

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

О.И. Никонов, д-р физ.-мат. наук, проф.,¹
М.А. Медведева, канд. физ.-мат. наук, доцент,
А.М. Волович, аспирант,
г. Екатеринбург

РИСКИ ФИНАНСОВЫХ И ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ²

В работе описываются некоторые подходы к моделированию рисков и рискованных ситуаций, применяемые в анализе финансовых и эколого-экономических систем и процессов. Приводится пример, относящийся к реализации классического подхода, восходящего к Г. Марковицу, к формированию эффективного портфеля энергетических технологий.

Ключевые слова: риски, рискованные ситуации, математическое моделирование, портфельные инвестиции, портфель энергетических технологий.

1. Теория портфельных инвестиций. Дисперсия – мера риска

Классической работой, в которой было формализовано понятие риска, следует, по-видимому, считать рабо-

ту Г. Марковица под названием «Выбор портфеля» [1]. В этой статье впервые была предложена математическая модель формирования оптимального портфеля ценных бумаг и были приведены методы построения таких портфелей. Основной заслугой Марковица явилась предложенная в этой статье теоретико-вероятностная формализация понятия доходности и риска. Доходности отдельных ценных бумаг трактовались в этой работе как случайные величины в математическом смысле этого термина. Соответственно доходность портфеля становилась случайной величиной, и цель инвестора состояла в максимизации ожидаемого значения этой величины. А мерой риска была выбрана дисперсия или среднеквадратичное отклонение этой величины от своего ожидаемого значения. Это сразу позволило перевести задачу выбора оптимальной инвестиционной стратегии на строгий ма-

¹ Никонов Олег Игоревич – декан факультета информационно-математических технологий и экономического моделирования, заведующий кафедрой «Анализа систем и принятия решений» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: aspr@mail.ustu.ru.

Медведева Марина Александровна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Анализа систем и принятия решений» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: Labaspr@mail.ustu.ru.

Волович Анатолий Михайлович – аспирант Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: aspr@mail.ustu.ru.

² Исследование выполнялось при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 11-06-00153-а и 09-01-00223-а).

тематический язык. Г. Марковиц первым привлек внимание к общепринятой практике диверсификации портфелей и точно показал, как инвесторы могут уменьшить стандартное отклонение доходности портфеля, выбирая акции, цены на которые меняются по-разному. С математической точки зрения получающаяся оптимизационная стратегия относится к классу задач квадратичной оптимизации при линейных ограничениях. К настоящему времени вместе с задачами линейного программирования это один из наиболее изученных классов оптимизационных задач, для которых разработано большое число достаточно эффективных алгоритмов.

Влияние «портфельной теории» Марковица значительно усилилось после появления в конце 50-х и начале 60-х гг. работ Дж. Тобина по аналогичным темам [2]. Здесь следует отметить некоторые различия между подходами Марковица и Тобина. Подход Марковица акцентирует внимание на поведении отдельного инвестора, формирующего оптимальный, с его точки зрения, портфель на основе собственной оценки доходности и риска выбираемых активов. К тому же первоначально модель Марковица касалась в основном портфеля акций, т. е. рискованных активов. Тобин предложил включить в анализ безрисковые активы, например государственные облигации. Его подход является макроэкономическим, поскольку основным объектом его изучения является распределение совокупного капитала в экономике по двум его формам: наличной (денежной) и безналичной (в виде ценных бумаг). Акцент в работах Марковица делался не на экономическом анализе исходных постулатов теории, а на математическом анализе их следствий и разработке алгоритмов решений оптимизационных задач. В подходе Тобина основной темой становится анализ факторов, за-

ставляющих инвесторов формировать портфели активов, а не держать капитал в какой-либо одной форме. Кроме того, Тобин проанализировал адекватность количественных характеристик активов и портфелей, составляющих исходные данные в теории Марковица.

