sup>, Н.П. Пильник<sup>1,3,4,5</sup>, С.А. Радионов<sup>1,4,5</sup>,  
И.П. Станкевич<sup>1,3</sup>

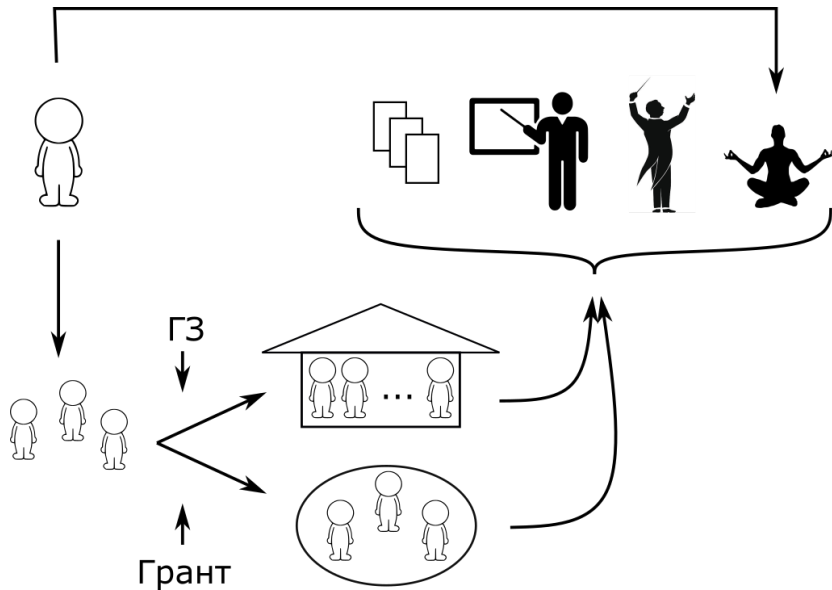
<sup>1</sup>ФИАН, <sup>2</sup>МФТИ, <sup>3</sup>НИУ ВШЭ, <sup>4</sup>НИФИ, <sup>5</sup>ФИЦ ИУ РАН





2 марта 2021 г.

Семинар по математической экономике ЦЭМИ РАН

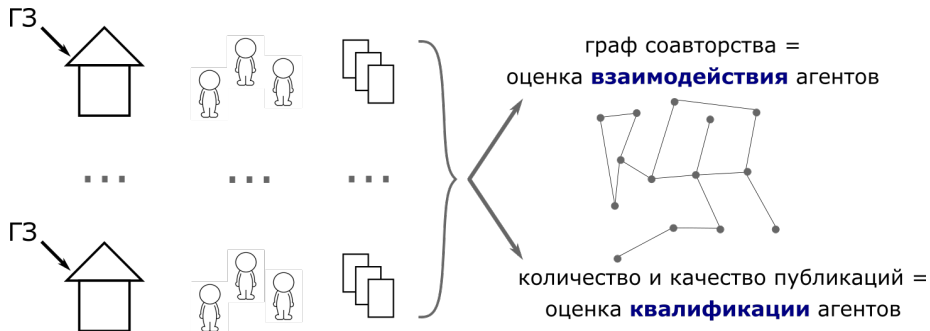
- Исходная версия модели разрабатывалась в рамках работы по гранту Миннауки ААА-А19-119112890088-0
- Цель исследования - разработка модели, позволяющей анализировать сценарии развития научной сферы в зависимости от характера задач и конфигурации драйверов развития (финансирование, ...)
- Основное требование к модели - реалистичный учет имеющейся институциональной структуры сферы науки.
- Агенты в модели не являются стратегическими и реализуют заданные алгоритмы действий.
- Модель не претендует на реалистичное описание индивидуальной мотивации для научных исследований и механизма генерации нового знания как такового и рассчитана на описание результатов работы коллективов исследователей (страна, область знания, научные институты и университеты, ...) в измеримых терминах (количество и качество публикаций, разработанных технологий и т.д.)

