

УДК 681.3.06

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯРИЗИРУЮЩЕГО БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА

С. В. ПРОКОПЧИНА,

*доктор технических наук, профессор кафедры системного
анализа в экономике, Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации,
Москва, Россия*

E-mail: SVProkopchina@fa.ru

В работе предлагается концепция цифровизации социально-экономических процессов на основе регуляризирующего байесовского подхода (РБП) и интеллектуальных байесовских технологий (БИТ) в качестве одного из перспективных направлений создания методологической основы и технологической базы цифровой экономики. Приведено обобщенное уравнение БИТ на основе РБП. Сформулированы основные принципы и свойства БИТ, важные для решения практических задач цифровой экономики. Даны примеры разработанных прикладных систем на основе БИТ, ориентированных на функционирование в условиях информационной неопределенности.

Ключевые слова: мягкие измерения, регуляризирующий байесовский подход, байесовские интеллектуальные технологии, цифровая экономика.

Economic theory

MEASURING ASPECTS OF DIGITIZATION OF SOCIO-ECONOMIC PROCESSES ON THE BASIS OF REGULARIZING BAYESIAN APPROACH

S. V. PROKOPCHINA,

*Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of System
Analysis in Economics, Financial University under
the Government of the Russian Federation,
Moscow, Russia*

E-mail: SVProkopchina@fa.ru

The paper proposes the concept of digitalization of socio-economic processes on the basis of the regulatory Bayesian approach (RBP) and intelligent Bayesian technologies (BITS) as one of the promising areas of the methodological framework and technological base of the digital economy. Given a generalized equation of BITS on the basis of the deferral. The basic principles and properties of BITS important for solving practical problems of the digital economy are formulated. The examples of the developed application systems based on BITS, focused on functioning in the conditions of information uncertainty are given.

Keywords: soft measurements, regulatory Bayesian approach, Bayesian intelligent technologies, digital economy.

Введение. Задачи цифровизации социально-экономических процессов могут быть в информационном аспекте представлены как задачи измерений, оценивания, классификации, кластеризации, аудита (контроля), прогнози-

рования, моделирования, генерации рекомендаций и управленческих решений.

Особое значение имеют задачи измерения характеристик и свойств сложных систем, к которым относятся и социально-экономические.

Измерение является неотъемлемой частью любых задач моделирования, познания, контроля, принятия решений, управления. Поэтому методология измерений непрерывно совершенствуется в соответствии с усложнением решаемых задач.

Одним из современных направлений общей теории измерений является методология интеллектуальных измерений. К этому направлению относятся байесовские интеллектуальные измерения, основой которых выступает применение байесовского подхода при формировании измерительного решения [1–5] и мягкие измерения, основанные на принятии измерительных решений в соответствии с логикой Заде [1, 4].

Термин «мягкие измерения» можно трактовать в широком и узком смыслах.

В широком смысле мягкие измерения понимаются прежде всего как нечеткие измерения, результат которых не определяется конкретным числом.

В узком, строгом смысле этого термина мягкие измерения представляют собой нечеткие, многоальтернативные, условные (результат измерения достоверен в рамках определенных условий эксперимента) измерения с мягкой логикой Заде (формирования решения измерительной задачи) и полным метрологическим обоснованием результатов измерений.

Если критерием выбора измерительных решений является байесовский критерий минимума среднего риска решений, то такие измерения называются байесовскими интеллектуальными измерениями (БИИ). Они основаны на методологии регуляризирующего байесовского подхода (РБП) и байесовских интеллектуальных технологиях (БИТ) [1, 3, 4].

Мягкие измерения, как и БИИ, предназначены для измерения свойств, состояний, динамики, трендов характеристик сложных объектов, процессов и систем в условиях их непрерывного развития и активного взаимодействия с окружающей средой.

Практически все реальные современные экономические системы можно отнести к сложным объектам, функционирующим в условиях неопределенности при мощном влиянии факторов внешней среды. Поэтому концепция мягких измерений (МИ) и БИИ адекватна природе экономических систем.

Основные принципы БИИ и МИ. Рассмотрим некоторые методологические аспекты мягких измерений и БИИ.

