

Системные модели в исследованиях энергетики

А.В.Кейко · ИНЭИ РАН

Объект, цель и метод энергетических исследований

Энергетика: в узком смысле – совокупность оборудования, применяемого для производства, преобразования и распределения энергии.

Энергетика: в широком смысле – отрасль народного хозяйства, служащая для получения, преобразования, распределения и использования энергии, и научная дисциплина.

Объект исследования: энергетика во всех смыслах.

Предмет исследования: технические, экономические, кибернетические (управленческие) и прочие аспекты функционирования и развития энергетики.

Цель исследования: управление развитием и функционированием энергетики.

Метод исследования: теория систем и системный анализ, включая физическое и численное моделирование энергетики в целом и ее подсистем.

Системное моделирование: построение и исследование численных моделей, описывающих энергетику и ее подсистемы как системы в терминах системного анализа.

Системные модели – инструмент прогнозирования в энергетике

Система и ее модель

Модель – упрощенное представление объекта, сохраняющее его свойства.

При моделировании отражение реального объекта претерпевает несколько необратимых преобразований. *На примере художника и живописи:*

Наблюдаемость – объект виден не со всех сторон и не во все моменты времени

Восприятие – наблюдатель замечает не все детали объекта, а только значимые для него с позиций его эмпирического и теоретического опыта (эмпиризм)

Понимание – наблюдатель тяготеет к описанию реальных форм объекта знакомыми ему формами (гештальт), например: яблоко – круглое (нет), Земля – твердая (нет)

Генерализация – разработчик сознательно игнорирует второстепенные детали объекта при описании существенных его свойств (мемы про «сферического коня в вакууме»)

Выразительные средства – наличие достаточно совершенного инструмента для описания выявленных существенных свойств объекта (инструментарий)

Квалификация – степень, в какой разработчик модели владеет имеющимися у него выразительными средствами (мемы про «гвозди микроскопом»)

Личное отношение разработчика – проявляется в выборе критериев и их относительных весов при многокритериальной оценке объекта (субъективность)

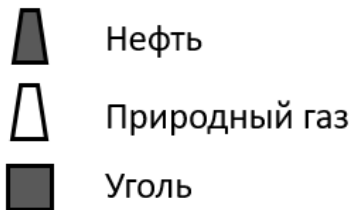
*Модель – всегда идеальна, обычно субъективна, иногда неверна.
Два разработчика не могут создать одинаковые модели.*



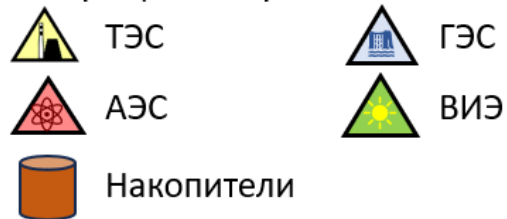
Энергетика как объект моделирования

Условные обозначения

Добыча ископаемых



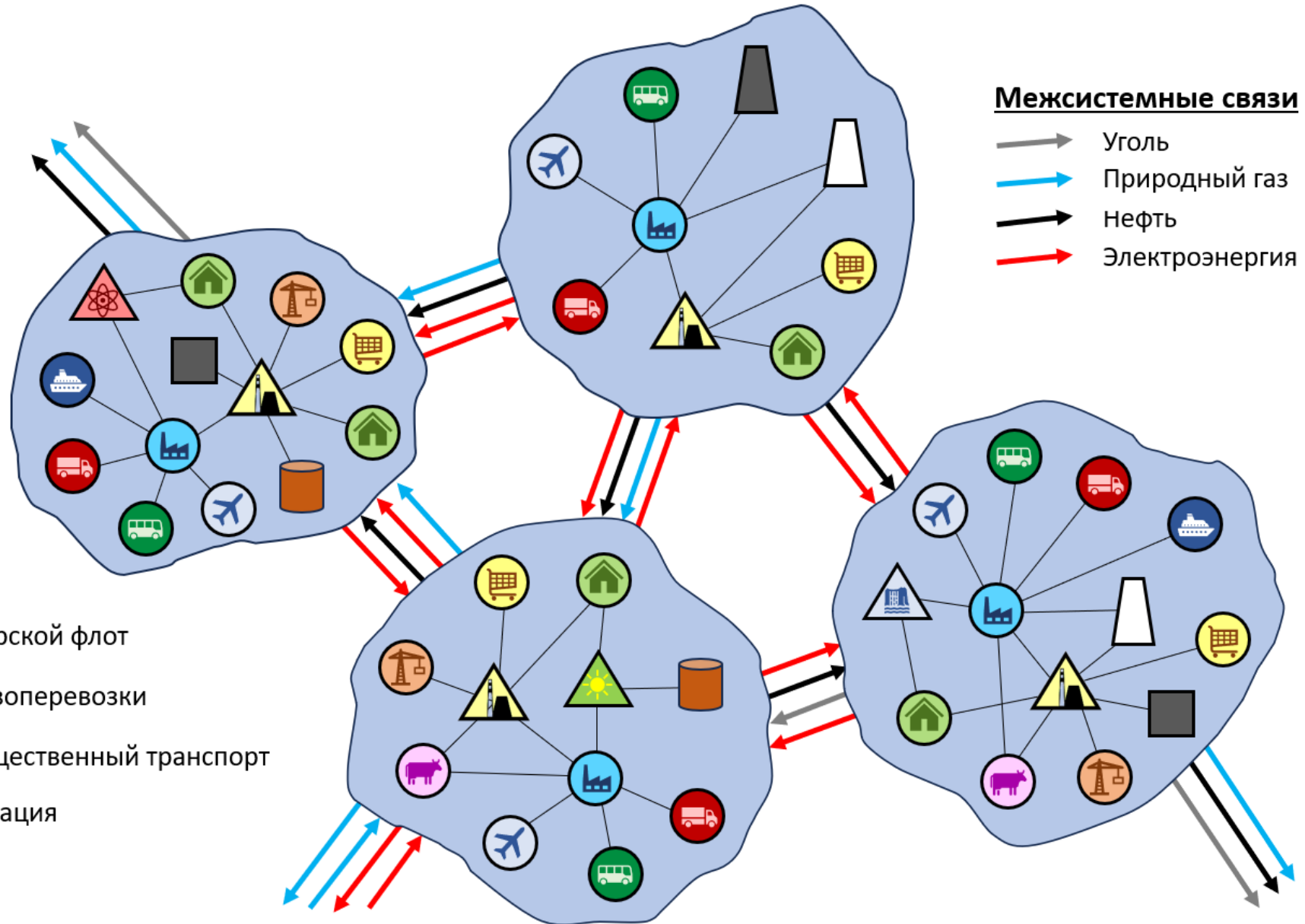
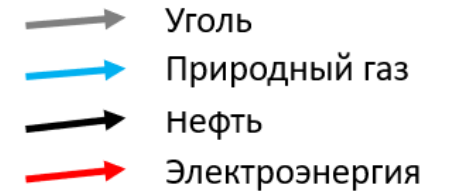
Генерация энергии



