

УДК 528.8(15):629.78

А. И. Федякин¹, В. П. Зубко², С. В. Заяц², В. М. Мамчук¹

¹Институт технічної механіки НАНУ—НКАУ, Дніпропетровськ,

²Національне космічне агентство України, Київ

Методологические аспекты оценки эффективности космических систем дистанционного зондирования Земли

Запропоновано методологію оцінки ефективності космічних систем дистанційного зондування Землі, що базується на аналізі економічних, наукових і технічних аспектів, а також враховує стохастичність вихідної інформації.

Оценка эффективности — свойства объекта выдавать полезный результат при использовании его по назначению — важный и неотъемлемый этап при разработке, создании и эксплуатации сложных технических систем, который необходим для обоснования целесообразности разработки, определения оптимальных параметров и др.

Космические системы дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ) предназначены для получения данных о нашей планете с определенными временными, пространственными и спектральными характеристиками. В свою очередь, данные используются в качестве исходной информации для получения различных результатов (эффектов), прежде всего экономического (путем решения многочисленных хозяйственных задач) [1], социального (экологического мониторинга, прогнозирования погоды, предупреждения стихийных бедствий, повышение занятости населения), научного (открытия, изобретения, публикации), технического (улучшение параметров и характеристик, количества и качества информации) и др. Эффекты могут быть получены при разработке, изготовлении и эксплуатации КС ДЗЗ, а возникают от создания добавленной стоимости, рабочих мест, предоставления услуг, продаже (передачи) технологий и т. п. Их можно разделить на прямые, которые связаны с достижением целей проектов, и косвенные, касающиеся видов деятельности, не связанных с достиже-

нием целей проектов. Кроме этого, эффекты подразделяют на внутри- и внеотраслевые, причем последние могут быть значительно больше первых. Количественные оценки этих эффектов являются соответствующими критериями эффективности. Кроме этого, могут рассматриваться различные уровни, например научно-технический, технико-экономический, которые характеризуют совершенство объекта, могут измеряться в баллах и служат для сравнительного анализа.

Экономические критерии должны характеризоваться прибылью, которая получается за счет уменьшения затрат и увеличения доходов от выполнения задач, предотвращения возможных убытков и ущерба за счет использования космических средств.

Критерии научной эффективности должны характеризовать возможность получения и достоверность новых знаний, а также их использования для создания принципиально новых видов техники и технологий, предоставления услуг.

Совокупность критериев социальной эффективности должна включать характеристики улучшения здоровья и качества жизни населения, повышения его занятости, общеобразовательного уровня и квалификации.

Критерии технической эффективности должны характеризовать входные, выходные параметры системы (количество и качество информации, массогабаритные и энергетические показатели и т. п.).

В класс специальных критериев эффективности целесообразно включить те, которые не характеризуют цели, для достижения которых создана КС ДЗЗ, а предназначены для характеристики достоверности достижения поставленных целей, выполнения задач, а также влияния результатов на научно-техническое развитие космической деятельности.

Необходимо отметить, что разграничение тех или иных явлений, характеризующих в чистом виде техническую, экономическую или социальную эффективность на практике осложнено их тесным переплетением. В зависимости от этапов создания КС ДЗЗ, методик оценки и имеющихся исходных данных (ИД), требованиям к критериям, эффективность можно подразделять на потенциальную, ожидаемую и фактическую [4].

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Одним из основных критериев экономической эффективности является чистый дисконтированный доход (ЧДД), определяемый как сумма текущих эффектов за весь расчетный период, приведенная к начальному году, или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (P_t - Z_t) \frac{1}{(1-a)^t}, \quad (1)$$

где P_t , Z_t — результаты и затраты на шаге расчета t , T — горизонт расчета, a — норма дисконтирования.

С ЧДД тесно связан индекс доходности, внутренняя норма доходности и срок окупаемости.

