

УДК 330.4

## АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИРОДОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ



**В. И. Зоркальцев**

*Лимнологический институт СО РАН  
Байкальский государственный университет*  
г. Иркутск, Российская Федерация  
E-mail: zork@isem.irk.ru

**V. I. Zorkaltsev**

*Limnological Institute SB RAS  
Baikal State University*  
Irkutsk, Russian Federation  
E-mail: zork@isem.irk.ru



**Е. В. Губий**

*Институт систем и энергетики  
им. Л. А. Мелентьева СО РАН*  
г. Иркутск, Российская Федерация  
E-mail: egubiy@gmail.com

**E. V. Gubiy**

*Institute of Energy Systems of L. A. Melentyev SB RAS*  
Irkutsk, Russian Federation  
E-mail: egubiy@gmail.com

**Аннотация.** Излагается методика анализа экономической эффективности и выбора вариантов технологии инфраструктурных объектов и систем, разрабатываемых для Байкальской природной территории. К ним относятся транспортные системы, объекты и системы сбора и утилизации отходов, канализации, энергообеспечения, водоснабжения.

Особое внимание в методике уделено учету случайного фактора, в том числе из-за возможных колебаний метеорологических условий. В качестве базового расчетного средства предлагается использовать имитационные модели, которые при соответствующей детализации могут служить и в качестве цифровых двойников рассматриваемых инфраструктурных объектов.

**Ключевые слова:** байкальская природная территория, инфраструктура, цифровые двойники, экономическая эффективность, энергетика.

**Информация о статье.** Дата поступления: 4 ноября 2019 г.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-07-00322), РФФИ и Правительства Иркутской области (проект № 20-47-380002) и в рамках проекта РАН № 0279-2019-0003.

## ANALYSIS OF ECONOMIC EFFICIENCY OF SUSTAINABLE TECHNOLOGIES

**Abstract.** The study described methods of analysis of economic efficiency and choice of technology options of infrastructure facilities and systems developed for the Baikal designated natural area. These include transportation systems, waste collection, disposal systems, sewerage, energy and water supply.

The methodology takes into consideration random factors, including those introduced by possible fluctuations in meteorological conditions. We proposed to use simulation models as the basic calculation tool, which with appropriate detailing, could also serve as digital twins of infrastructure objects under consideration.

**Keywords:** baikal designated natural area, digital twins, economic efficiency, power industry, infrastructure.

**Article info.** Received 4 November, 2019.

**Acknowledgements.** This work was financially supported by the Russian Federal Property Fund (project No. 19-07-00322), the Russian Federal Property Fund and Government of Irkutsk region (project No. 20-47-380002) and within the framework of the project of RAS No. 0279-2019-0003.

---

Байкальская природная территория нуждается в использовании особых природосберегающих технологий в инфраструктурном секторе [1] — в формировании транспортных систем, систем сбора и утилизации отходов, канализации, топливо-тепло-энергоснабжения населения, туристических объектов, предприятий. При формировании, анализе и выборе вариантов инфраструктурных объектов и систем важно учитывать не только их экономические преимущества, но и их экологические характеристики. Анализ экономической эффективности является необходимым элементом в выборе вариантов решения инфраструктурных задач Байкальской природной территории, поскольку от этого существенно зависят затраты жизнедеятельности и бизнеса на этой территории, в том числе функционирование туристско-рекреационных объектов. При анализе экономической эффективности важно учитывать действия случайных факторов, а также возможные варианты организации объектов инфраструктуры для конкретной территории. Это делает необходимым создание и исследование математических моделей функционирования инфраструктурных объектов и систем в условиях действия случайных факторов.

Ниже представлена общая методика математического моделирования, оптимизации и выбора вариантов создания и функционирования инфраструктурных объектов. В качестве конкретной технологии приложения данной методики авторами статьи в частности рассматриваются:

- тепловые насосы для решения задач теплоснабжения зданий и сооружений;
- ветроэнергостанции;
- солнечные электростанции;
- специально выращиваемые энергетические плантации для обеспечения твердым котельным топливом;
- автономные системы канализации.