# Схема модели

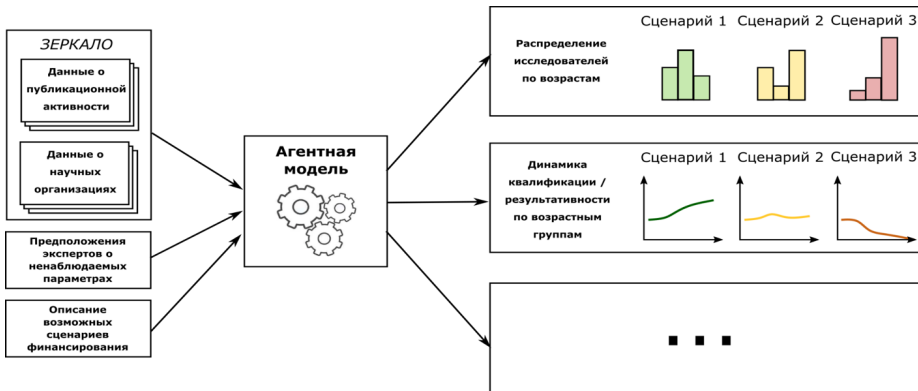


Обозначение	Тип сущности	Информация
	Агент Исследователь	Возраст, публикации, соавторы, аффилиации
	Организация	Сотрудники, размер ГЗ, регион
	Научная группа	
	Научно-технический результат	Публикации
ГЗ	Государственное задание	Размер ГЗ организаций
Грант	Грант	Условия РФФИ и РНФ

- Квалификация – мера способности получать научно-технические результаты определенного качества.
- Получение научно-технических результатов возможно только в рамках научных коллективов (научные институты, группы в рамках грантов)
- Индивидуальным является саморазвитие агентов
- Нормировка модели на реальность использует данные по статистике публикационной активности и данные отчетов академических организаций.



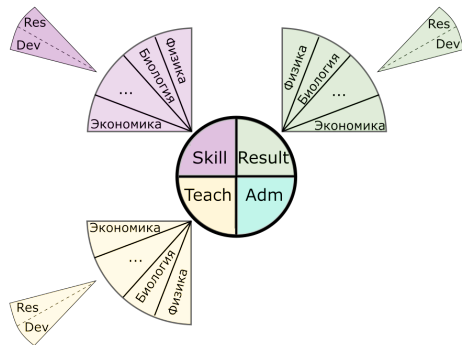
# Input -> Output модели



# Характеристики ключевых сущностей модели

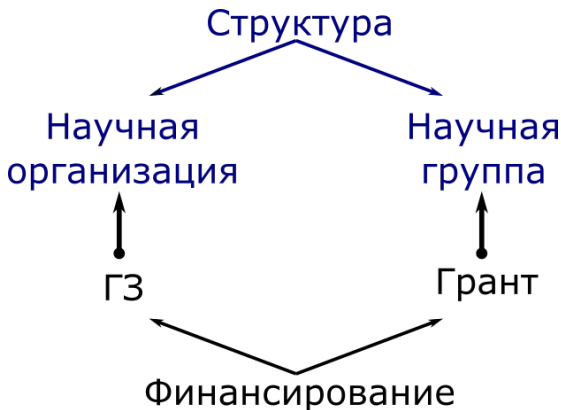
## Агент «Исследователь»

- Множество агентов «Исследователь»  $i \in \mathbb{I} = \{1, \dots, I\}$ .
- Агент может работать по некоторому набору из  $\mathbb{J} = \{1, \dots, J\}$  направлений.
- В рамках каждого направления деятельность подразделяется на фундаментальные исследования (**Res**, research) и опытно-конструкторские разработки (**Dev**, development).
- По каждому направлению агент разделяет свои трудозатраты между:
  - повышением квалификации (**Skill**),
  - подготовкой научно-технических результатов (**Result**),
  - преподаванием (**Teach**),
  - административной работой (**Adm**).





- Появление научно-технических результатов – следствие взаимодействия исследователей в некотором коллективе.
- Научная работа по проектам ведется либо в рамках организации, либо в научной группе.

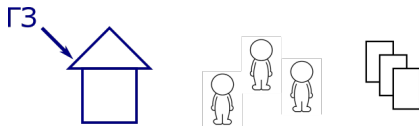


# Характеристики ключевых сущностей модели

## Научная организация

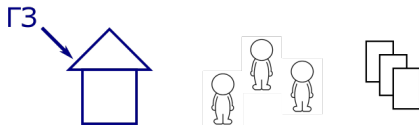
- Научная организация объединяет достаточно большие группы исследователей.
- Начальное распределение исследователей по организациям задается реальными данными.
- Ключевая задача организации – выполнение **Государственного задания (ГЗ)**.