Измерения типа БИИ и МИ проводятся в условиях значительной неопределенности относительно точных знаний о модели объекта, условиях и средствах измерений, которые могут быть как приборными, так и с использованием экспертных знаний. Все это вносит неустойчивость в процесс измерений и получаемые решения, поэтому требуется реализация измерений в рамках единого регуляризированного пространства решений.

В качестве образцового объекта, в частности реперов измерительных шкал, могут быть не только числовые значения, но и функции, ситуации, образы объектов, сценарии, которые в совокупности представляют собой условно-полную группу событий, отражаемых реперами носителя шкалы измерений. Такие шкалы могут быть параметрическими, функциональными, системными с соответствующими им реперами в виде значений параметров, образцовых функций и систем.

Задача измерений в условиях неопределенности ставится как задача восстановления значений или метрологической классификации образов, что определяет необходимость обеспечения устойчивости ее решений. Поэтому при сложных измерительных ситуациях используется представление измерительной задачи как совокупности обратных задач восстановления значений, состояний, ситуаций по полученной информации.

Методика измерений может представлять собой сложную информационную технологию.

Для каждого измерительного решения обеспечивается метрологическое обоснование моделей, алгоритмов, решений в виде показателей точности, надежности, достоверности, риска, информативности решений.

Обобщенное уравнение БИИ и МИ. В целях методологической формализации получено обобщенное уравнение для измерений всех типов, в том числе для БИИ и МИ измерений. Уравнения измерений для всех типов классических измерений являются частными случаями данного обобщенного уравнения.

Так, для байесовских интеллектуальных измерений (Bayesian intelligent measurement) уравнение измерений записывается в следующем виде:

$$\{h_{kt}^{(0)} | \{MX\}_{kt}^{(0)}\} | (Y_t^{(0)} \{Y_t^{(OE)} G_t^{(OE)}\}) = \\ = \{\arg\text{extr} C^{(B)}[\phi_j(f_{it} \{X_{it}\} | (Y_t^{(0)} \{Y_t^{(OE)} G_t^{(OE)}\})]\},$$

где $\{h_{kt}^{(0)} | \{MX\}_{kt}^{(0)}\} | (Y_t^{(0)} \{Y_t^{(OE)} G_t^{(OE)}\})$ – нечеткое решение задачи в условиях $Y_t^{(0)}$, (определяе-

мых априорной информацией, требованиями, ограничениями и допущениями) функционирования объекта; в условиях влияющих факторов окружающей среды $Y_t^{(OE)}$; в компактах совокупности свойств объекта $G_t^{(O)}$ и среды $G_t^{(OE)}$;

$\{MX\}_{kt}^{(O)}$ – комплекс метрологических характеристик решений, содержащий показатели точности, надежности, достоверности, риска решения, энтропии, информации по Фишеру;

$C^{(B)}$ – критерий, задающий логику решения задачи; в байесовских интеллектуальных технологиях это байесовский критерий среднего риска решения, в мягких измерениях – логика Заде; в классических измерениях – логика Лукасевича;

φ_j – байесовские интеллектуальные технологии, задающие и реализующие регуляризацию решений;

f_{it} – вычислительные или алгоритмические технологии, используемые для обработки имеющейся первичной информации;

$\{X_{it}\}$ – совокупность потоков информации (данных и знаний), используемых для получения решений.

Уравнение для нечетких измерений отличается тем, что в общем случае может иметь не байесовские критерии вывода решений C . Но его результат, как и в ранее приведенном уравнении, представлен списком альтернативных решений с различными степенями достоверности, которые вычисляются для любого показателя, например для оценки влияющих факторов внешней среды, по модифицированной формуле Байеса [21]:

$$P(h_{kt}^{F_t} | G_t^{(OE)}) = \frac{P^a(h_{kt-1}^{F_t} | G_{t-1}^{(OE)}) \circ P(G_t^{(OE)} | h_{kt}^{F_t})}{\sum_{j=1}^J P^a(h_{jt-1}^{F_t} | G_{t-1}^{(OE)}) \circ P(G_t^{(OE)} | h_{jt}^{F_t})}.$$