Потребление



Межсистемные связи



Классификация численных моделей энергетики

По структуре модельного домена

- Точечные
- Многоузловые
 - с заданными связями
 - с динамическими связями

По взаимодействию с окружением

- Закрытые (замкнутые)
- Открытые

По динамическим свойствам

- Статические
- Динамические

По свойству неопределенности

- Детерминированные
- Вероятностные
- Черный ящик

По математической природе

- Имитационные
 - Прямого счета
 - Регрессионные
 - Численные
- Оптимизационные
 - Линейные
 - Слабо нелинейные
 - Нелинейные
 - Выпуклые
 - Целочисленные и интервальные
 - Глобальной оптимизации
- Гибридные
- Искусственный интеллект

Искусственный интеллект

- Искусственные нейронные сети
 - по способу обучения
 - с учителем (тьютором)
 - без учителя
 - по топологии (связность, слои)
 - по модели сети
 - прямого распространения
 - рекуррентные
 - сети Кохонена
 - прочие
 - по настройке весовых коэф-тов
- Нечеткая логика и мягкие вычисления
- Экспертные системы
- Генетические алгоритмы
- Машинное обучение (Data mining)

Показаны только некоторые основные разновидности и классификации моделей

Оптимизационные модели энергетики (линейные)

Задача математического программирования

Найти:

$$\text{ext } F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij}$$

целевая функция на минимум затрат, максимум прибыли или аналогичная: x – установленная мощность, c – экономическая характеристика

$i = \overline{1, n}$ узлы энергосистемы

$j = \overline{1, m}$ технологии

при условиях:

$A\bar{x} = \bar{b}$ нагрузки

$D\bar{x} \leq \bar{g}$ ресурсы, капитал, труд, транспорт, экология и т.п.

$x_{ij} \geq 0, \forall i, j$

$\bar{c} \neq f(\bar{x})$ - условие линейности

Среди оптимизационных моделей энергетики 95% - линейные, 4% - слабо нелинейные, 0,9% - выпуклые, 0,1% - нелинейные (экспертно)

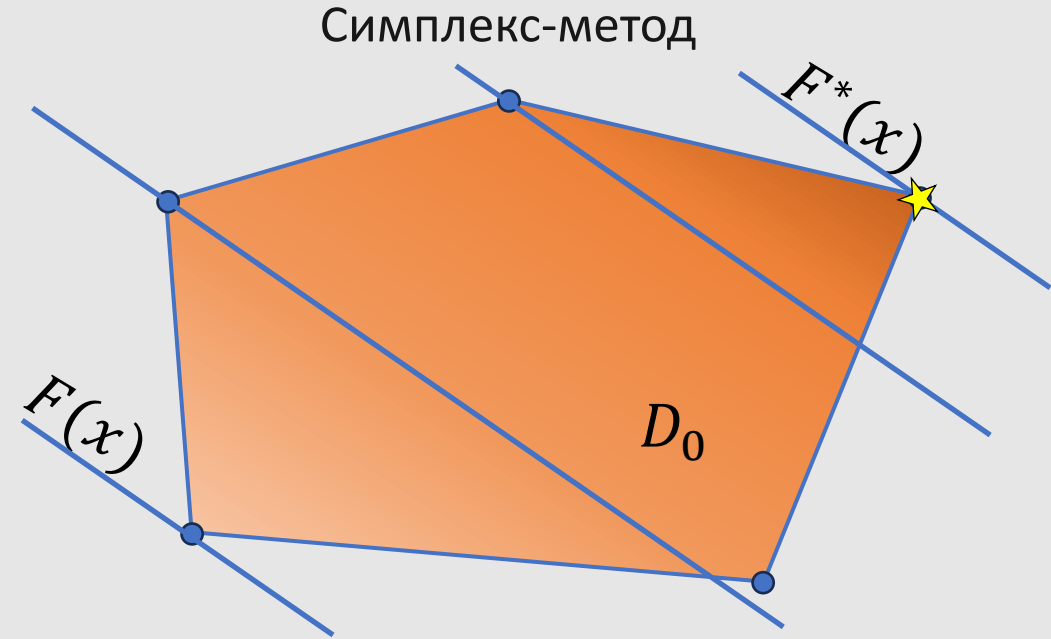
Методы решения линейных задач

Классический метод – симплекс-метод, альтернатива – метод внутренних точек и некоторые другие.

Оптимальное решение находится в крайней точке допустимой области. Часть переменных находятся в своих максимальных значениях, а часть равны нулю.

Число ненулевых значений в решении всегда меньше или равно числу линейно независимых уравнений. Поэтому (а) нет смысла стремиться к большему охвату технологий; и (б) линейные модели слабо подходят для сопоставления технологий.

Некоторые методы линейного программирования применимы для решения слабо нелинейных задач, например, метод обобщенного градиента, вариант которого (ОПГ) реализован в составе MS Excel.



Преимущества: метод легко реализовать.

Недостатки: чувствителен к жестким задачам, обладает экспоненциальной сложностью.

Разнообразие методов обусловлено низкой сходимостью в случае плохо обусловленных задач.

Методы решения линейных задач

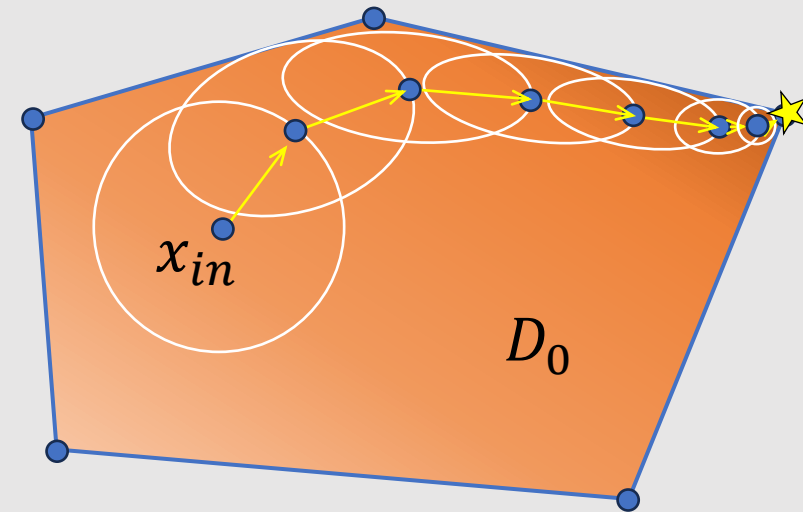
Классический метод – симплекс-метод, альтернатива – метод внутренних точек и некоторые другие.

Оптимальное решение находится в крайней точке допустимой области. Часть переменных находятся в своих максимальных значениях, а часть равны нулю.

Число ненулевых значений в решении всегда меньше или равно числу линейно независимых уравнений. Поэтому (а) нет смысла стремиться к большему охвату технологий; и (б) линейные модели слабо подходят для сопоставления технологий.