С 1964 г. появляются три работы, открывшие следующий этап в инвестиционной теории, связанный с так называемой моделью ценообразования на рынке капитала, или CAPM (Capital Asset Pricing Model). Работы Шарпа (1964), Линтнера (1965), Моссина (1966) были посвящены практически одному вопросу. Модель CAPM основывается на том, что все инвесторы обладают одной и той же информацией, одинаково оценивают доходность и риск отдельных акций, формируют свои оптимальные в смысле теории Марковица портфели акций, исходя из индивидуальной склонности к риску. Главный вопрос заключается в определении поведения цен на рынке акций при заданных условиях. На CAPM можно смотреть как на макроэкономическое обобщение теории Марковица. Основным результатом CAPM явилось установление соотношения между доходностью и риском актива для равновесного рынка. При этом важным оказывается тот факт, что при выборе оптимального портфеля инвестор должен учитывать не «весь» риск, связанный с активом (риск по Марковицу), а только часть его, называемую систематическим, или недиверсифицируемым риском. Эта часть риска актива тесно связана с общим риском рынка в целом и количественно представляется коэффициентом «бета», введенным Шарпом в его однофакторной модели. Остальная часть (так называемый несистематический, или диверсифицируемый риск) устраняется выбором соответствующего (оптимального) портфеля. Характер связи между доходностью и риском имеет вид линей-

ной зависимости, и тем самым обычное практическое правило «большая доходность — значит, большой риск» получает точное аналитическое представление. После выхода работ Шарпа, Линтнера и Мосина теория портфельных инвестиций стала активно применяться на практике и получила широкое распространение.

Стефан Росс в 1976 г. разработал новый подход к управлению портфелем. В основе его теории, известной как теория арбитражного ценообразования (APT, Arbitrage Pricing Theory), лежит предположение о том, что не существует портфеля, позволяющего без риска получить ненулевой доход. Каждый инвестор стремится увеличить доходность своего портфеля, не увеличивая при этом возможный риск. Для достижения этой цели инвестор составляет арбитражный портфель, при формировании которого используется модель с одним индексом.

Теория портфельных инвестиций, разработанная учеными XX века, активно применяется сегодня на разных этапах формирования портфеля активов при распределении инвестированного капитала. Модель Марковица используется в основном на первом этапе, однофакторные модели Шарпа и Росса используются на втором этапе, когда капитал, инвестируемый в определенный сегмент рынка активов, распределяется между конкретными активами.

Направление, соответствующее тематике настоящей работы, соответствует применению портфельной теории к объектам, отличным по своей природе от ценных бумаг. Здесь нельзя не упомянуть работы, относящиеся к аренде нефтяных производств [3] и формированию энергетической стратегии Европейского Союза [4]. Ряд работ авторов настоящей статьи посвящен микроэкономическим аспектам приложений тео-

рии портфельных инвестиций, укажем, в частности, статьи [5–6].

2. Построение эффективных технологических портфелей

генерации электроэнергии

Формализация случайных величин: различные подходы к прогнозированию «смотреть назад» или «смотреть вперед»? В качестве основного параметра, характеризующего технологию генерации электроэнергии, целесообразно взять NPV (чистый приведенный доход) за определенный промежуток времени. Случайный характер этого параметра определяется его зависимостью от множества неопределенных факторов:

- спроса на электроэнергию;
- цен на электроэнергию на рынке;
- издержек – затрат на сырье, необходимое для той или иной технологии (уголь, нефть, газ и т.д.);
- налога на выбросы углерода.

Применение классической модели формирования эффективных портфелей ценных бумаг подразумевает использование статистических данных о характеристиках объектов портфеля (в простейшем случае – акций). В рамках настоящего исследования был развит другой подход получения информации о поведении случайных величин.

Если сбор исторической информации для оценки случайных параметров может быть назван подходом «смотреть назад», то подход, примененный в рамках исследования, может быть назван «смотреть вперед»: когда случайные величины формализуются на основе сгенерированных сценариев развития событий в будущем.

Этот подход описывается в [7]. В основе подхода лежит идея о том, что будущее непредсказуемо и оценки случайных параметров не могут быть получены на основе исторической информации. Для формализации неопределенности, оценки случайных величин генери-

руется набор различных сценариев будущего развития событий, причем сценарии генерируются с различными входными данными. Сценарии содержат множество возможных случаев – ситуаций, которые могут реализоваться в будущем. В каждом сценарии мы имеем различные значения случайных параметров, характеризующих технологии (издержки, уровни использования каждой технологии, эффективность и экологичность технологий и т.п.). Таким образом, на основе набора сценариев могут быть получены частоты случайных величин.

Описанный подход («смотреть вперед») представляется более адекватным, поскольку здесь мы можем получить всеобъемлющий перечень возможных вариантов развития событий. Использование только исторических данных для построения портфелей может оказаться недостаточным, поскольку в статистике не учитывается множество вещей, которые могут быть учтены при генерации сценариев развития событий.