Все эти объекты и системы функционируют в условиях действия случайных факторов как со стороны производства вырабатываемой продукции, так и потребления.

В частности, возможность и эффективность производства электроэнергии на ветровых и солнечных электростанциях в решающей мере зависят от регулярных случайных суточных колебаний интенсивности ветров и солнечной инсталляции. Потребности в топливе, теплоэнергии и электроэнергии, зависят от заранее не прогнозируемых социально-экономических и климатических параметров.

Предлагается использовать трехуровневую систему математических моделей инфраструктурных объектов.

### 1. Трехуровневая система математических моделей инфраструктурных объектов

Имитационная модель функционирования инфраструктурных объектов. В имитационной модели функционирования инфраструктурных объектов предполагается детальное описание рассматриваемой технологии с явным представлением в ней всех существенных параметров. На этом уровне целесообразно использование имитационных моделей, описывающих функционирование моделируемой технологии в течение единичного периода времени. В качестве единичного периода времени в некоторых случаях (функционирование энергетических плантаций [2]) может служить период в один год. При решении задач теплоснабжения и электроснабжения в качестве единичного периода целесообразно использовать отдельный час, поскольку тепловые и электрические нагрузки характеризуются существенными суточными колебаниями и зависят от метеоусловий, которые могут изменяться в течение нескольких часов.

Оптимизация параметров. Другой целью имитационной модели является оптимизация параметров и конкретных технологических решений рассматриваемого объекта или системы на этапе предпроектных решений. Это осуществляется путем направленного перебора имеющихся вариантов.

Анализ экономической эффективности. На основе имитационной модели при оптимизации параметров необходимо оценивать экономическую эффективность предполагаемой технологии. Поскольку речь идет об инфраструктурных секторах, то в качестве критерия для экономических сопоставлений предлагается использовать минимизацию приведенных затрат, выражаемых формулой

$$C = E \cdot I + V. \quad (1)$$

Здесь  $I$  — объем инвестиций (капиталовложения в рассматриваемый инфраструктурный объект (млн. руб.);  $V$  — текущие (годовые) затраты на функционирование объекта (млн. руб./год);  $E$  — заданный нормативный коэффициент эффективности капиталовложений (1/год).

Обратную величину  $1/E$  можно рассматривать как нормативный срок окупаемости капиталовложений (это одна из возможных трактовок коэффициента  $E$ ). Тогда значение  $E=0,12$  соответствует нормативному сроку окупаемости  $T=1/E \cong 8$  лет [3].

## 2. Критерий выбора вариантов

Необходимо пояснить экономический смысл использования критерия приведенных затрат. Прежде всего следует подчеркнуть, что данный критерий предлагается к использованию для сравнения вариантов создания и функционирования именно инфраструктурных объектов и систем. Такие объекты осуществляют обслуживание базовых общих потребностей. Затраты на них не могут быть строго разнесены по конкретным видам и объемам товаров и услуг конечного потребления. Поэтому при сравнении вариантов затруднено (часто просто невозможно) использование таких «рыночных» критериев как максимизация приведенной во времени прибыли на основе анализа движения денежных средств, внутренняя норма рентабельности и т.д.

Вместе с тем показатель приведенных затрат в данном случае вполне «рыночный», если учесть, что выбор вариантов решения инфраструктурных проблем должен осуществляться по минимальным затратам (ценам) для пользователя. Приведенные затраты можно рассматривать как минимальную рентабельную цену на рассматриваемое благо, если интерпретировать коэффициент  $E$  как плату (процент) за инвестиции. Это могут быть дивиденды от инвестиций, если они формируются на основе акционерного капитала. Или это могут быть проценты за кредит, если инвестиции осуществлялись за счет кредита. Если инвестиции осуществлялись за счет собственных средств, то величину  $E$  можно интерпретировать как упущенный процент при альтернативном способе использования накопленных объемов инвестиций (например, при вложении их в облигации).