Некоторые методы линейного программирования применимы для решения слабо нелинейных задач, например, метод обобщенного градиента, вариант которого (ОПГ) реализован в составе MS Excel.

Метод внутренних точек



Преимущества: асимптотическая сложность (быстро работает на больших задачах), устойчив для разреженных матриц.

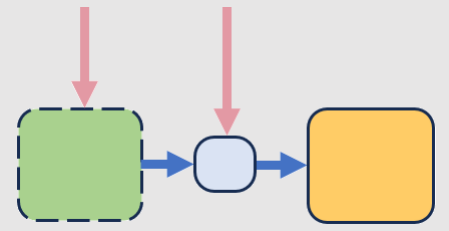
Недостатки: не достигает решения в вершинах, точку ввода иногда трудно найти.

Пользователи привыкли полагаться на платные решатели, такие как GAMS.

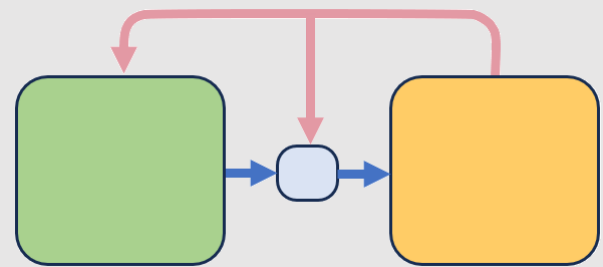
Разновидности оптимизационных моделей



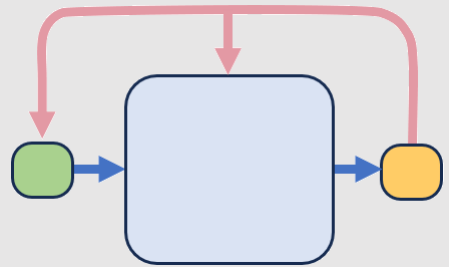
Модели энергоснабжения



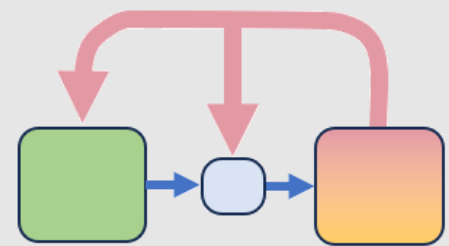
Модели ТЭК



Модели структуры технологий (СТМ)



Модели взаимосвязей энергетики и экономики



Модельно-информационные комплексы (МИК)

Модельно-информационный комплекс (МИК) – комплекс технико-экономических моделей, решателей и баз данных, объединенных на трех уровнях: (а) на уровне общей идеи; (б) на уровне общей информации; (в) на уровне программного интерфейса. Фактически – совокупность моделей (гибридная модель) и данных.

МИК учитывает: отрасли ТЭК, другие сектора национальной и мировой экономики, динамику мировых энергетических рынков, климатические изменения, поведение игроков на рынках топлива и энергии.

Назначение МИК - обоснование стратегических планов развития энергетики.

Статистика: В мире существует около 120 независимых МИК. Самых цитируемых и влиятельных – не более десятка. Почти каждая страна имеет собственный МИК. Лишь единичные МИК имеют открытый код.

Заказчики МИК – правительства стран, надгосударственные организации, крупные транснациональные компании

Разработчики МИК – ведущие мировые научные центры:

Нац. лаборатория Лоуренса в Беркли (LBNL), США – **NEMS** – описание энергетики мира в интересах США
Междунар. энергет. агентство (IEA), Париж – **MARKAL/TIMES**, **WEM** – исследования в интересах стран ОЭСР
Междунар. институт прикладного системного анализа (IIASA), Вена – **MESSAGE** – описание регионов и стран
Афинский нац. тех. университет, Греция – **PRIMES** ↔ **GEM-3** – разработка энергетической политики Евросоюза
Институт экономики энергетики (IER), Германия – **MESAP-III** – разработка политики в ряде азиатских стран
Институт инновационных технологий (RITE), Япония – **DNE21+** – описание энергетики мира в интересах Японии

В мировой экономике сейчас лидируют не те, кто располагает значительными ресурсами, а те, кто умеет грамотно распорядиться имеющимися.

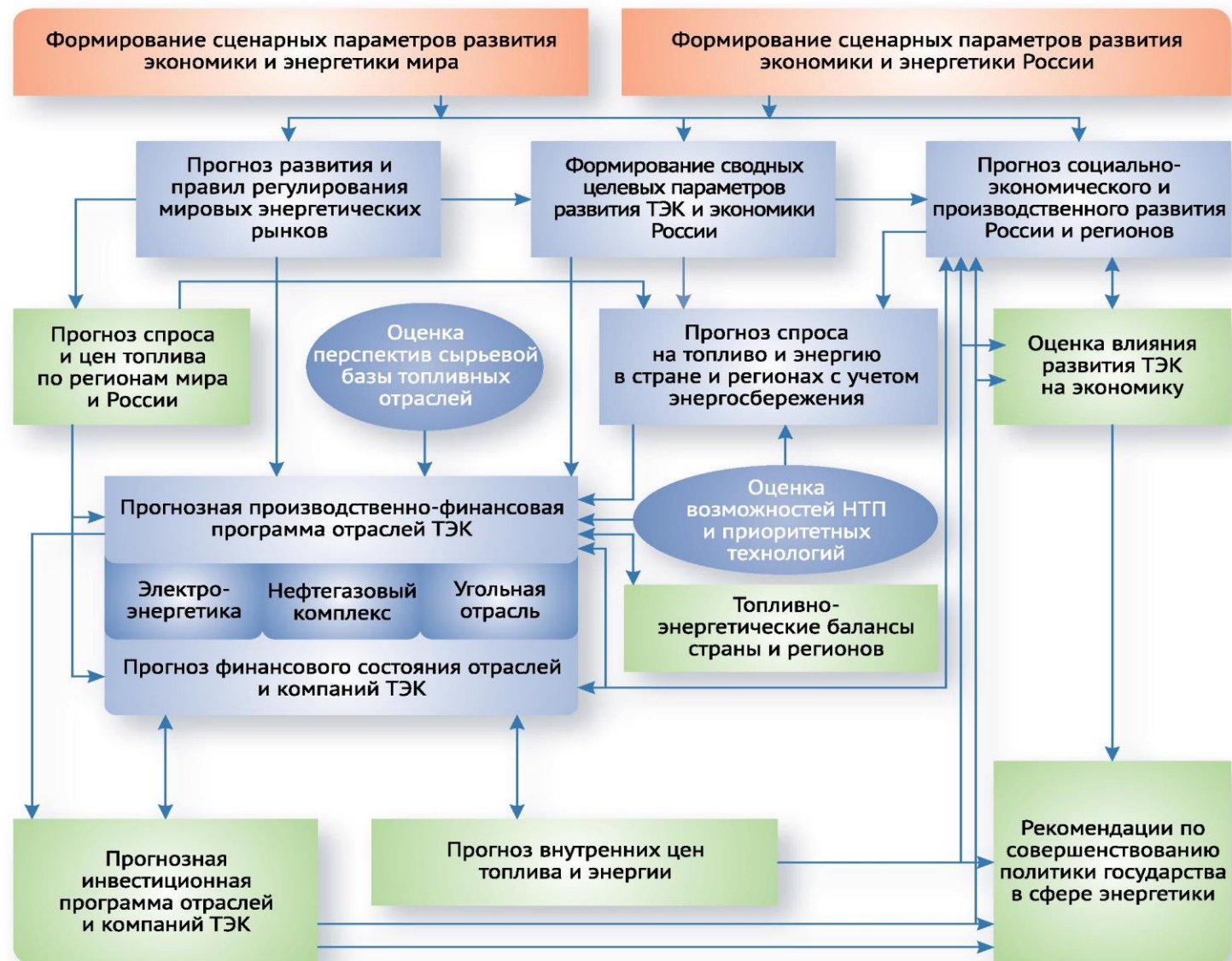
Модельно-информационные комплексы (МИК)