- Часть сотрудников организации заняты преподавательской деятельностью → **приток молодых сотрудников** в организацию.

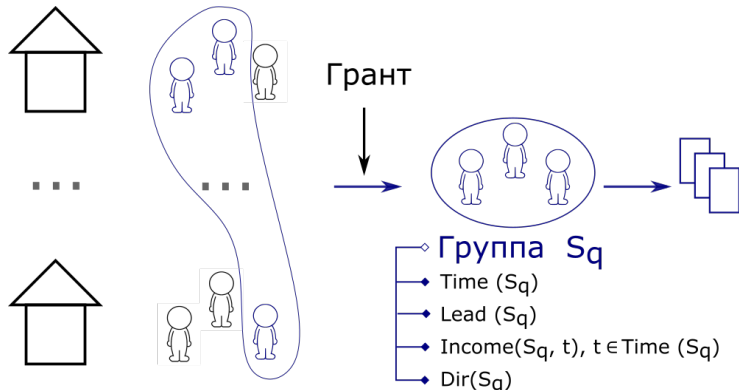


- Работа в одной организации – одна из причин **формирования новых связей** между сотрудниками.

- Организация обеспечивает возможность **ГЗ** решения исследователями **долгосрочных задач** и, соответственно, получение стабильного дохода.



- Группа исследователей – подмножество множества исследователей  
 $S_q \in \mathbb{I}, q = 1, 2, \dots$
- Группа формируется для выполнения некоторого краткосрочного гранта.



Каждый появляющийся в системе грант  $G_f$ ,  $f = 1, 2, \dots$  характеризуется набором атрибутов (аналогичных требованиям реальных грантов РФФИ и РНФ):

- длительность гранта,
- финансирование – сумма выплат в каждый момент времени,
- допустимое число участников,
- требования к руководителю (возраст, результативность),
- требования к участникам (возраст, результативность),
- набор релевантных направлений исследований,
- требования к результатам по гранту.

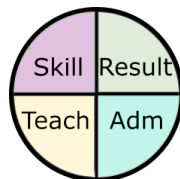
# Характеристики агента «Исследователь»

## Распределение времени

Пусть  $Gr_{i,t} = \{q : i \in S_q, t \in \text{Time}(S_q)\}$  – множество активных коллективов (групп и организаций), в которых агент  $i$  состоял в любом качестве момент времени  $t$ .

Агент  $i$  распределяет свое время между

- работой в активных коллективах  $q \in Gr_{i,t}$  (по направлениям  $j \in \mathbb{J}$ ), направленной на подготовку научно-технических результатов:  $z_{i,q,t}^{j,k,\text{Result}}$ , где  $k \in \{\text{Res}, \text{Dev}\}$ ;
- преподавании в организациях  $p \in Org_{i,t}$  (по направлениям  $j \in \mathbb{J}$ ):  $z_{i,q,t}^{j,k,\text{Teach}}$ , где  $k \in \{\text{Res}, \text{Dev}\}$ ;
- саморазвитием (по направлениям  $j \in \mathbb{J}$ ):  $z_{i,t}^{j,k,\text{Skill}}$ ;
- административной работой в активных группах  $q \in Gr_{i,t}$ :  $z_{i,q,t}^{\text{Adm}}$



$$\sum_{j,k,q \in Gr_{i,t}} z_{i,q,t}^{j,k,\text{Result}} + \sum_{j,k,q \in Gr_{i,t}} z_{i,q,t}^{j,k,\text{Teach}} + \sum_{j,k} z_{i,t}^{j,k,\text{Skill}} + \sum_{j,k,q \in Gr_{i,t}} z_{i,q,t}^{\text{Adm}} \leq z_i,$$

где  $z_i$  – максимальный запас времени агента  $i$ .

Накладываются следующие ограничения на распределение времени.

- Каждый агент характеризуется минимальной долей  $\alpha_i^{\text{Skill}} \in [0, 1]$  свободного времени, которую он тратит на повышение своей квалификации.

Время, направленное на рост квалификации, распределяется между отраслями, в которых агент имеет ненулевую квалификацию, при этом для отраслей, по которым агент в данный момент времени  $t$  имеет гранты, времени тратится в  $k_{gr}$  раз больше, чем на остальные, где  $k_{gr}$  – параметр модели.