Подход с генерацией сценариев представляется значительно более широким, поскольку «нормальное», усредненное развитие событий может рассматриваться только лишь как один из возможных сценариев. Если же мы получим портфель технологий, который эффективен по всем сценариям, то шансов, что это на самом деле искомый портфель технологий будет больше, чем в случае, если портфель формировался только на основе исторических данных.

Характеристики технологий генерации электроэнергии были взяты из «энергетических сценариев», сгенерированных в рамках работ, проводимых под эгидой Intergovernmental Panel on Climate Change. Сценарии [7, 8], содержат большое множество различных вариантов будущего, и соответственно из сценариев были получены распределения цен на электроэнергию, цен на сы-

рье, издержек и других параметров, от которых зависят результаты функционирования технологий.

Для получения распределений случайных параметров, характеризующих технологии генерации электроэнергии, была использована информация из 34 сценариев. Не вдаваясь в детали, отметим, что сценарии формализуют различные концепции развития человечества: в каких-то сценариях подразумевается, что человечество будет заботиться об окружающей среде и соответственно будет стремиться использовать соответствующие технологии, в других сценариях делаются иные предположения, что в свою очередь обуславливает другой набор технологий в портфеле. На основе этих предположений по каждому из сценариев на 2020, 2030, и т.д. до 2100 г. делаются предположения относительно потребления электроэнергии, ее стоимости, долей каждой из технологий в общем объеме и т.д.

В рамках настоящего исследования в качестве базового портфеля технологий был использован сценарий B2 для 2020 года [7, 8].

Описание модели формирования эффективных технологических портфелей. Определение эффективного портфеля технологий. Технологический портфель определяется вектором $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, где y_i – доля i -ой технологии в общем производстве электроэнергии.

Эффективный технологический портфель – это портфель, который является Парето оптимальным в координатах NPV -риск. Это означает, что портфель обладает свойством неулучшаемости по этим характеристикам; не существует другого портфеля, у которого при том же значении NPV меньше риск.

Спецификация модели. Спецификация модели может быть определена следующим образом:

- задан набор технологий, которые используются для производства электрической энергии, при этом для каждой технологии задана доля в общем производстве в тот или иной год;
- каждая технология имеет показатель NPV , который может быть посчитан (базовое значение NPV считается для сценария B2 в 2020 году);
- чистый приведенный доход технологии зависит от рискованных параметров, которые были определены выше: это издержки, цена электроэнергии, налог на выброс углерода;
- неопределенность параметров влияет на NPV каждой технологии, таким образом обуславливает случайность NPV технологии и девиацию NPV . Стандартное отклонение NPV рассматривается как риск технологии;
- портфель технологий также обладает NPV -параметром, который может быть определен и зависит как от значений NPV отдельно взятых технологий, входящих в состав портфеля, так и от взаимовлияния технологий в портфеле. Таким образом, портфель технологий также обладает определенным риском;
- выходные данные модели – множество портфелей, которые являются эффективными – Парето оптимальными в координатах риск–доходность.

Входные данные модели. Из сценариев [7, 8] были получены распределения следующих случайных параметров:

1. Предложение электричества.
2. Доли каждой технологии в общем производстве электроэнергии.
3. Распределение цен на электричество.

При этом каждая технология формализуется при помощи следующих параметров:

Параметр	Значение
Y_i	Доля i -ой технологии в заданный год в общем производстве электроэнергии
LC_i	Levelized costs – параметр, характеризующий издержки, связанные применением i -ой технологии
I_i	Стоимость единицы сырья (нефти, газа, угля), входных ресурсов для применения технологии
CE_i	Выбросы углерода на единицу производства электроэнергии при помощи i -ой технологии

Для того чтобы определить NPV технологии, также потребуются следующие данные:

1. S – предложение электричества;
2. f_i – эффективность использования сырья;
3. E – стоимость электроэнергии;
4. CP – цена углерода.

Для того чтобы определить базовый портфель, достаточно посмотреть доли каждой технологии генерации электроэнергии в общем производстве электроэнергии в сценарии B2 в 2020 году (см. <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/ggi/GgiDb>).

Цены на электроэнергию взяты из базы, где они представлены по каждому сценарию. Издержки, связанные с использованием технологий, представлены в системе MESSAGE (разработка IIASA), так же как и параметры, характеризующие эффективность использования сырья и стоимость углерода.