На рисунке отражена структура МИК «SCANER» (ИНЭИ РАН).

Двусторонние стрелки показывают, что результаты одной модели могут служить исходными данными для другой и наоборот.

МИК «SCANER» реализует оба принципиальных подхода: **bottom-up** (снизу-вверх) – технологии обуславливают экономический рост; **top-down** (сверху-вниз) – планы экономического роста диктуют требования к технологиям.

Существует большой «замодельный» массив исходной информации и постобработки решений



Трудности в моделировании систем энергетики

Неопределенность: исходные данные часто неизвестны или известны с большим допуском. Например, в статистической информации *сумма частей не равна целому*. Неопределенность отчасти преодолевается сценарными расчетами и/или экспертным уточнением значений. Специально разработаны методы интервальных вычислений, но помогают редко – допуски слишком велики.

Нелинейность: *нарушение принципа суперпозиции* – результат действия суммы факторов не равен сумме результатов от действия отдельных факторов. Линейные модели дают значительное отклонение результата от поведения реального объекта. В линейных моделях нелинейность часто преодолевается увеличением числа переменных и размерности задачи (**проклятие размерности**).

Замкнутые контуры в связях, аналог циклической ссылки в Excel: *возникает «неразрешимая» переменная*.

Жесткость: *большой разброс значений переменных* приводит к нарушению устойчивости численных методов или нахождению ложных решений. Чаще встречается при применении градиентных методов решения (где нужна производная) и в дифференциальных уравнениях. Преодолевается применением безградиентных и неявных методов или специальных методов (например, метод Гира и др.).

Пологость: *малая разница значений целевой функции* вблизи оптимального решения приводит к нахождению неоптимальных решений. В пределе получаются вырожденные решения. Отчасти помогает масштабирование, но не всегда.

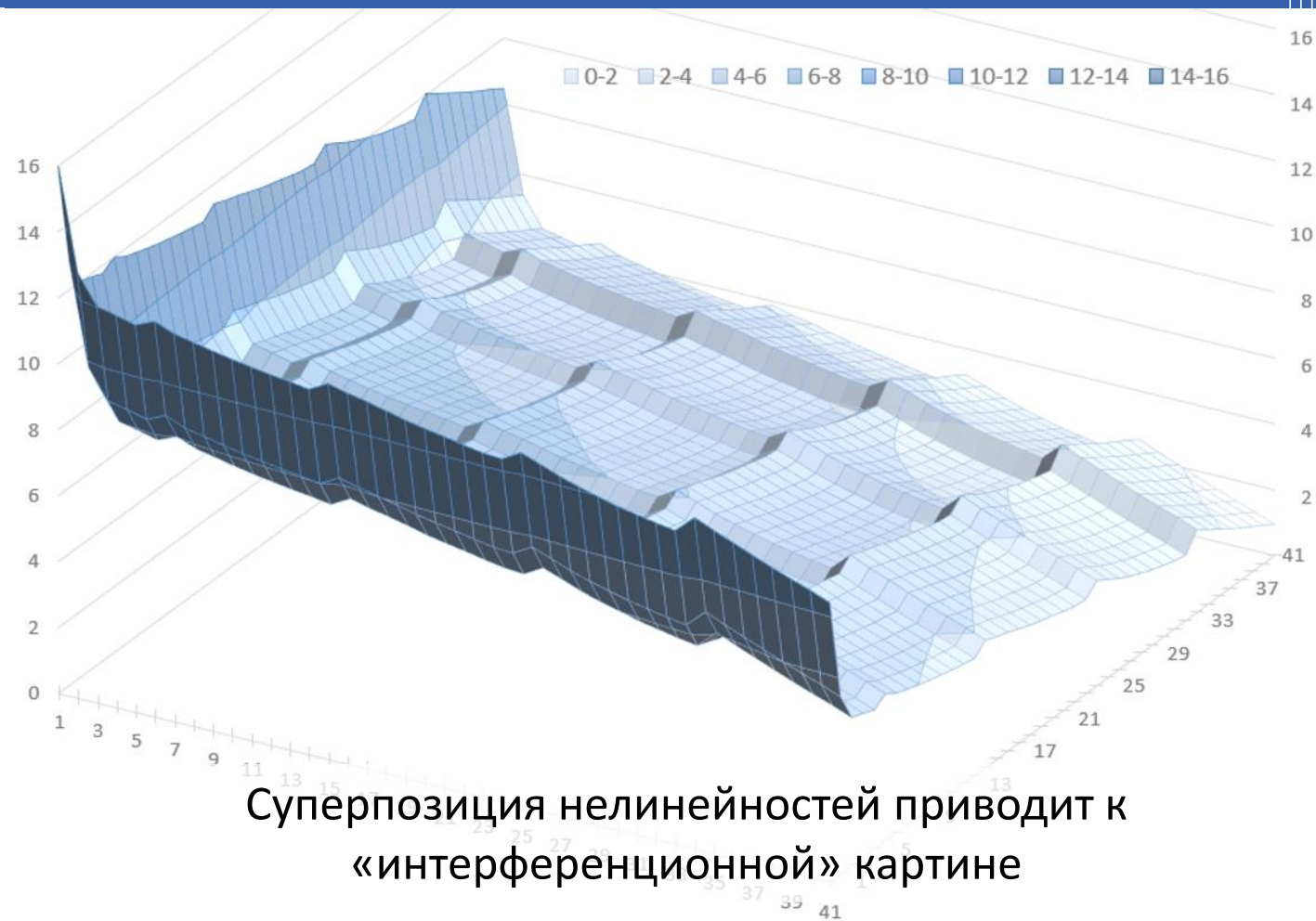
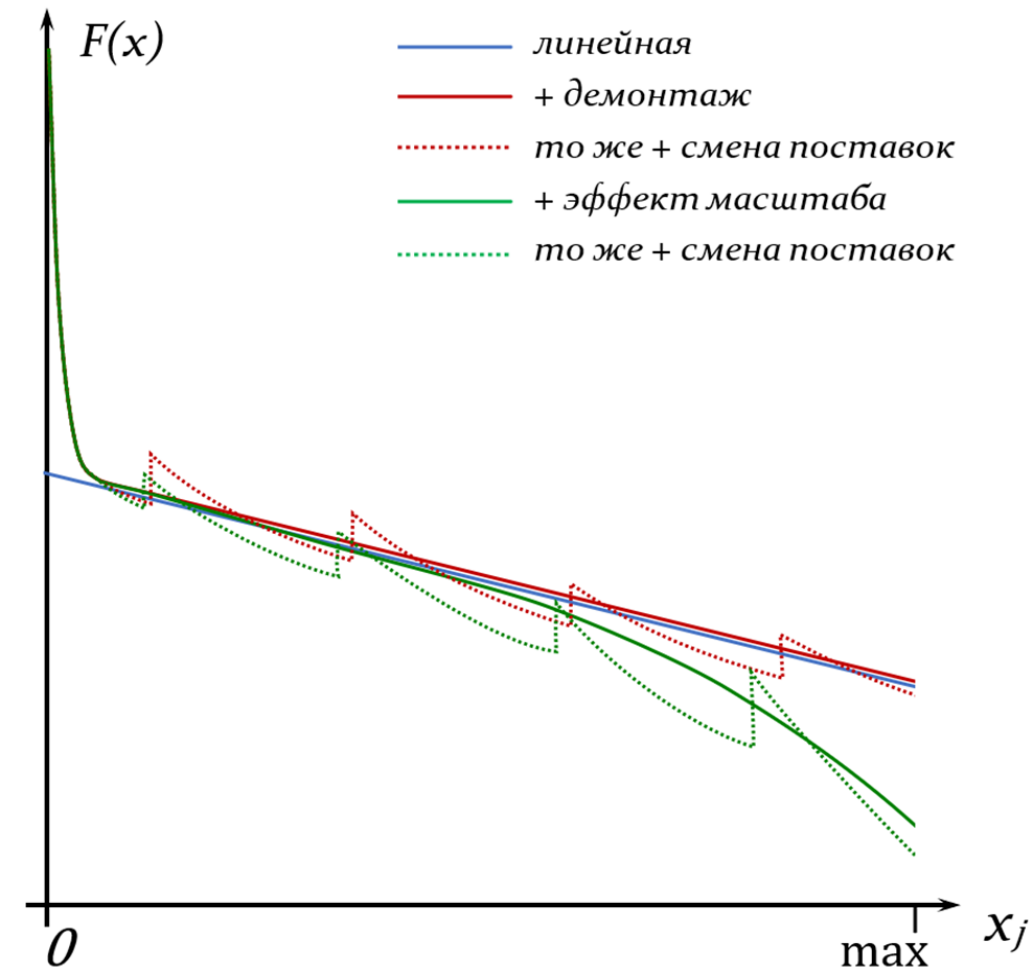
Как правило, трудности преодолеваются увеличением размерности задачи или ее стадийности