## 3. Учет действия случайного фактора

Инфраструктурные объекты должны функционировать в очень широком диапазоне возможных условий. Например, тепловые насосы или другие системы топливоснабжения зданий должны обеспечивать комфортные условия при колебаниях продолжительности отопительных периодов до  $\pm 7\%$  и колебаний средней интегральной разности температур внутри и вне зданий за отопительный период до  $\pm 8\%$  [4]. При этом различия температур наружного воздуха в отопительные сутки и части зимнего периода могут составлять очень большой диапазон [5]. Например, для января на Байкальской природной территории вполне реальный диапазон температур наружного воздуха составляет от  $-5^\circ\text{C}$  до  $-45^\circ\text{C}$ . В редкие, но вполне реальные периоды он может быть и шире.

Учет случайного фактора предлагается осуществлять за счет использования метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) [6–8]. На основе рассматриваемых данных о вероятностях реализации различных ситуаций с использованием датчиков случайных чисел реализуется набор ситуаций  $t = 1, \dots, T$  при достаточно большом (измеряемо обычно десятками тысяч) числом реализаций  $T$ . Для каждой из ситуаций на имитационной модели рассматриваются показатели функционирования объекта, по которым определяются текущие среднегодовые затраты в этой ситуации. Обозначим их  $V_t$ . Путем усреднения рассматривается математическое ожидание затрат на годовое функционирование

$$V = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T V_t. \quad (2)$$

При использовании этой общей идеи учета случайных факторов возможны различные варианты в зависимости от рассматриваемого объема инфраструктуры. Где-то достаточно использовать модель, имитирующую функционирование объекта агрегировано в течение года. Такая ситуация рассматривается в частности в модели функционирования энергетических плантаций [9].

Во многих случаях требуется имитация функционирования в короткие, например, часовые периоды времени. В таких случаях при подсчете годовых затрат  $V_t$  в случайной реализации необходимо учитывать затраты каждого часа в случайно реализуемых условиях. При этом следует осуществлять имитацию функционирования в течение каждого часа. Случайные затраты для периода  $t$  осуществляются по формуле

$$V_t = V_0 + \sum_{\tau=1}^{k(t)} V_{\tau}^t, \quad (3)$$

где  $V_0$  — текущие затраты, не зависящие от реализации случайных условий;  $V_{\tau}^t$  — текущие затраты для часа (или суток)  $\tau$ , зависящие от реализации случайных условий;  $R(t)$  — количество рассматриваемых подпроектов в году  $t$ . В некоторых случаях это могут быть все дни и часы в году (системы водоснабжения, канализации, транспорт, электроснабжение). В других случаях это может быть только часть года. Так для систем теплоснабжения следует рассматривать отопительный период, продолжительность которого  $R(t)$  является также случайной величиной.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современное использование территории и перспективы социально-экономического развития центральной экологической зоны Байкальской природной территории (республика Бурятия) / Л. М. Хандажапова, С. Д.-Н. Дагбаева, С. Н. Аюшеева [и др.] // География и природные ресурсы. — 2016. — № S5. — С. 137–143.

2. Губий Е. В. Эффективность энергетических плантаций / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев. — Новосибирск: Наука, 2018. — 96 с.
3. Демаков И. В. Совершенствование показателя приведенных затрат для экономической оценки инвестиционного проекта / И. В. Демаков, М. В. Новиков, И. А. Павлова // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 6. — URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15852>.
4. Зоркальцев В. И. Многолетние вариации температур и их влияние на экономику и энергетику / В. И. Зоркальцев. — Новосибирск: ГЕО, 2017. — 179 с.
5. Зоркальцев В. И. Многолетние колебания температур и проблемы надежности топливоснабжения / В. И. Зоркальцев. — Иркутск, 2017. — 84 с.
6. Monte Carlo Simulation approach for economic risk analysis of an emergency energy generation system / H. Zaroni, L. B. Maciel, D. B. Carvalho, E. de O. Pamplona // Energy. — 2019. — Vol. 172. — P. 498–508.
7. Optimal integrated sizing and operation of a CHP system with Monte Carlo risk analysis for long-term uncertainty in energy demands / L. Urbanucci, D. Testi. // Energy Conversion and Management. — 2018. — Vol. 157. — P. 307–316.
8. Uncertain programming of building cooling heating and power (BCHP) system based on Monte-Carlo method / C. Z. Li, Y. M. Shi, S. Liu [et al] // Energy Build. — 2010. — Vol. 42 (1369). — P. 1375.
9. Губий Е. В. О создании энергетических плантаций в России и мире / Е. В. Губий // Стохастическое программирование и его приложения. — Иркутск, 2012. — С. 307–316.