Когнитивные измерения (cognitive measurement) организуются при соединении экспериментальной информации $\{X_{it}\}$ и имеющихся данных с оценками, знаниями и решениями

$\{X_{it}^{(st)}\}$ субъекта-измерителя, что уже было предложено и подробно рассмотрено автором. На основании этого уравнение для когнитивных измерений записывается в следующем виде:

$$\{h_{kt}^{(O)} | \{MX\}_{kt}^{(O)}\} | (Y_t^{(O)} Y_t^{(OE)} G_t^{(OE)})\} = \\ = \{\arg\text{exstr } C^{(L)}[\varphi_j(f_{it}\{X_{it}\} \{X_{it}^{(st)}\} | (Y_t^{(O)} Y_t^{(OE)} G_t^{(OE)}))]\}.$$

Отличиями от уравнения измерений по классической схеме измерения физических величин являются: введение в явном виде в уравнение критерия выбора измерительного решения, информационно-технологических преобразований в соответствии с методологией и методикой измерений, влияющих факторов внешней среды, а также условий, формализующих измерительную ситуацию.

К числу основных отличий от классической методологии измерений физических величин относятся также:

1. Обеспечение развиваемости методов, моделей, алгоритмов измерений в зависимости от меняющихся условий измерений.

2. Когнитивность и интерпретируемость, которые обеспечиваются непосредственно в процессе формирования измерительного решения.

3. Возможность использования, обработки и свертки как числовой, так и качественной, лингвистической информации в процессе измерений.

4. Обеспечение устойчивости получаемых решений при интеграции, идентификации моделей систем и их характеристик.

5. Получение измерительных решений не только в виде числовых значений параметров, как при классических измерениях, но и в виде моделей, аудиторских решений, рекомендаций, оценок, выводов, сценариев.

6. Условный характер получаемых решений, т.е. измерительные решения будут справедливы только при выполнении условий эксперимента, а именно: в рамках данного компакта решений, поставленных ограничений, метрологических требований, имеющейся априорной информации.

Измерительный процесс МИ и БИИ имеет еще несколько отличий от классической схемы измерений. Они состоят в следующем.

Измерение реализуется как процесс принятия решений на сопряженных числовых и лингвистических шкалах, называемых шкалами с динамическими ограничениями (ШДО). Такие шкалы представляют собой многомерные метрические компакты, способные изменять свою структуру во времени. Вид ШДО представлен на рис. 1.

Каждому значению измеряемого параметра соответствует значение его достоверности (вероятности или возможности). Таким образом, шкала для измерения значения величины имеет вид двумерной шкалы, у которой по оси абсцисс откладываются значения величины, а по оси орди-

