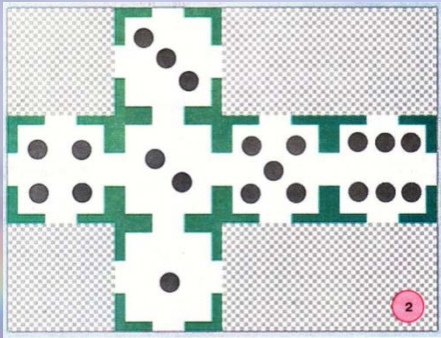


ДЕВИАНТНОСТЬ РОЛИ ВРЕДНЫХ ОРГАНИЗМОВ В АГРОБИОЦЕНОЗАХ С УЧЁТОМ РИСКОВ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ КЛИМАТИЧЕСКОЙ НОРМЫ



*Памяти Джона Нэша (США), Нобелевского лауреата, автора
математической Теории игр, трагически погибшего вместе с женой в июне
2015 г.*

ПЕРЕВЕРТИН
Кирилл Александрович

Центр паразитологии Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва

Предлагаемый метод оптимизации агрономического решения с помощью **Теории игр** рассматривает в качестве игроков **Агронома** и **Природу**.

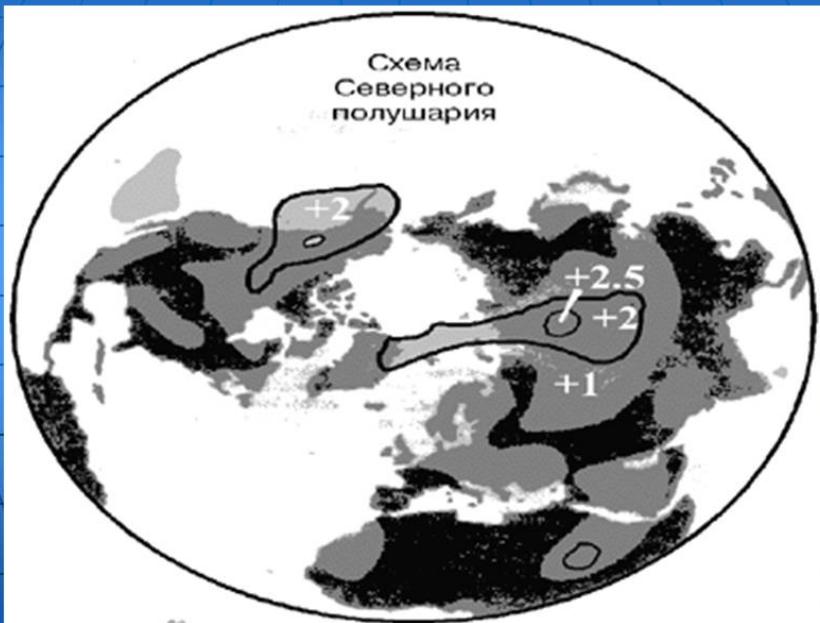
Формализованная платёжная матрица легко сводится к ЛП-задаче. Решение в области смешанных стратегий позволяет оптимизировать учёт климатических рисков на гарантированном уровне **Цены игры (V)** и даже выше с учётом незлонамеренности **Природы**, как игрока.



Полемика относительно объективности (достоверности) глобальных климатических изменений в последнее время не представляется продуктивной в отрыве от аграрных практик и в первую очередь – земледелия, где климатические риски имеют действительно критический характер. Речь идёт не только об «условно-приемлемых» отклонениях от климатической нормы, приводящих к недобору урожая на уровне десятков процентов.



Карта глобального потепления



В последние десятилетия наблюдается частотное повышение рекордных отклонений (катастроф) иногда приводящих к почти полной гибели урожайной продукции и (или) неприемлемому снижению её качества. Кроме прямых факторов, влияющих на урожай – засухи, осадки в неблагоприятный период, заморозки и т.д., климатические условия определяют «аномалии» в развитии вредителей и болезней сельхозкультур – от катастрофических всплеск численности (плотности популяций) до расширения ареала.