## REFERENCES

1. Khandazhapova I. M., Dagbaeva S. D.-N., Ayusheeva S. N., Sanzheev E. D., Lubsanova N. B., Eremko Z. S. Current Uses of the Territory and Prospects for Socioeconomic Development of the Central Ecological Zone of the Baikal Natural Territory (Republic of Buryatia). *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and natural resources*, 2016, no. S5, pp. 137–143. (In Russian).
2. Gubiy E. V. The effectiveness of energy plantations / E. V. Gubiy, V. I. Zorkaltsev. — Novosibirsk, Nauka Publ., 2018. 96 p.
3. Demakov I. V. Improvement of the cost index for the economic evaluation of the investment project / I. V. Demakov, M. V. Novikov, I. A. Pavlova // Modern problems of science and education. — 2014. — no. 6 — URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15852>.
4. Zorkaltsev V. I. Long-term variations of temperatures and their impact on the economy and energy / V. I. Zorkaltsev. — Novosibirsk: Geo, 2017. — 179 p.
5. Zorkaltsev V. I. Long-term fluctuations of temperatures and problems of reliability of fuel supply / V. I. Zorkaltsev. — Irkutsk, 2017. — 84 p.
6. Zaroni H., Maciel L. B., Carvalho D. B., Pamplona E. de O. Monte Carlo Simulation Approach for Economic Risk Analysis of an Emergency Energy Generation System. *Energy*, 2019, vol. 172, pp. 498–508.
7. Urbanucci L., Testi D. Optimal Integrated Sizing and Operation of a CHP System with Monte Carlo Risk Analysis for Long-term Uncertainty in Energy Demands. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 157, pp. 307–316.

8. Li C. Z., Shi Y. M., Liu S., Zheng Z., Liu Y. Uncertain Programming of Building Cooling Heating and Power (BCHP) System Based on Monte-Carlo Method. *Energy Build*, 2010, vol. 42 (1369), pp. 1375.

9. Gubiy E. V. On creation of energy plantations in Russia and the world / E. V. Depth // Stochastic programming and its applications. – Irkutsk, 2012. – 307–316. (In Russian).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Валерий Иванович Зоркальцев** – ведущий научный сотрудник лаборатории междисциплинарных эколого-экономических исследований и технологий Лимнологического института СО РАН, доктор технических наук, профессор, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: zork@isem.irk.ru.

**Елена Валерьевна Губий** – старший инженер лаборатории энергообеспечения децентрализованных потребителей Института систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: egubiy@gmail.com.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Valery I. Zorkaltsev** – leading Researcher at the Laboratory of Interdisciplinary Environmental and Economic Research and Technology of the Limnological Institute of the SB RAS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Baikal State University Irkutsk, Russian Federation; e-mail: zork@isem.irk.ru.

**Elena V. Gubiy** – senior engineer at the laboratory for energy supply of decentralized consumers of the Institute of Energy Systems of L. A. Melentyev SB RAS, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: egubiy@gmail.com.

#### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Зоркальцев В.И., Губий Е.В. Анализ экономической эффективности природосберегающих технологий / В.И. Зоркальцев, Е.В. Губий // System Analysis & Mathematical Modeling. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 15–21.

#### FOR CITATION

Zorkaltsev V.I., Gubiy E.V. Analysis of economic efficiency of sustainable technologies. System Analysis & Mathematical Modeling, 2020, vol. 2, no. 1, pp. 15–21. (In Russian).