- На административную деятельность агент тратит не более некоторой доли  $\alpha_i^{\text{Adm}}$  своего времени.
- В коллективах, отвечающих научным организациям, фиксируются ставки преподавателей. Для преподавателей величина  $z_{i,q,t}^{j,k,\text{Teach}}$  фиксируется на некотором уровне (параметр модели). В текущей версии модели преподаванием в институтах занимаются люди с достаточно высокой научной квалификацией и аспиранты, являющиеся ассистентами первых.

Каждый агент  $i$  характеризуется тремя типами квалификации:

- **научная квалификация** – характеристика способности агента к получению научно-технических результатов

$$y_{i,t}^{j,k} (j - \text{направление}, k \in \{\text{Res}, \text{Dev}\})$$

Научная квалификация агента зависит от:

- интенсивности саморазвития,
- "включенности" в работу сильных коллективов.
- **административная квалификация** – характеристика способности агента к организации эффективной работы коллектива

$$y_{i,t}^{\text{Adm}}$$

Административная квалификация агента зависит от опыта участия и руководства коллективами.

- **преподавательская квалификация** – характеристика способности агента к передаче знаний и привлечению интереса студентов

$$y_{i,t}^{\text{Teach}}$$

Преподавательская квалификация определяется интенсивностью преподавательской деятельности и саморазвития.

$$\begin{aligned}
 y_{i,t}^{j,k} = & \underbrace{(1 - \delta^{j,k}) y_{i,t-1}^{j,k}}_{\text{естественная потеря квалификации}} + \\
 & \underbrace{Y^S \sum_{u \in \mathbb{J}, r \in \{\text{Res}, \text{Dev}\}} A_{u,r}^{j,k} (z_{i,t}^{u,r, \text{Skill}} + Y^{ST} \sum_{q \in \text{Gr}_{i,t}} z_{i,q}^{u,r, \text{Teach}})}_{\text{рост благодаря саморазвитию и преподаванию}} + \\
 & \underbrace{yy(\text{Age}_{i,t}) \left( 1 + Y^Y \sum_{ii \in \text{Con}_{i,t-1}^p} y_{ii,t-1}^{j,k} \right)}_{\text{влияние окружения}}
 \end{aligned}$$

- $\delta^{j,k}$  – темп устаревания квалификации в соответствующем научном направлении,
- $A_{u,r}^{j,k}$  – компоненты матрицы, характеризующей интенсивность связей между научными направлениями,
- $yy(\text{Age}_{i,t})$  – характеризует ослабление с возрастом интенсивности роста квалификации от соседей по графу связей. Принята равной 2 при  $\text{Age}_{i,t} < 35$  и 1 иначе.
- $Y^S, Y^{ST}, Y^Y$  – параметры модели.



$$\begin{aligned}
 y_{i,t}^{\text{Adm}} = & \underbrace{(1 - \delta^{\text{Adm}})y_{i,t-1}^{\text{Adm}}}_{\text{естественная потеря квалификации}} + \\
 & \underbrace{Y_1^A \sum_{q \in LG_{i,t-1}} Res_{S_q,t-1}}_{\text{влияние результатов работы групп, возглавляемых } i} + \\
 & \underbrace{Y_2^A \sum_{q \in Gr_{i,t-1}} Res_{S_q,t-1}}_{\text{влияние результатов работы групп с участием } i}
 \end{aligned}$$

- $\delta^{\text{Adm}}$  – темп устаревания административной квалификации,
- $Y_1^A, Y_2^A$  – параметры модели.

$$y_{i,t}^{\text{Teach}} = \underbrace{(1 - \delta^{\text{Teach}}) y_{i,t-1}^{\text{Teach}}}_{\text{естественная потеря квалификации}} + \underbrace{Y^T \sum_{u \in \mathbb{J}, r \in \{\text{Res}, \text{Dev}\}} \left( Y^{TS} z_{i,t}^{u,r,\text{Skill}} + \sum_{q \in Gr_{i,t}} z_{i,q,t}^{u,r,\text{Teach}} \right)}_{\text{рост благодаря саморазвитию и преподаванию}}$$

- $\delta^{\text{Teach}}$  – темп устаревания преподавательской квалификации,
- $Y^T, Y^{TS}$  – параметры модели.