Источники нелинейности

- 1. Эффект масштаба** $c_j = f(x_j)$: с увеличением единичной мощности установки N_k ее удельная стоимость уменьшается как показательная функция $c_2 = c_1 * (N_1/N_2)^{\alpha-1}$ с показателем $\alpha = 0,6..1,0$ и средним значением в энергетике $\alpha = 0,67..0,69$. Если рост мощности станции обеспечен тиражированием однотипных установок, то $\alpha \rightarrow 1,0$. Если процесс требует только емкостного оборудования, то $\alpha \rightarrow 0,6$.
- 2. Эффект обучения** $c_j = f(\sum_k x_{jk})$: с ростом кумулятивной установленной мощности N данной технологии ее удельная стоимость c снижается по степенному закону вида: $c = \alpha N^\beta + \gamma$ или $c = \alpha(N + \gamma)^\beta + \delta$, где $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ - константы. Кривые обучения в координатах $(\ln c, \ln N)$ подобны почти для всех технологий, поэтому для экспресс-оценки достаточно знать одну точку $c_{tj} = f(N_{tj})$, чтобы предположить дальнейший ход кривой. Очень консервативная зависимость.
- 3. Начало и завершение освоения ресурса** $c_j = f(x_j)$, например, для месторождения: в начале освоения повышенные стартовые инвестиции; по исчерпанию ресурса удельная эффективность его добычи снижается, пока ресурс не перестает быть рентабельным. Типично: $c_j = \alpha x_j^3 - \beta x_j^2 + \gamma x_j$; $\alpha, \beta, \gamma = \text{const}$.
- 4. Дискретность** создания энергообъектов и вывода их из эксплуатации. Невозможно построить половину электростанции мощностью 1 ГВт с удельной стоимостью мощности 1000 USD/кВт: получится станция мощностью 0,5 ГВт со стоимостью 1250 USD/кВт. Вывод станции из эксплуатации также стоит денег, как и содержание неработающей станции. Модели различаются по условию учета/неучета затрат на демонтаж выбывающих мощностей. Дискретность может даже приводить к разрывам целевой функции.