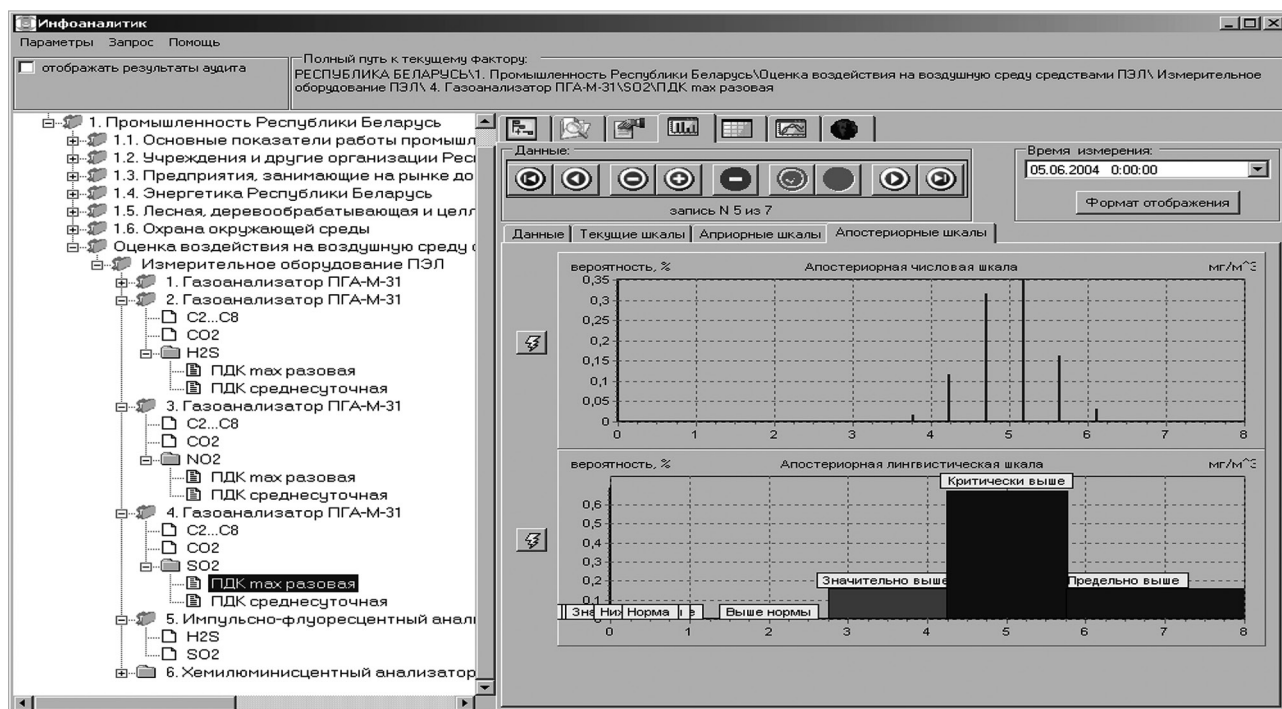


Рис. 1. Пример ШДО с измерительным решением по состоянию воздушной среды в виде многоальтернативного количественного и интерпретированного лингвистического результатов (компьютерное отображение)

нат — их вероятность или возможность. Причем измерительное решение может быть получено как на числовой, так и на сопряженной лингвистической шкале.

Каждое решение МИ и БИИ представляет собой многоальтернативный ряд значений с соответствующими им достоверностями.

В состав ШДО могут входить критериальные шкалы, сопряженные с основными шкалами, что иллюстрирует рис. 1. Одновременно с определением измерительного решения на лингвистической шкале осуществляется проверка решения по критерию нормы. Возможно использование нескольких критериальных сопряженных шкал для многокритериальной проверки.

Модели объектов измерений имеют вид моделей с динамическими ограничениями (МДО), свойства которых могут меняться во времени, в соответствии с чем будут меняться и шкалы ШДО. Подробное описание моделей МДО и шкал ШДО приведено в работах [1–7].

В процессе формирования измерительного решения БИИ и МИ могут использоваться знания и оценки экспертов.

Обобщенное концептуальное уравнение для БИИ и МИ имеет следующий вид:

$$\{h_{k_i}^{(Q)} \mid \{MX\}G_{k_i}^{(Q)}\} = \{\arg \text{extr} C[\varphi(\{X_{ii}\}Y_t^{(OE)}G_t^{(OE)})]\}.$$

Применение методов и средств РБП, БИТ, БИИ и мягких измерений оказалось эффективным при решении многих базовых задач современной экономики (рис. 2).

Эти работы освещены в научных трудах автора и его научной школы как результаты выполненных проектов в России и за рубежом [3–5]. По сути, эти работы являются убедительными примерами решения задач основных направлений цифровой экономики.

Список литературы

1. Опыт решения социально-экономических задач на основе байесовских интеллектуальных технологий / под ред. С. В. Прокопчиной. М., 2014. 447 с.
2. Прокопчина С. В. Концепция байесовской интеллектуализации измерений в задачах мониторинга сложных объектов // Новости искусственного интеллекта. 1997. № 3. С. 7–56.
3. Прокопчина С. В. Методологические аспекты теории мягких измерений / SCM – 2005: м-лы науч. конф. СПб: ЛЭТИ, 2005. С. 49–63.