- Научно-технические результаты рождаются в коллективах
- Результативность коллектива  $S_q$  определяется соотношением

$$Res_{S_q,t} = R \underbrace{y_{Lead(S_q),t}^{Adm} \cdot z_{Lead(S_q),t}^{Adm}}_{\text{влияние административной квалификации руководителя}} \times \underbrace{\left( \sum_{i \in S_q, (u,r) \in Dir(S_q)} y_{i,t}^{u,r} z_{i,t}^{u,r,Report} \right)}_{\text{влияние квалификации и трудозатрат членов группы}}$$

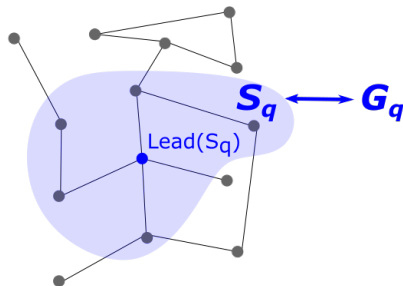
- Результативность агента  $i$  зависит от интенсивности его работы в каждом из коллективов (организациях и группах)

$$Res_{i,t}^{j,k} = \sum_{q \in Gr_{i,t}} A_{i,t,S_q}^{j,k} Res_{S_q,t}^{j,k}$$

$$A_{i,t,S_q}^{j,k} = \frac{y_{i,t}^{j,k} z_{i,t}^{j,k,Report}}{\sum_{ii \in S_q} y_{ii,t}^{j,k} z_{ii,t}^{j,k,Report}}$$

# Формирование научных групп

- В начале каждого периода появляется список новых грантов.
- Каждый грант инициирует формирование группы.
- Коллектив создаваемой группы должен удовлетворять
  - требованиям к количеству участников, их возрасту и количеству полученных ими на данный момент результатов,
  - иметь достаточный для получения требуемых результатов объем свободного времени и квалификации участников.
- Потенциальные руководители ранжируют гранты по убыванию объема.
- В группу могут входить только участники, достаточно близко расположенные в графе взаимодействий агентов.
- Граф связей восстанавливается из реальных данных, во-первых, по факту соавторства, во-вторых, по факту работы в одной организации.



- 1 Исследователи ранжируются по убыванию административной квалификации.
- 2 Каждый исследователь  $i_{st}$  с вероятностью  $React_{i_{st},t}$  начинает формирование группы. Если формирование группы запускается, то из ранжированного списка грантов исследователь выбирает грант наибольшего объема, требованиям к руководителю по условиям которого он удовлетворяет (в том числе у него есть достаточный запас свободного времени на дополнительную административную нагрузку).

- 3 Если исследователь удовлетворяет условиям, наложенным в гранте на руководителя, он рассылает предложения другим исследователям, с которым связан в графе (и, технически, самому себе).
- Себе руководитель назначает уровень административной нагрузки (фиксированной условиями гранта)  $z_{i,q,t}^{\text{Adm}} = \text{Lead}_{adm} \rightarrow$  фиксирует  $y_{\text{Lead}(S_q),t}^{\text{Adm}} z_{\text{Lead}(S_q),q,t}^{\text{Adm}}$ .
  - Для успешного выполнения гранта необходимо собрать коллектив, который способен достичь требуемого уровня научно-технических результатов. То есть такой, что

$$\sum_{i \in S_q, (j,k) \in \text{Dir}(S_q)} y_{i,t}^{j,k} z_{i,q,t}^{j,k, \text{Report}} \geq \frac{\text{Res}_{S_q,t}}{y_{\text{Lead}(S_q),t}^{\text{Adm}} z_{\text{Lead}(S_q),q,t}^{\text{Adm}}}$$

- 4 Потенциальный руководитель гранта ранжирует своих соседей по графу связей (в том числе самого себя), которые удовлетворяют условиям гранта на исполнителей, по уровню научных квалификаций в направлениях, релевантных для гранта  $Dir_q$ .

- $Res_{S_q,t}^S = \frac{Res_{S_q,t}}{y_{Lead(S_q),t}^{Adm} z_{Lead(S_q),q,t}^{Adm}}$
- Под максимально возможной интенсивностью работы участника  $i$   $Int_{i,q,t}^{max}$  будем понимать произведение его наибольшей из релевантных научных квалификаций и имеющегося объема свободного времени.
- Если для первых  $N_{min}$  участников сумма  $\sum_i Int_{i,q,t}^{max} \geq Res_{S_q,t}^S$ , то группа считается сформированной, а  $z_{i,q,t}^{j*,k*} = \frac{Res_{S_q,t}^S}{\sum_i Int_{i,q,t}^{max}} z_{i,t}^{free}$ .
- В противном случае участники продолжают добавляться до тех пор, пока не будет выполнено требование по результативности или количество участников не превысит  $N_{max}$ .
- Если для первых  $N_{max}$  участников  $n$  группу с данным руководителем для данного гранта сформировать нельзя.