Нелинейность – еще одна причина для тщательного выбора макротехнологий

Характер нелинейности

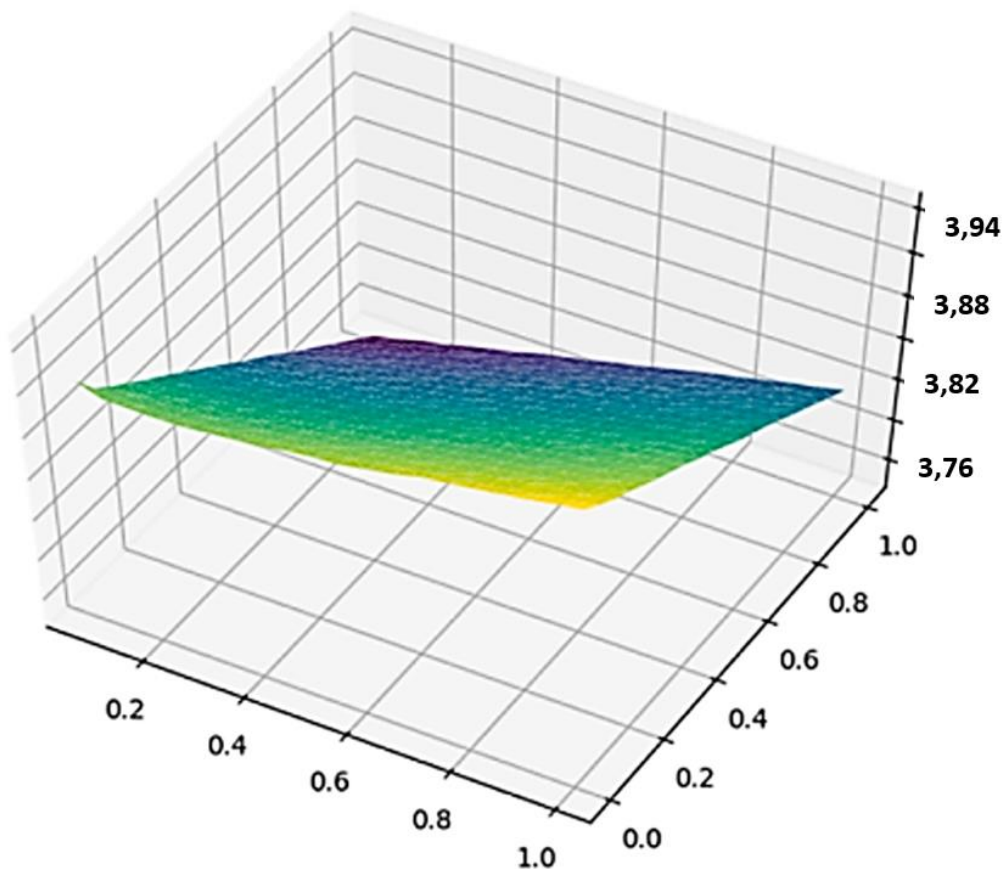


Суперпозиция нелинейностей приводит к «интерференционной» картине

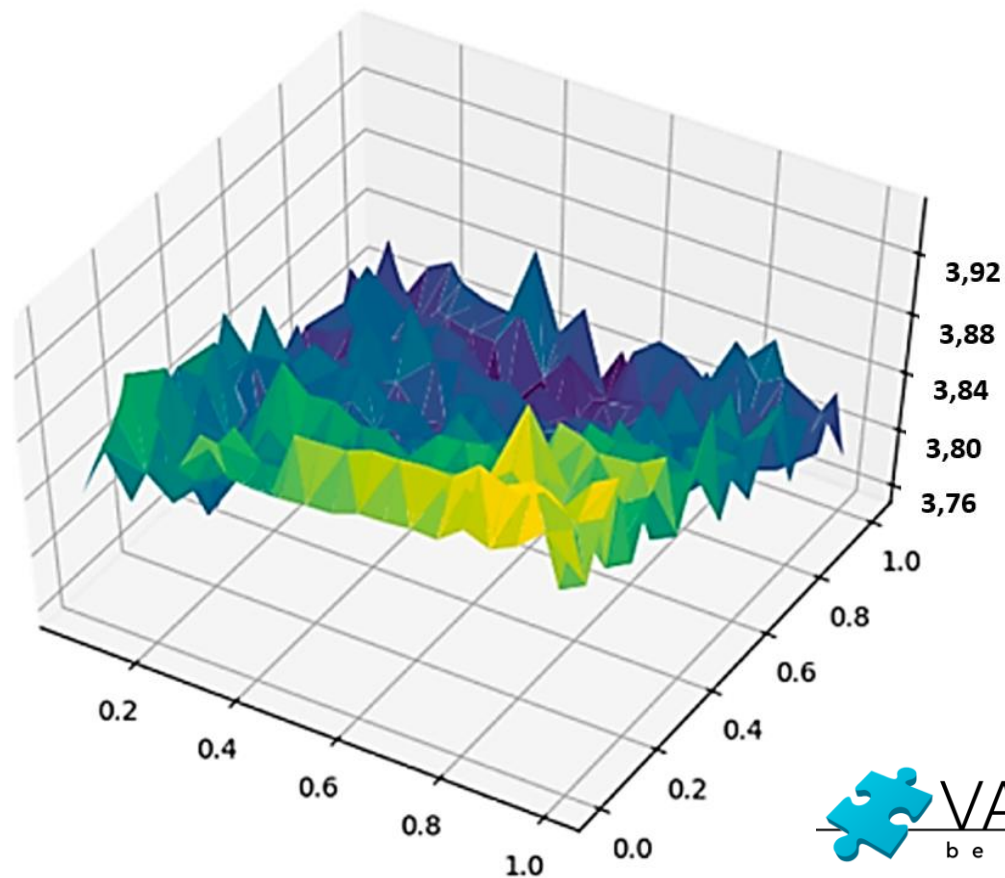
Траектория к оптимальному состоянию может пролегать через локальные максимумы затрат