Климатически обусловленные процессы трансформации систем хозяйинно-паразитных отношений в агробиоценозе предлагается характеризовать тремя типами – качественные, количественные, интродукционные. Другими словами, существующие тенденции климатических изменений определяют следующие процессы:

1. АКТИВИЗАЦИЯ ПРИСУТСТВУЮЩИХ В ЦЕНОЗЕ ВРЕДНЫХ ОРГАНИЗМОВ.

Изменения климата приводят к изменениям в структуре экосистем, в том числе и агробиоценозов. Иногда, например, в популяциях почвенных нематод наблюдается переход из рецедентов в субдоминанты, а то и доминирующие вредные организмы. А.А. Шестенёров указывает, что ранее хозяйственно-незначимые (фоновая вредоносность) фитогельминты рода *Helicotylenchus* при благоприятных климатических условиях, обеспечивающих урожайность зерновых свыше 40 ц/га становятся серьёзнейшей проблемой. Свекловичная цистообразующая нематода, ранее развивавшаяся в условиях региона Воронеж-Белгород в трёх генерациях (иногда регистрировалась редуцированная неполная 4-я генерация) теперь даёт 4 полноценные генерации, что быстро приводит к явлению «свеклоутомления почв» (*Zuckerrubenmüdigkeit*).

2. РАСШИРЕНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ АРЕАЛОВ ВРЕДНЫХ ОРГАНИЗМОВ.

Наряду с участвовавшими миграционными «вспышками» расселения факультативных паразитов (азиатская саранча), наблюдается устойчивая тенденция к базовому расширению ареалов вредных организмов. Математическое моделирование показывает по ряду сценариев неизбежность стремительного расширения ареалов от юга к северу России.

3. АККЛИМАТИЗАЦИОННАЯ ПРИЕМЛЕМОСТЬ ИНТРОДУКЦИИ НОВЫХ КАРАНТИННЫХ ВРЕДНЫХ ОРГАНИЗМОВ.

Климатические изменения предполагают возможность заноса, акклиматизации и необратимого расселения на территории РФ целого ряда вредных организмов, ранее не представлявших опасности.

Впервые нами предлагается метод учёта климатических рисков, где (внешне парадоксально) собственно метеопрогнозирование объявляется вторичным (а в граничных условиях — даже необязательным). В качестве вероятностных входных переменных модели оптимизации агрономических решений недостоверные (условно) метеопрогнозы первично замещаются множеством (вполне достоверных) оценок метеорологически-детерминированных исходов игры (строго в рамках математической Теории игр) в формате *AvsП* (Агроном против «капризов» Природы).

Вопрос – **если метод эффективен, то почему он не был востребован и внедрён ранее**, имеет простой ответ:

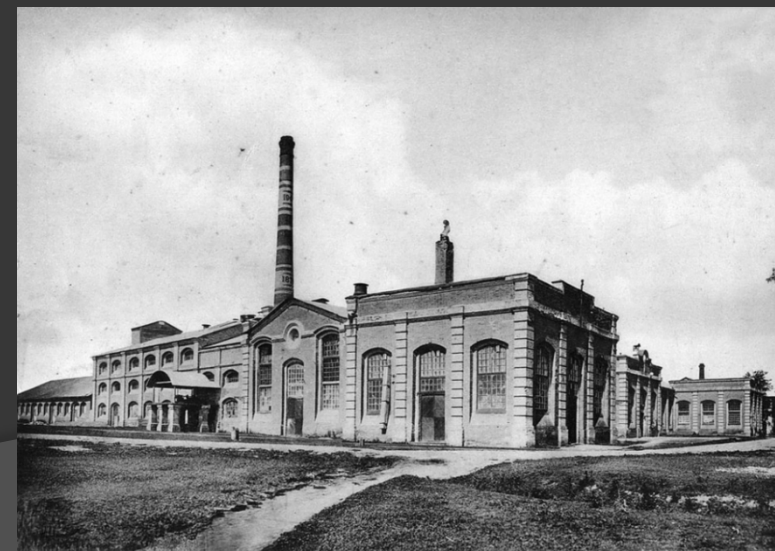
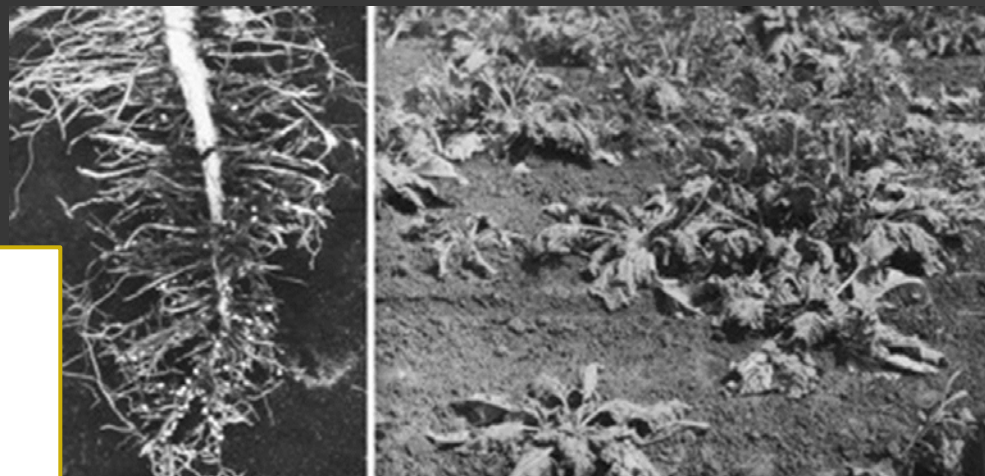
- во-первых, не было (регионально-доступных) компьютеров соответствующей мощности;
- во-вторых, повторим, внедрённые в последние десятилетия агротехнологии, скрупулёзно прописанные до технологических карт не имеют «запаса прочности» на фоне «рекордных» климатических рисков.

Впрочем, за тысячелетия практики земледелия имеется достаточно даже документальных свидетельств интуитивного применения передовыми аграриями предлагаемого метода: «рисковать» на части посевных площадей (сроками сева, глубиной заделки семян и т.д.), справедливо полагая климат изменчивым.

Тенденция последних лет для **ЕВРАЗЭС** – отказ от привозного (тростникового) сырья с расширением клина свёклы в отечественных регионах неизбежно заставит вспомнить о проблеме свекловичной нематоды.

Этот микроскопический червь – причина кризисов свекловодства, которые можно рассматривать, как региональные экологические катастрофы.

Насыщение севооборотов свёклой свыше 25%, а то и монокультурное возделывание после эйфории коммерческого успеха обязательно сталкивается с проблемой свеклоутомления почв (*Rübenmudigkeit*). Урожайность «необъяснимо» падает, не реагируя на супердозы удобрений, в засушливый год стремится к нулю, сахарные заводы закрываются... Так было в Германии (60-е годы XIX века), на Украине перед мировыми войнами и в 70-х, 90-х, в регионе «Южный Казахстан-Киргизия» в 80-х.



Именно агротехническим методам суждено сыграть партию первой скрипки в предстоящих битвах с нематодой.

Оставляя за скобками **стратегическую** фундаментальность севооборотов, хотелось бы в рамках данной работы обратиться к оптимизации такого интереснейшего **тактического** приёма на заражённых площадях, как **ранний посев**.

Остроумно эксплуатируется небольшая, но разница в нижних температурных порогах развития паразита и растения-хозяина (12 и 8^{оо}, соответственно). При оптимально низкотемпературной затяжной весне растения успевают миновать самые уязвимые ранние фенофазы (окрепнуть) ещё до агрессии спящего (пока) инвазионного начала.