- 5 Для упрощения модельных вычислений предполагается, что, получив предложение по нагрузке, исполнитель проекта всегда соглашается на него. Такое упрощение оправдано, поскольку это предложение поступает в некотором смысле от «лучшего» из возможных руководителя.
- 6 Если группу, удовлетворяющую условиям гранта, удалось сформировать, в ее рамках определяется финансирование научной деятельности всех участников, пропорциональное их вкладу в общий результат (аналогично вектору Шепли), плюс некоторый безусловный уровень.
- 7 По истечении модельного года возможны изменения в структуре групп. Если срок действия гранта завершается, группа прекращает свое существование.



- Появление в модели новых исследователей есть результат преподавательской деятельности существующих исследователей.
- Вероятность  $Enter_{i,q,t}$  того что в результате преподавания исследователя  $i$  в организации  $q$  появится новый исследователь зависит от  $y_{i,t}^{Teach}$  и  $z_{i,q,t}^{j,k,Teach}$ .
- Набор научных квалификаций нового агента пропорционален набору научных квалификаций преподавателя, релевантных направлениям группы  $q$ .

Вероятность ухода агента из научной деятельности  $Exit_{i,t}$  есть функция от его доходов и от возраста

$$P_{i,t}^{poor} = P_1^E \mathbb{I}(Inc_{i,t} < Poor_{i,t})$$

$$P_{i,t}^{age^1} = P_2^E \mathbb{I}(Age^1 \leq Age_{i,t} < Age^2)$$

$$P_{i,t}^{age^2} = P_3^E \mathbb{I}(Age_{i,t} \geq Age^2)$$

$$Exit_{i,t} = P_{i,t}^{poor} + (1 - P_{i,t}^{poor})(P_{i,t}^{age^1} + P_{i,t}^{age^2})$$

где  $P_1^E$ ,  $P_2^E$ ,  $P_3^E$ ,  $Age^1$ ,  $Age^2$  – настроечные параметры,  $Poor_{i,t}$  – порог бедности агента  $i$  в момент времени  $t$ .

- 1 Обновление возрастов исследователей.
- 2 Появление новых агентов «Исследователь».
- 3 Обновление графа связей.
- 4 Расчет результативности научных групп.
- 5 Расчет результативности исследователей.
- 6 Появление новых грантов, определение списка активных грантов и грантов, требующих пополнения.
- 7 Обновление научных и административных квалификаций агентов.
- 8 Обновление значений  $React_{i,t}$ .
- 9 Набор участников в гранты, требующие пополнения, и новые гранты.
- 10 Распределение грантов.
- 11 Расчет доходов исследователей.
- 12 Определение выбывших агентов.

- Область – физика.
- Инициализация научных квалификаций исследователей – суммарная результативность по данным WoS за 2012 – 2018 гг.
- Инициализация результативности исследователей – нормированная средняя результативность по данным WoS за 2012 – 2018 гг.
- Инициализация графа связей производится по графу соавторства WoS.
- Принадлежность к организациям и возраст исследователей – база данных «Зеркало» (ФИАН).
- Для ускорения расчетов производилась процедура сэмплирования исходных данных с целью уменьшения исходной выборки агентов.

- Результативность исследователей измеряется в комплексных баллах публикационной результативности
- Результативность  $R$  исследователя за год рассчитывается по формуле

$$R = \sum_{p=1}^P \frac{K_p}{N_p},$$

где  $P$  – число статей исследователя, опубликованных в данном году,  $K_p$  – коэффициент качества журнала, в котором опубликована статья  $p$ ,  $N_p$  – число авторов статьи  $p$ .