Определение NPV технологии. NPV i -й технологии определяется по следующей формуле:

$$NPV_i = \frac{y_i \cdot S \cdot E}{(1+r)^t} - \frac{y_i \cdot S \cdot 1/f_i \cdot I_i}{(1+r)^t} - \frac{y_i \cdot S \cdot LC_i}{(1+r)^t} - \frac{y_i \cdot S \cdot CE_i \cdot CP}{(1+r)^t} \quad (1)$$

$$NPV_i = y_i \cdot S \cdot \left[\frac{\frac{E}{(1+r)^t} - \frac{1/f_i \cdot I_i}{(1+r)^t}}{\frac{LC_i}{(1+r)^t} - \frac{CE_i \cdot CP}{(1+r)^t}} \right] \quad (2)$$

Следовательно, NPV на единицу продукции определяется как:

$$r_i = \frac{NPV_i}{y_i \cdot S} = \left[\frac{\frac{E}{(1+r)^t} - \frac{1/f_i \cdot I_i}{(1+r)^t}}{\frac{LC_i}{(1+r)^t} - \frac{CE_i \cdot CP}{(1+r)^t}} \right] \quad (3)$$

Базовым значением NPV технологии будем считать NPV технологии, посчитанное для базового сценария.

Определение риска технологии. Риск технологии может быть определен аналогично тому, как в теории портфельных инвестиций определяется риск ценной бумаги: величиной среднеквадратичного отклонения NPV , которое обуславливается влиянием неопределенных факторов.

В рассматриваемой модели случайными факторами, влияющими на показатель NPV технологии, являются LC_i , I_i , E , CP . Каждый из этих параметров характеризуется случайной величиной (которая, в свою очередь, определяется распределением, построенным на основе данных по сценариям). Предполагается, что эти случайные величины являются независимыми.

Поскольку NPV – это случайная величина, математическое ожидание $E_i[NPV]$ может быть использовано в качестве основной характеристики тех-

нологии. Тогда риск технологии может быть представлен как стандартное отклонение – $\sigma_i[NPV]$.

Описание базового портфеля. В сценариях рассматриваются 20 видов технологий генерации электроэнергии, в основе которых лежат различные ресурсы: {CoalStd}, {CoalStdA}, {CoalAdv} – уголь, {Oil} – нефть, {GasStd}, {GasCC}, {Gas Reinj} – газ, {BioSTC}, {Bio_GTC} – биотопливо, {Waste} – отходы, {Nuc_LC} {Nuc_HC} – атомная энергия, Hydro – гидроэлектростанции, {SolarTh} {SolarPV}, {PV-ons} – солнечная энергия, {Wind} – ветер, {Geothrm} – геотермальная, {H2FC} – водород. В статье мы не будем подробно описывать различия между технологиями, они приведены в [7].

Как отмечалось ранее, в качестве базового технологического портфеля был выбран портфель сценария B2 для 2020 года. Структура базового портфеля, то есть доля каждой технологии в общем объеме производства по сценарию B2 для 2020 года, показана на рис. 1.

Наибольшие доли в базовом портфеле имеют технологии {Nuc_LC} (атомные электростанции), {Gas StdA} и {Gas Adv} (различные технологии, где в качестве сырья используется газ). Три технологии не включены в портфель: Waste (переработка отходов), {Bio_GTC} (технология, основанная на биотопливе), {Gas Reinj} (одна из технологий, в качестве сырья для которой используется газ). Для каждой из технологий может быть определено значение NPV на единицу продукции (доллары / ГигаДжоули). NPV портфеля технологий составило 223 млрд долл.

Добавление неопределенности и определение рядов NPV технологий. После того, как была определена структура начального портфеля и основные характеристики технологий, в модель были добавлены случайные факторы, графики значений которых в различных сценариях приведены на рис. 2.