Линейность и цена линеаризации

Линейная целевая функция



Реальная целевая функция



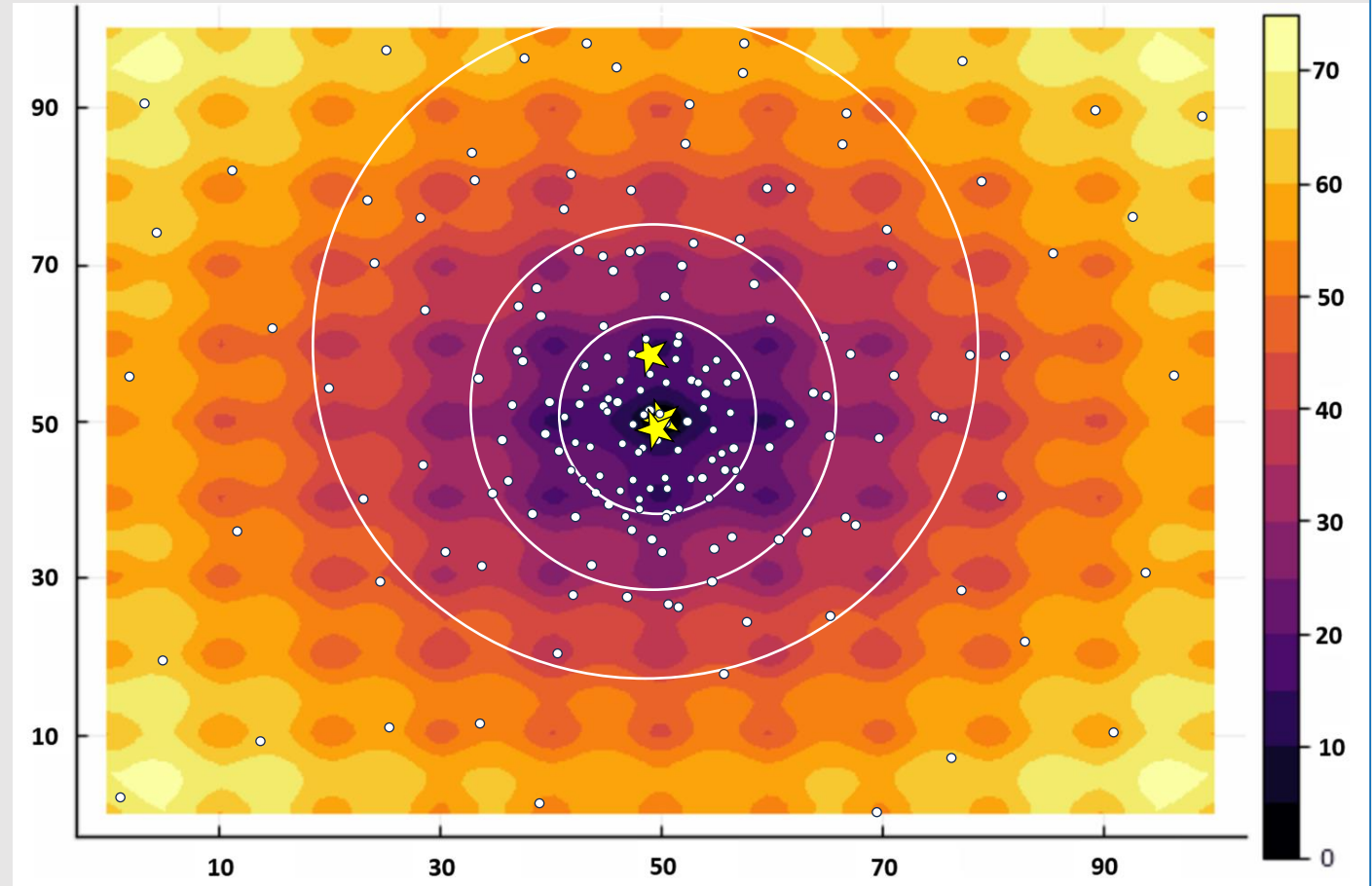
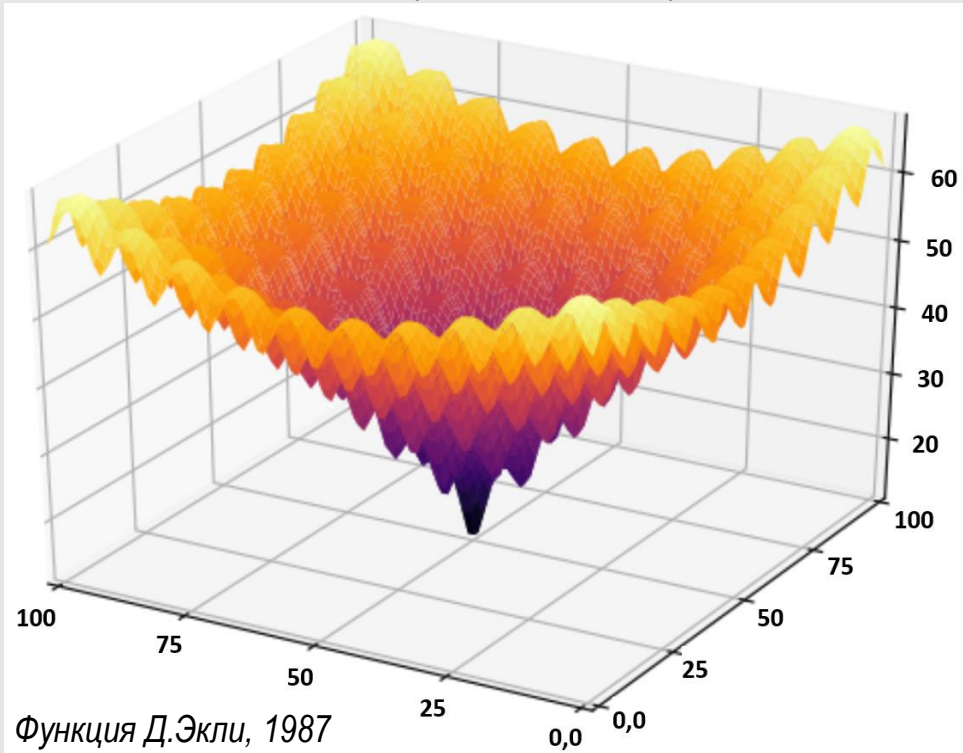
Цена линеаризации – потеря информации об альтернативных решениях

Методы решения нелинейных задач

Целевая функция – невыпуклая непрерывная неопределенно гладкая функция с многоэкстремальностью.

1. Метод Монте-Карло (ММК) – стохастика

$$F^*(\bar{x}) = \text{ext}_{i=1}^n \{F(\bar{x}^{[i]} \in D_0)\}$$



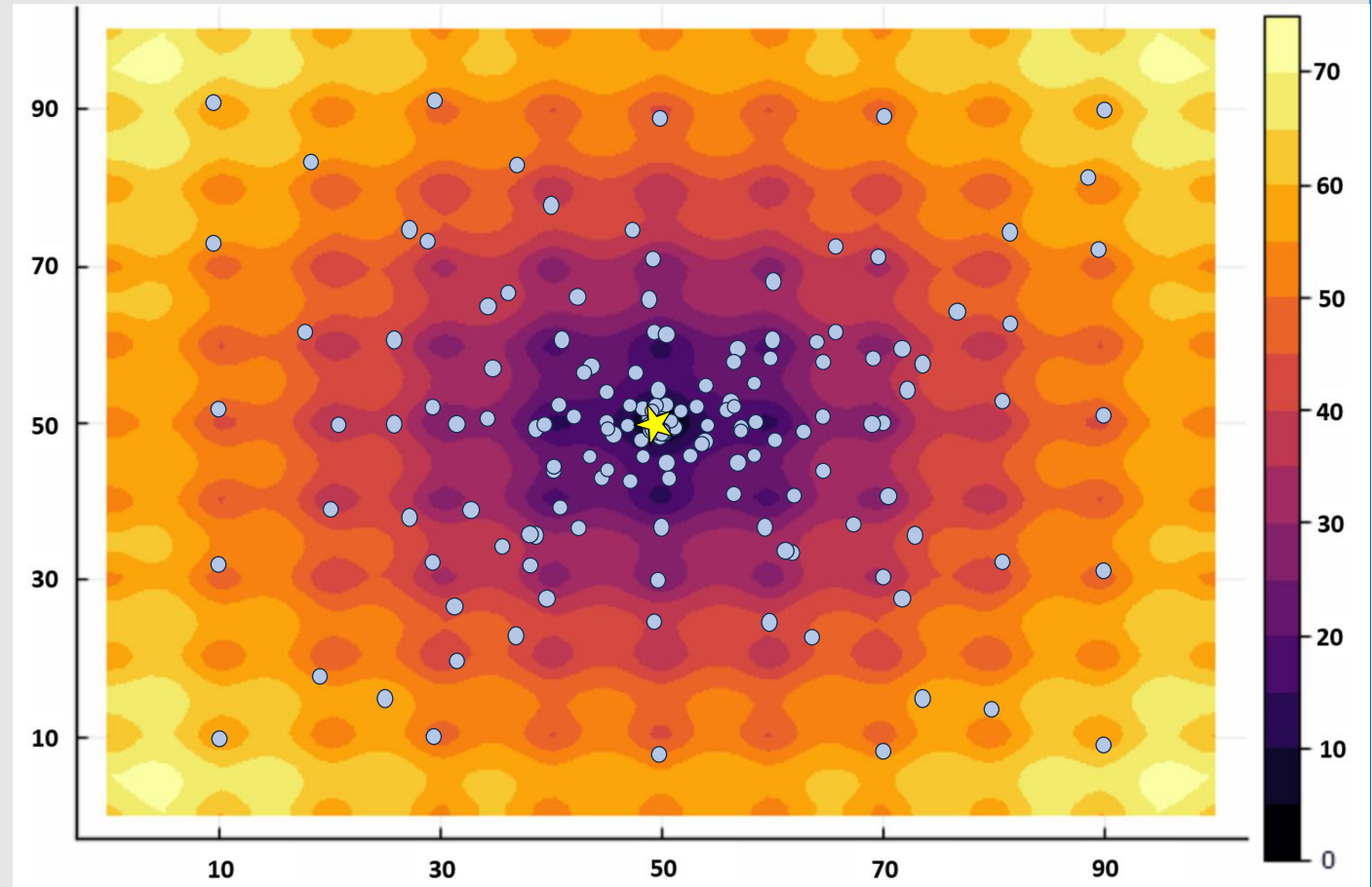
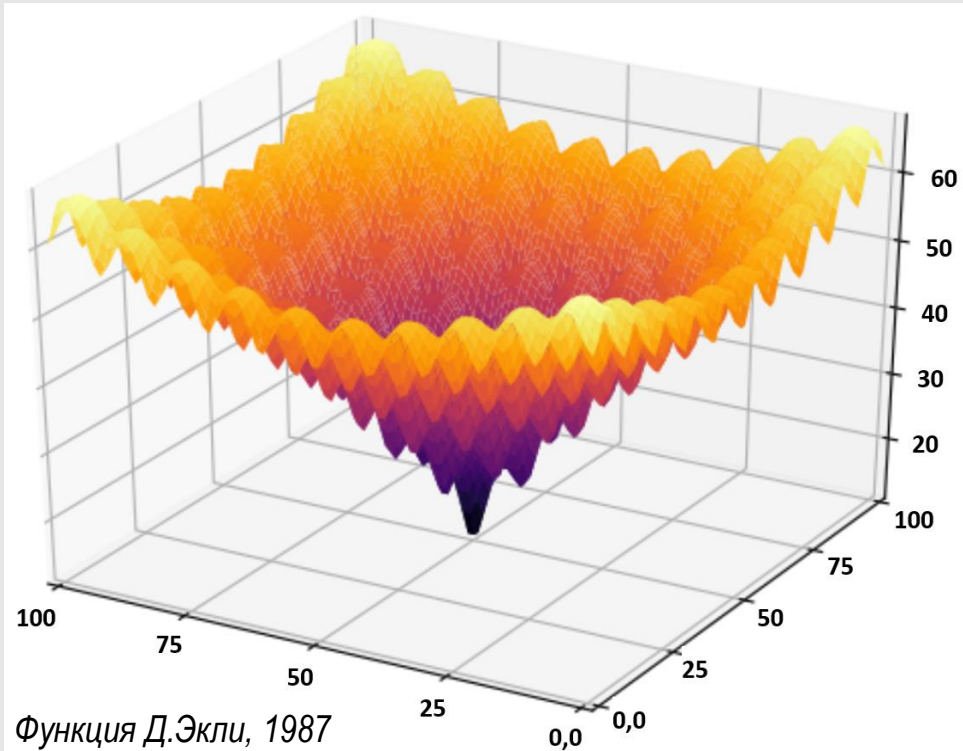
Простой в реализации, но ресурсоемкий метод с контролируемой точностью