Q1	Q2	Q3	Q4	Q	S	R	V	B
19.7	7.3	2.7	1	1	1	0.75	0.5	1

Q1-Q4 - журналы индексируемые Web of Science (WoS),

Q - без квантиля из Web of Science Core Collection (WoSCC),

S - индексируемые в Scopus, но не в WoS и WoSCC,

R - индексируемые в RSCI WoS, но не в WoSCC,

V - входящие в список ВАК,

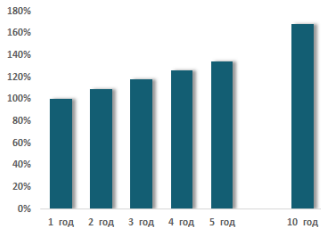
B - зарегистрированные в Российской книжной палате.

# Результаты

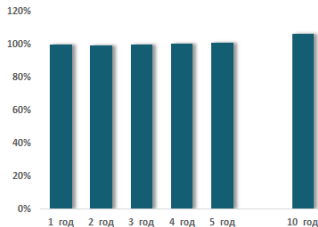
## Базовый сценарий А

- Стабильно развивающаяся научная область
- Постоянная численность сотрудников
- Высокий интерес молодежи
- Текущее финансирование области:  
 $\approx 2/3$  ГЗ +  $1/3$  гранты

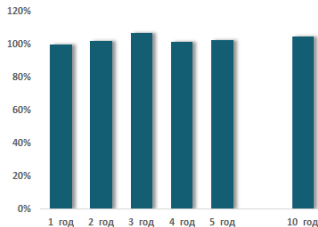
Средняя квалификация



Численность научных сотрудников

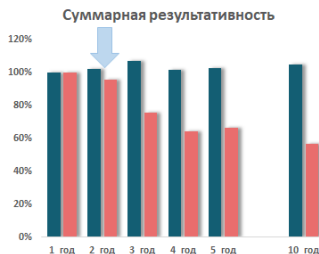
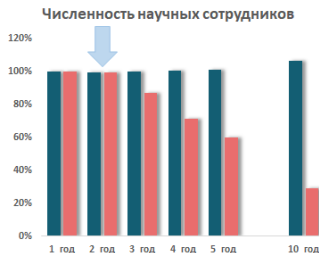


Суммарная результативность



# Результаты Сценарий А1

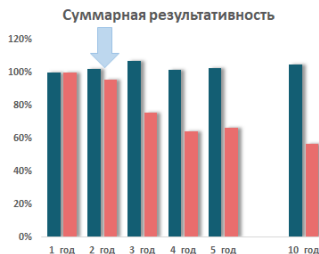
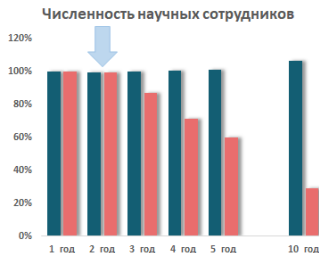
- Отказ от финансирования организаций → 100 % грантовое финансирование
- Разовое вливание +50% бюджета
- Резкий рост требований в момент увеличения бюджета



■ Базовый сценарий А

■ Сценарий А1

- Снижение качества результатов ввиду высокой нагрузки на высококвалифицированных сотрудников
- Уход из области менее квалифицированных сотрудников в связи с отсутствием финансирования



■ Базовый сценарий А

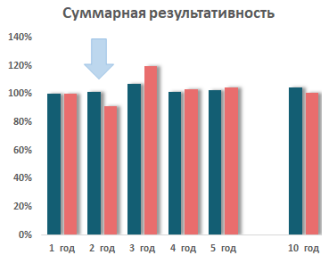
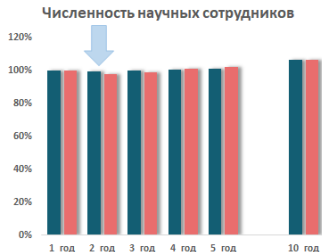
■ Сценарий А1



# Результаты

## Сценарий А2

- Сохранение финансирования организаций ( $\approx 2/3$  ГЗ +  $1/3$  гранты )
- Разовое вливание +50% бюджета
- Резкий рост требований в момент увеличения бюджета



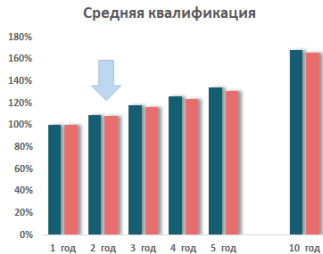
■ Базовый сценарий А

■ Сценарий А2

# Результаты

## Сценарий А2

- Финансирование организаций обеспечивает среду, необходимую для генерации знания и сохранения устойчивого развития области.
- Краткосрочное воздействие → краткосрочный эффект.