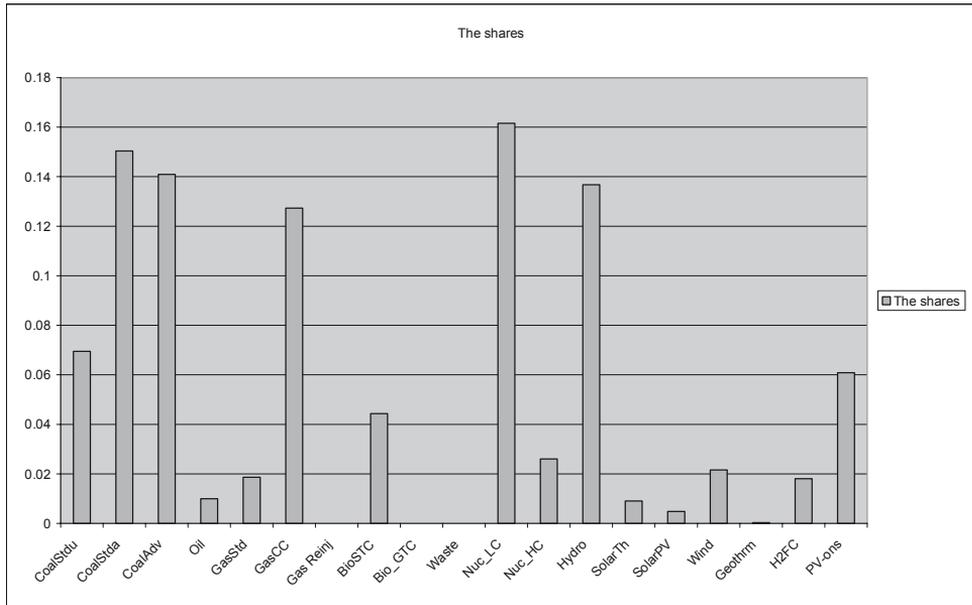


Рис. 1. Структура базового портфеля

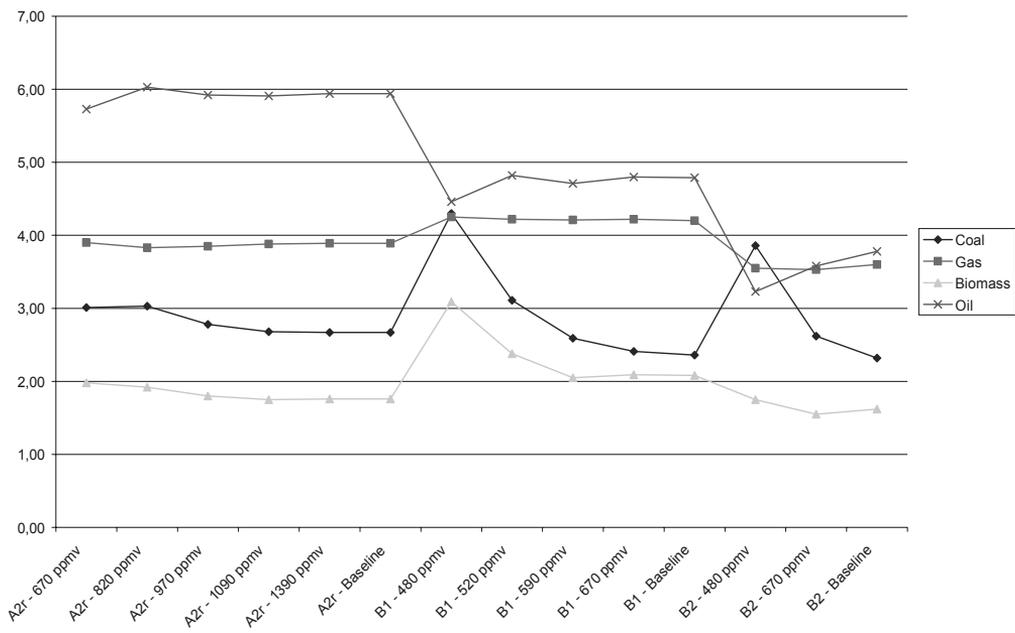


Рис. 2. Распределение цен на ресурсы (уголь, газ, биотопливо, нефть)

В целях реализации первого этапа исследования и проверки адекватности модели цены на углерод не были взяты в расчет. Значения NPV для каждой технологии определялись для всех возможных комбинаций исходных данных по формулам (1),(2). В результате для каждой технологии был получен ряд значений NPV , причем каждое значение показателя характеризует какое-либо из возможных сочетаний случайных факторов («стоимость ресурсов из первого сценария, издержки – из второго», «стоимость ресурсов из первого сценария, издержки – из третьего» и т.д.).