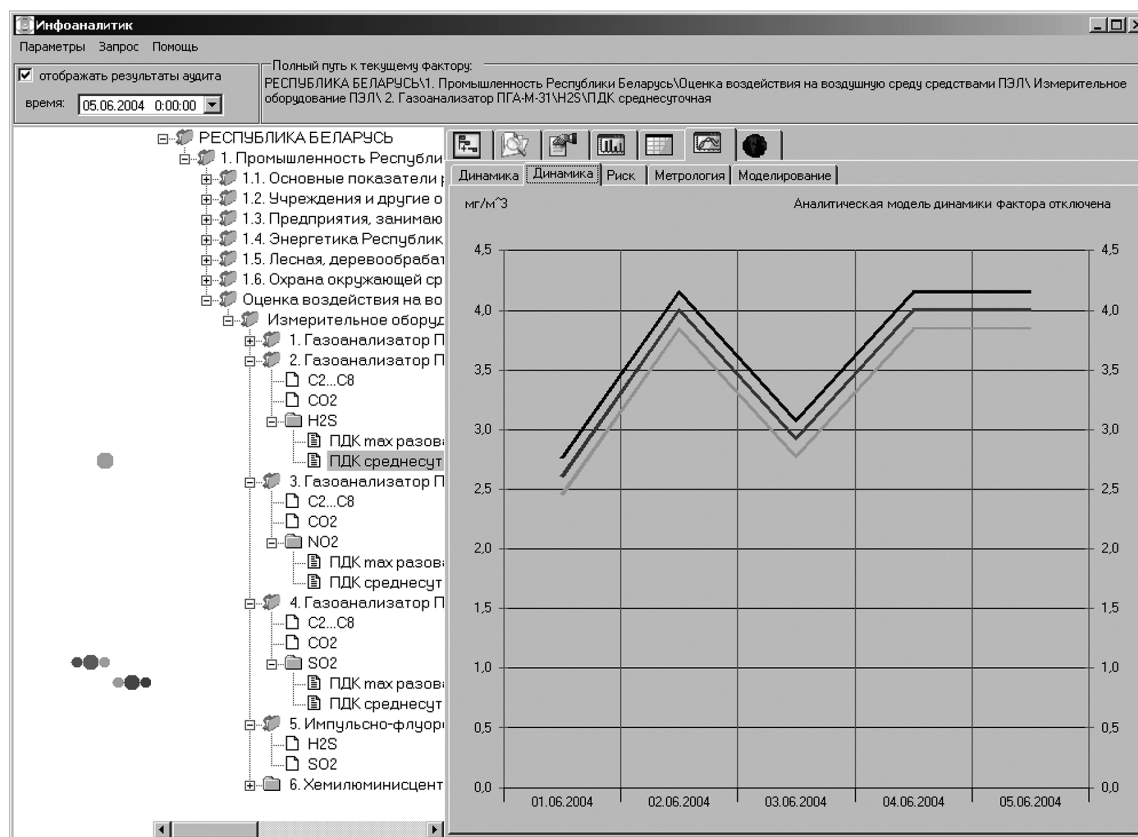


Рис. 2. Нечеткая модель авторегрессии как измерительное решение БИИ на основе МДО (компьютерное отображение)

4. Прокопчина С. В. Методологические основы теории мягких измерений / Мягкие измерения и вычисления. Т. 1. М.: Научная библиотека, 2017. 395 с.
5. Прокопчина С. В., Щербаков Г. А., Ефимов Ю. В. Моделирование социально-экономических систем в условиях неопределенности. М.: Научная библиотека, 2018. 495 с.

References

1. (2014) Experience in solving socio-economic problems on the basis of Bayesian intellectual technologies / ed. by S. V. Prokopchina. Moscow, 447 p.
2. Prokopchina S. V. (1997) Concept of Bayesian intellectualization of measurements in the problems of monitoring of complex objects. *News of artificial intelligence*, no. 3, pp. 7–56.
3. Prokopchina S. V. (2005) Methodological aspects of the theory of soft measurements. *Proceedings of SCM International Conference on Soft Computing and Measurements*, St. Petersburg, LETI, pp. 49–63.
4. Prokopchina S. V. (2017) Methodological foundations of the theory of soft measurements. In: *Soft measurements and calculations. Vol. 1*. Moscow, Scientific library, 395 p.
5. Prokopchina S. V., Shcherbakov G. A., Efimov Yu. V. (2018) Modeling of socio-economic systems under uncertainty. Moscow, Scientific library, 495 p.