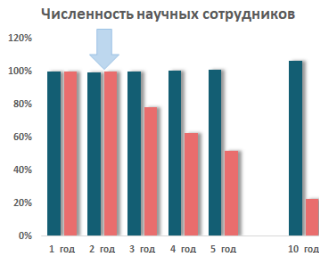
■ Базовый сценарий А

■ Сценарий А2

# Результаты

## Сценарий А3

- Отказ от финансирования организаций → 100 % грантовое финансирование
- Разовое сокращение бюджета на 50%
- Снижение требований в момент уменьшения бюджета



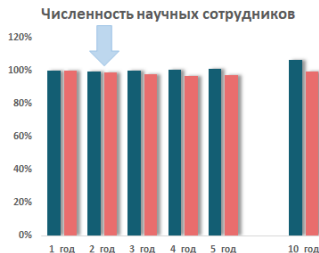
■ Базовый сценарий А

■ Сценарий А3

# Результаты

## Сценарий А4

- Сохранение финансирования организаций ( $\approx 2/3$  ГЗ +  $1/3$  гранты )
- Разовое сокращение бюджета на 50%
- Уменьшение требований в момент сокращения бюджета

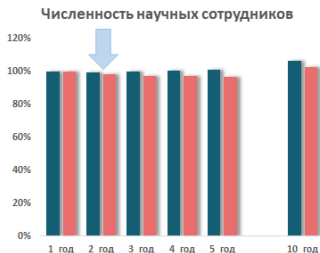


■ Базовый сценарий А

■ Сценарий М

# Результаты Сценарий А5

- Переход к финансированию 1/3 ГЗ + 2/3 гранты
- Повышение результативности ценой снижения темпов роста квалификации.



■ Базовый сценарий А

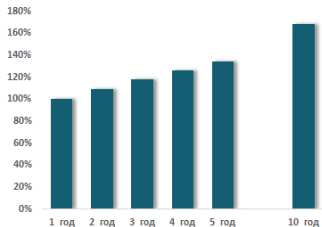
■ Сценарий А5

# Результаты

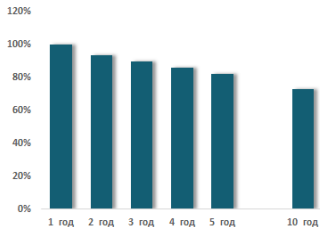
## Базовый сценарий Б

- Традиционная научная область
- Молодежь более склонна к уходу из области, чем старшее поколение
- Текущее финансирование области:  
 $\approx 2/3$  ГЗ +  $1/3$  гранты

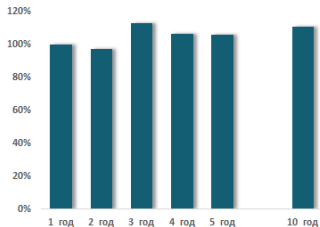
Средняя квалификация



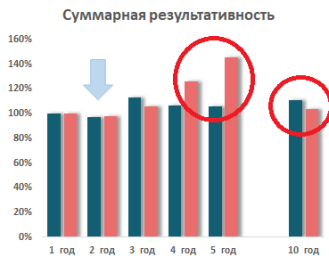
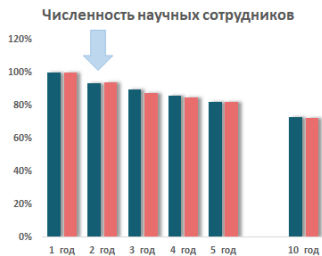
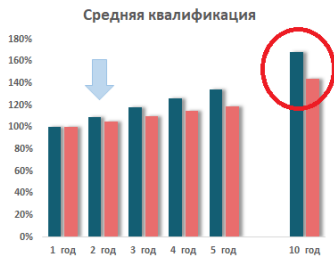
Численность научных сотрудников



Суммарная результативность



- Переход к финансированию 1/3 ГЗ + 2/3 гранты



■ Базовый сценарий Б

- Гос. задание – механизм, обеспечивающий возможность устойчивого долгосрочного развития научной области
- Грантовая форма финансирования формирует конкурентную среду в области в краткосрочной перспективе



Спасибо за внимание!