Методы решения нелинейных задач

Целевая функция – невыпуклая непрерывная неопределенно гладкая функция с многоэкстремальностью.

2. Метод роя частиц (МРЧ) – эвристика

$$\vec{v}_i^{[t+1]} = \alpha \vec{v}_i^{[t]} + \beta_p r_0^1 (p_i - x_i) + \gamma_g r_0^1 (g - x_i)$$



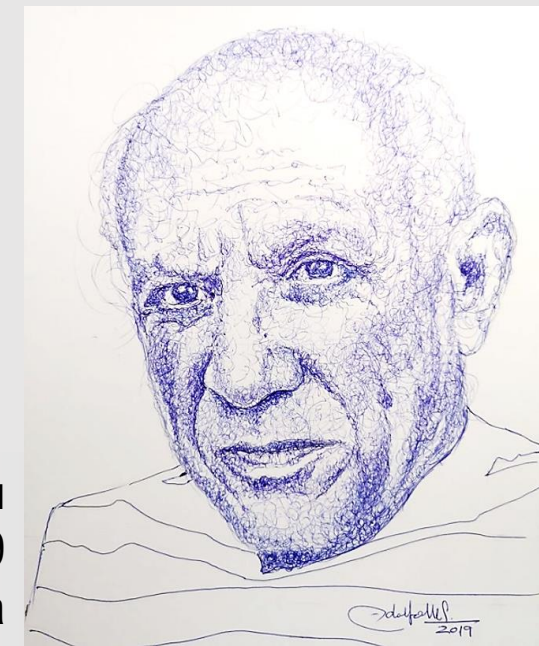
Все частицы движутся согласованно, сходимость в общем случае не доказана.

Заключение

1. Системное технико-экономическое моделирование используется в разнообразных исследованиях в энергетике: применительно к ресурсам, технологиям, потреблению и др. В том числе, это – основной инструмент для разработки государственной и корпоративной политики в сфере развития энергетики.
2. Подавляющее большинство стран применяют модельно-информационные комплексы (МИКи) на официальной и регулярной основе для стратегического планирования. Россия ввела практику стратегического планирования, но разрабатывает его документы экспертным путем – без использования МИК.
3. Острота негласного соревнования национальных МИК обусловлена высокими ставками лидерства в мировой экономике, особенно в условиях энергоперехода и геополитической турбулентности.
4. Важно различать модели разных классов, чтобы знать присущие им ограничения. В частности, полезно ориентироваться, в каких случаях (а) модель легко реализовать своими силами; (б) рассчитывать на специализированные средства; (в) рассчитывать на стороннего исполнителя; (г) не связываться.

Заключение

5. Линейные модели широко распространены и часто полезны. Вместе с тем искусственная линейность может служить источником искренних заблуждений при моделировании. При разработке модели следует предусматривать этап ее валидации (подтверждения ее адекватности).
6. Единственной «самой правильной» модели не существует. Наиболее продвинутые системные модели имеют динамическую постановку, включают нелинейные описания экономических процессов, учитывают поведение субъектов на энергетических рынках. Два опытных разработчика никогда не построят одинаковые модели.
7. Не пытайтесь засунуть в модель всё, что знаете об объекте. Генерализация придумана не зря:
*чтоб на салфетке шариковой ручкой
создать портрет не менее искусный,
чем маслом на грунтованном холсте.*
Залог успеха в моделировании (как и в живописи)
– это внимательный глаз, твердая рука и острый ум.



Адо́льфо Магдалена Сантаяя

Портрет Пабло Пикассо, 2019

Офисная бумага А4, шариковая ручка

P. S.

Как бы хороша ни была
построенная вами модель,
всегда найдется тот,
кому она не понравится.

Каэтано де Аркер Буигас
(Испания, 1932-2012).
Натурщица Пикассо.
Бумага, пастель.



Спасибо за внимание!

 www.eriras.ru