Аналогичный расчет был проведен для каждой технологии, и были получены ряды значений NPV по всем технологиям. Эти данные являются входными в модель построения эффективных портфелей технологий.

Построение эффективных портфелей технологий. Для построения эффективных портфелей технологий было

использовано программное обеспечение, изначально разработанное для формирования эффективных портфелей ценных бумаг. Значения $E[NPV]$ и риска технологий представлены на рис. 3.

На рис. 3 для каждой технологии приведено три ряда: NPV на единицу продукции, стандартное отклонение NPV (реальный риск технологии) и скорректированный риск технологии. Идея «скорректированного» риска очень проста – для технологий с практически постоянным значением NPV (как, например, в случае с $\{Nuc LC\}$) был добавлен «шум» для имитации случайности.

На основе этих данных были получены следующие множества эффективных портфелей технологий (расчет корреляции между NPV технологий и все остальные вычисления были реализованы в программном продукте). Из всего множества портфелей, каждый из которых, безусловно, заслуживает того, чтобы быть проанализированным, рассмо-

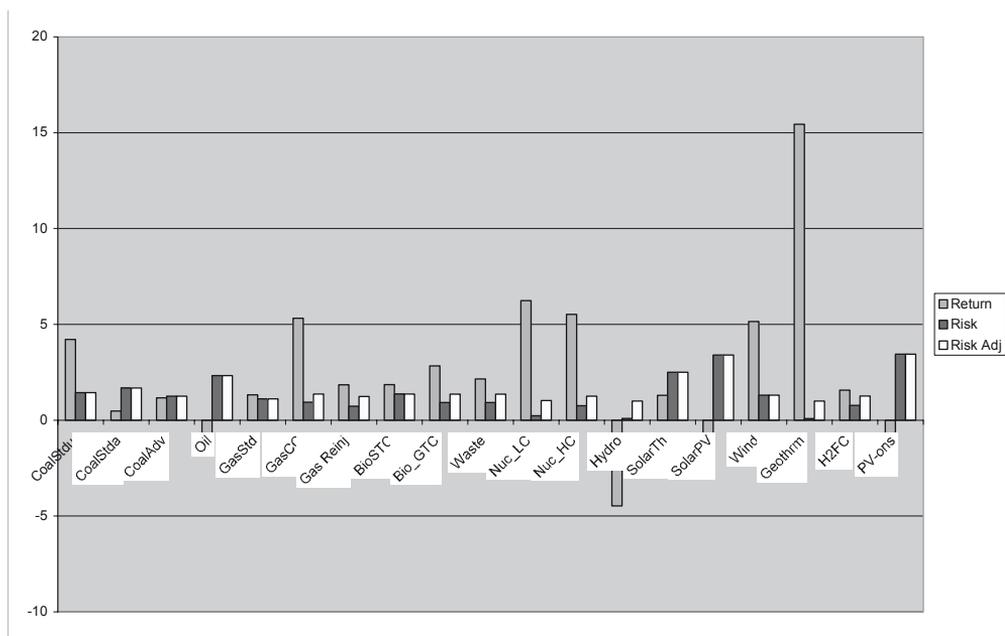


Рис. 3. NPV технологий, риски технологий и скорректированные риски технологий в базовом портфеле

портфель тот, который обладает наименьшим уровнем риска и соответственно наименьшим значением NPV .

Портфель с наименьшим значением NPV и риска (4.083, 0.399) назовем

портфель «А», который имеет следующую структуру – рис. 4. На рисунке ниже приведено сравнение структур портфелей (базового и портфеля «А») в долях технологий (рис. 5).