Но здесь решающую роль играют **климатические риски**, ибо вполне вероятные **заморозки** способны погубить молодые ростки, что при массовом выпаде чревато даже **пересевом**. Зато, если заморозков не случилось, **выход урожая** может даже **двукратно превышать** варианты с **безрисковым** поздним посевом



Оптимизация агрономического решения возможна с помощью **Теории игр**,
где **Агроном** и **Природа** рассматриваются, как **Игроки**¹.

Простым, но важнейшим принципом является не временная реализация долевого выражения смешанной стратегии **Агронома**, а одномоментное распределение долей стратегий в структуре посевных площадей.

Другими словами – если оптимальная смешанная стратегия для **Агронома** – 90% (стратегия X_1) на 10%(стратегия X_2), это не означает, что стратегию X_2 необходимо случайным образом использовать раз в 10 лет, ведь достаточно на 90% сельхозугодий применять стратегию X_1 , а на 10% - стратегию X_2 .



¹(автономность данной задачи отнюдь не ставит под сомнение важность и достоверность существующей системы прогнозов погоды;)

В платёжную матрицу 2×2 теории игр (Таблица 1) сведены нормированные по единице исходы игры между **А** (агроном) и **П** (природа) по 2 стратегии у каждого игрока:

- ✓ **А** (X_1 -ранний посев, X_2 - поздний, безрисковый посев),
- ✓ **П** (Y_1 - заморозки, Y_2 - отсутствие заморозков).

Агроном	Стратегии	
	Природа	
	Заморозки	Отсутствие заморозков
Ранний посев, X_1	$a_{11}=0,7$	$a_{12}=1$
Поздний посев, X_2	$a_{21}=0,9$	$a_{22}=0,8$

Максимальный выигрыш V (А): $a_{12}=1$, максимальный проигрыш (как раз с затратами на пересев) - $a_{11}=0,7$.

Оптимальное решение лежит в области смешанных стратегий:

$$X_1 = \frac{a_{22} - a_{21}}{a_{22} + a_{11} - a_{21} - a_{12}} = \frac{0,8 - 0,9}{0,8 + 0,7 - 0,9 - 1} = 0,25$$

$$X_2 = \frac{a_{11} - a_{12}}{a_{22} + a_{11} - a_{21} - a_{12}} = \frac{0,7 - 1}{0,8 + 0,7 - 0,9 - 1} = 0,75$$

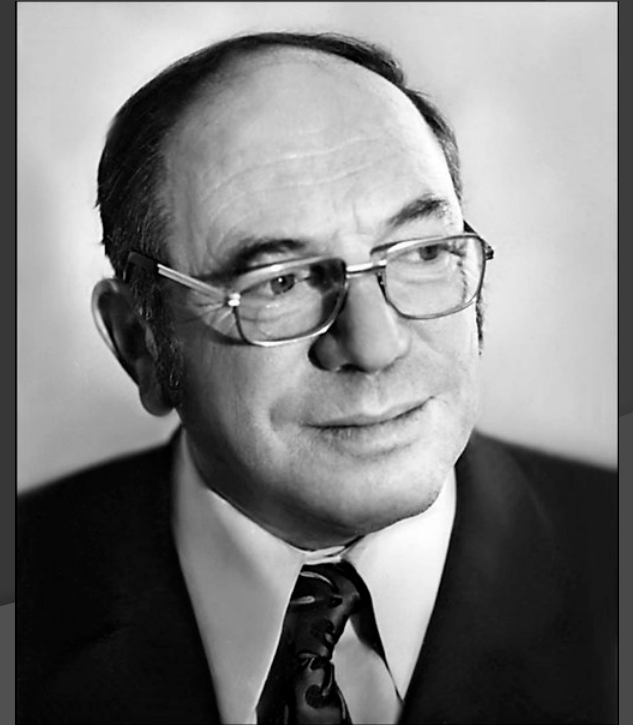
$$V = \frac{a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}}{a_{22} + a_{11} - a_{21} - a_{12}} = 0,85$$

Различие значений платёжной матрицы во второй строке - при позднем посеве ($a_{21}=0,9$; $a_{22}=0,8$) объясняется фенологией хозяйинно-паразитных отношений условно для «холодной» и «тёплой» весны.



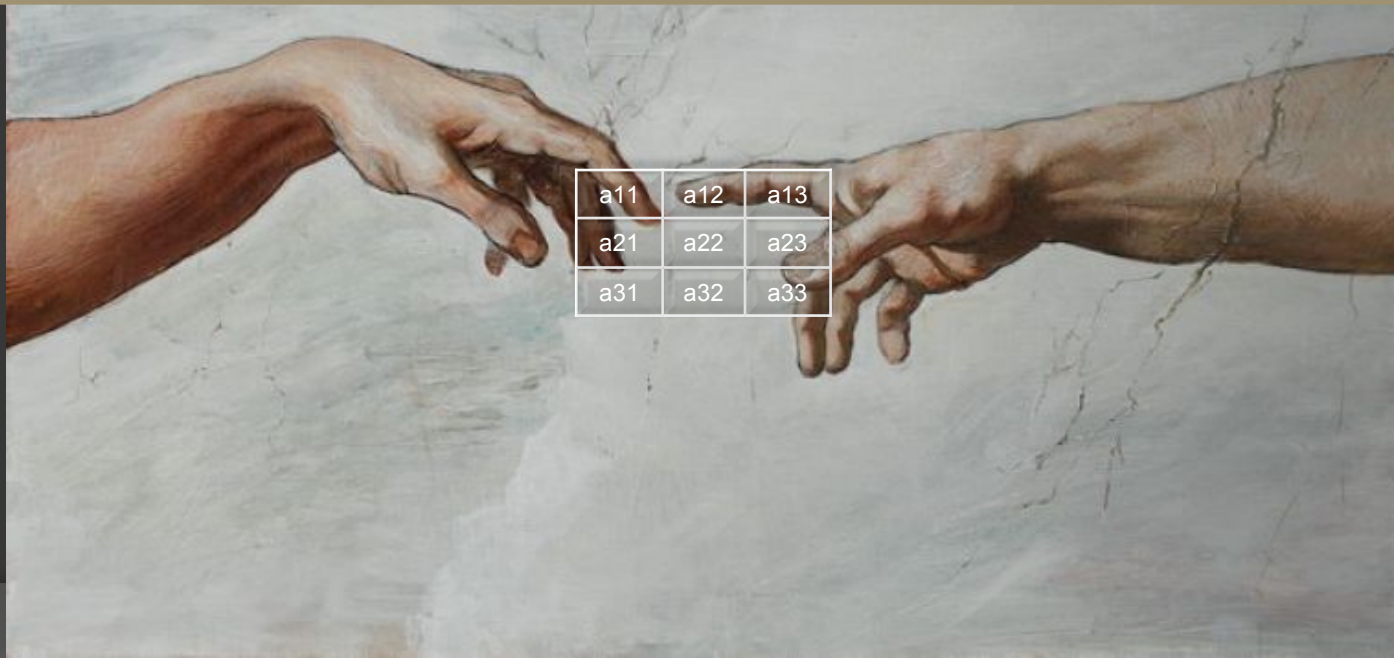
Полученное в данной задаче Решение ($X_1/X_2=1/4$) иногда называют равновесием по Нэшу, хотя равновесие было установлено до него, просто Д. Нэш впервые доказал, что в смешанных стратегиях равновесие всегда существует. Разумным игрокам выгодно сохранять это равновесие, т.к. любое изменение как минимум не улучшает их положения.

Решение для платёжной матрицы большей размерности не представляет принципиальной проблемы, так как задача теории игр (для двух игроков!) легко сводится к задаче линейного программирования. Строго говоря – это вообще одна задача (что, конечно же, не означает, что Д. Нэш и Л.В. Канторович получили свои нобелевские награды за одно и то же).



Таким образом, в рамках данной задачи, засевая 25% площадей рано, а 75% - поздно, **Агроном** гарантированно имеет цену игры 0,85, тогда как придерживаясь чистой безрисковой стратегии, он гарантированно получит лишь 0,8.