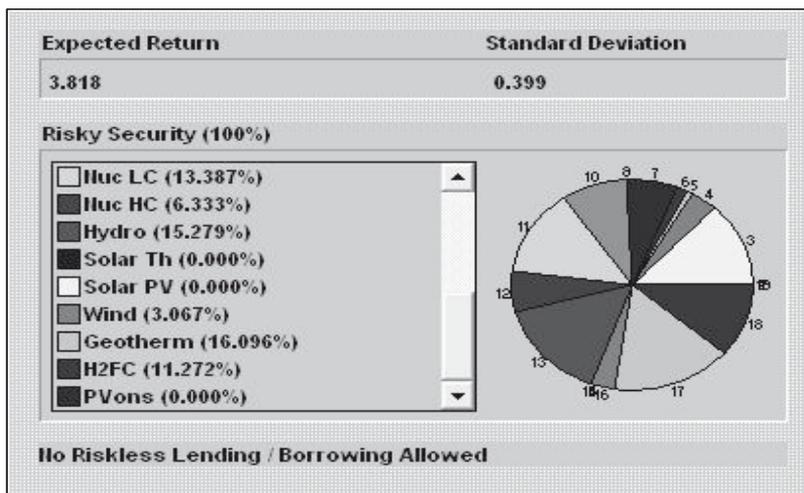


Рис. 4. Структура эффективного портфеля с минимальным уровнем риска и NPV

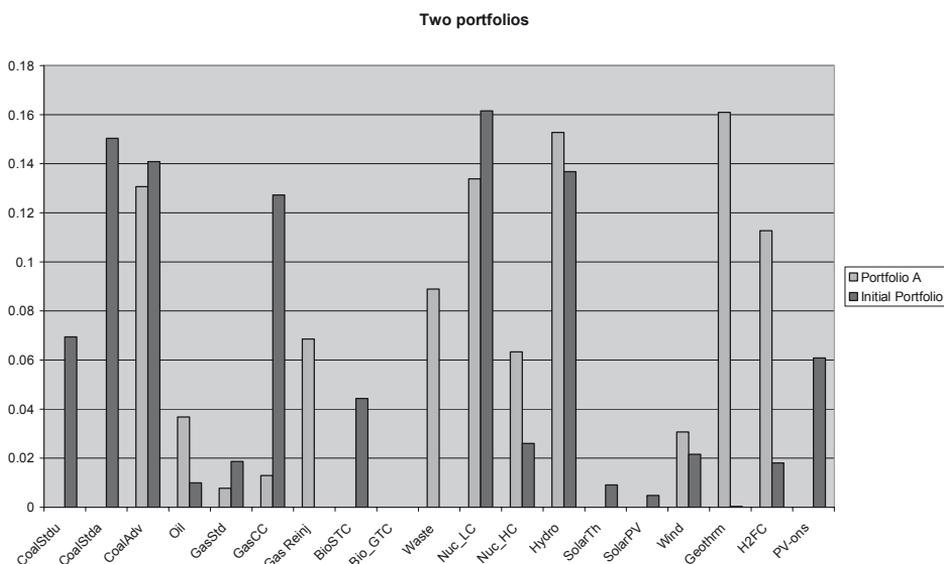


Рис. 5. Два портфеля: начальный портфель и портфель А

NPV полученного портфеля составило 384.03 млрд долл., что больше, чем у базового портфеля (224 млрд долл.). Мы видим, что структура эффективного портфеля отличается от структуры базового портфеля – технологии {Geotherm} and {H2FC} имеют значительные доли в портфеле. При этом полученный порт-

фель обладаем наименьшим уровнем риска.

Таким образом, представляется, что идеи и концепции современной теории портфельных инвестиций могут быть использованы в задачах управления риском при построении эффективных технологических портфелей.

Список использованных источников

1. Markowitz H. Portfolio selection // J. Finance. 1952. Vol. 7. P. 77–91.
2. Tobin J. Liquidity preference as behavior towards risk // Rev. Economic Stud. 1958.
3. Helfat C. Investment choices in industry, MIT, Cambridge, 1988.
4. Awerbuch S. Portfolio-based Electricity Generation Planning: Policy Implications for Renewables and Energy Security // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11(3), 693-710, 2006.
5. Никонов О.И., Медведева М.А., Египцев Д.С. Повышение эффективности системы сбыта продукции: математическое моделирование // Вестник УГТУ-УПИ. Серия экономика и управление. 2004. № 4. С. 96–103.
6. Никонов О.И., Медведев М.А. О некоторых приложениях теории портфельных инвестиций // Информ.-мат. технологии в экономике, технике и образовании: сб. мат. 3-й Междунар. науч. конф. / УГТУ–УПИ. Вып.5: Прикл. аспекты информ.-аналит. моделирования и обработки информации. Екатеринбург, 2009. С. 93–105.
7. Nakicenovic N. and Riahi K. An Assessment of Technological Change Across Selected Energy Scenarios. PR-02-005, May 2002. IIASA Preprint Research Report.
8. Keywan Riahi et al. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization, Technological Forecasting & Social Change (2006), doi:10.1016/j.techfore.2006.05.026.