Замечательно, что последнее уравнение можно смело заменить на нестрогое неравенство, т.е. вместо «=» использовать « $\geq$ », так как **Природа** в роли игрока не будет злонамеренно придерживаться оптимальной стратегии, а поступит случайным образом.



Сведение задачи теории игр к задаче линейного программирования

Платёжная матрица:

$$A = \|a_{ij}\| \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

$p = (p_1, p_2, p_{\dots}, p_m)$ – стратегия 1-го игрока; $q = (q_1, q_2, q_{\dots}, q_n)$ – стратегия 2-го игрока

Задача ЛП относительно 1-го игрока

$$L(y) = \sum_{i=1}^m y_i \rightarrow \min \quad L(y) = \sum_{i=1}^m a_{ij} y_i \geq 1; \quad j = \overline{1, n} \quad i = \overline{1, m};$$

Пусть y^* - решение этой задачи,

L^* - оптимальное значение целевой функции

Тогда $P_i^* = \frac{y_i^*}{L^*}$ цена игры $V^* = \frac{1}{L^*}$

Аналогично составляется задача для 2-го игрока

Пример:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 4 \end{pmatrix}$$

Имеем относительно 1-го игрока:

$$L(y) > y_1 + 2y_2 \rightarrow \min$$

$$y_1 + 2y_2 \geq 1$$

$$2y_1 + 3y_2 \geq 1$$

$$3y_1 + 4y_2 \geq 1$$

Пусть

$$y^* = \left(0; \frac{1}{2}\right)$$

$$L^* = L(y^*) = \frac{1}{2}$$

Тогда

$$p_1^* = \frac{Y^*}{L^*} = \frac{0}{\frac{1}{2}} = 0;$$

$$p_2^* = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{2}} = 1$$

$$V^* = \frac{1}{L^*} = \frac{1}{\frac{1}{2}} = 2$$

Относительно 2-го игрока:

$$L(x) > x_1 + x_2 + x_3 \rightarrow \min$$

$$x_1 + 2x_2 + 4x_3 \leq 1$$

$$x_1 \geq 0 \quad x_2 \geq 0 \quad x_3 \geq 0$$

Или

$$X^* = \left(\frac{1}{2}; 0; 0\right); \quad L^* = L(x^*) = \frac{1}{2}$$

$$q_1^* = \frac{x_1^*}{L^*} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{2}} = 1$$

$$q_2^* = \frac{x_2^*}{L^*} = 0; \quad q_3^* = \frac{x_3^*}{L^*} = 0$$

$$V^* = \frac{1}{L^*} = \frac{1}{\frac{1}{2}} = 2$$

Сложность существующей ситуации с

климатическими рисками заключается в том, что:

- 1) существующие агротехнологии (неотъемлемой частью которых является защита растений), в том числе и такие прогрессивные, как АЛСЗ (адаптивно-ландшафтные системы земледелия) адаптированы для незначительных девиаций региональной климатической нормы и лишь косвенно и неэффективно учитывают климатические риски;



- 2) существующие модели климата для сельского хозяйства, к сожалению, во многих случаях имеют лишь ретроспективную адекватность.



Наши оценки возможности внедрения предлагаемого подхода не только для ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ, но и для более широкого круга агрономических задач, выявили в общем-то два «узких места»:



- 1) адекватность формализации стратегий А и П. Часто, как и в показанном примере приходится использовать качественные градации типа «сильный-средний-слабый»;
- 2) адекватность заполнения платёжной матрицы. В очень большом числе случаев элементы матрицы (исходы игры) не имеют статистически достоверного цифрового выражения и приходится полагаться на экспертные оценки.

Однако опытные агрономы десятилетиями работающие в конкретном агробиоценозе (хозяйстве) являются идеальными экспертами и вполне понимают задачу и важность оптимизации принимаемых ими рациональных агрономических решений

Спасибо за внимание!

*Нематода, она и в Африке
нематода...*