Для создания набора представительных критериев из непредставительных, чтобы охарактеризовать объект, необходимо рассмотреть дополнительное множество критериев, в которое могут входить:

— чистый доход от использования информации с КС ДЗЗ и предупреждения возможных убытков при ее отсутствии;

— потенциальные убытки в будущем, если проект не будет выполнен.

Основной трудностью при оценке потенциальной и ожидаемой экономической эффективности является определение интегральных результатов и затрат. Для примера, сделаем оценку потенциальной экономической эффективности от использования данных ДЗЗ в сельском хозяйстве при выращивании зерновых культур, что очень актуально для Украины.

Исследования [3] и опыт развитых стран показывает, что экономический эффект от сокращения потерь зерна за счет оптимизации его производства

Таблица 1. Показатели валовых сборов зерновых

Год	Валовой сбор зерна, млн тонн
1995	33.93
1996	24.571
1997	35.472
1998	26.471
1999	24.581
2000	24.459
2001	39.671

с использованием аэрокосмической информации составляет 2 % от стоимости урожая. Показатели валового сбора зерновых в Украине по данным Госкомстата приведены в табл. 1.

Средний валовой сбор зерна Q составил

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^7 Q_i}{7} = \frac{209.155}{7} \approx 30 \text{ млн т.}$$

Стоимости одной тонны зерновых по данным НИИЭ МЭ составляла в 2000 г. — 443.8 грн/т, в 2001 г. — 382.8 грн/т, отсюда средняя стоимость тонны зерновых в последние годы примерно равна

$$\Pi_{\text{ср}} = \frac{443.8 \cdot 24.459 + 382.8 \cdot 39.671}{24.459 + 39.671} \approx 406 \text{ грн/т.}$$

Усредненная стоимость Π валового сбора Q зерновых составляет

$$\Pi = \Pi_{\text{ср}} \cdot Q = 406 \cdot 30 \cdot 10^6 \approx 12.2 \cdot 10^9 \text{ грн.}$$

Величину годового экономического эффекта $\mathcal{E}_{\text{эф}}$ от использования данных ДЗЗ в рассматриваемом случае определим по выражению

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{эф}} &= 0.02 \cdot \Pi = 0.02 \cdot 12.2 \cdot 10^9 = \\ &= 244 \text{ млн грн} \approx 45.5 \text{ млн дол. США.} \end{aligned}$$

Прогнозная оценка (ГКБ «Южное») стоимости разработки, создания и эксплуатации национальной КС ДЗЗ «Січ-1М» составляет 75.5 млн дол. США. Таким образом, сопоставление величины экономического эффекта с затратами показывает, что срок окупаемости системы только за счет использования ее данных в сельском хозяйстве не превосходит двух лет с момента начала эксплуатации.

Определим ожидаемый экономический эффект от использования данных ДЗЗ в сельском хозяйстве Украины по значениям экономического эффекта от применения КС ДЗЗ в США, величины которого приведены в табл. 2 [2].

Положим, что потенциальный экономический эффект от использования данных ДЗЗ в отечест-

Таблица 2. Прогнозная экономическая эффективность использования данных ДЗЗ спутника «Лэндсат»

Область применения	Экономическая эффективность, млн дол. США
Сельское хозяйство (растениеводство)	294—581
Землепользование	42—79
Лесное хозяйство	7
Водные ресурсы	13—41
Геологоразведка нефти и других полезных ископаемых	64—200

венном сельском хозяйстве пропорционален отношению уборочных площадей под основными культурами Украины (33.2 млн га) и США (200 млн га).

Значения нижней $\mathcal{E}_{\text{эф}}^{\text{н}}$ и верхней $\mathcal{E}_{\text{эф}}^{\text{в}}$ оценок эффекта с учетом данных табл. 1 и 2 в этом случае будут равны

$$\mathcal{E}_{\text{эф}}^{\text{н}} = \frac{33.2}{200} 294 = 48.8 \text{ млн дол. США,}$$

$$\mathcal{E}_{\text{эф}}^{\text{в}} = \frac{33.2}{200} 581 = 96.4 \text{ млн дол. США.}$$

Таким образом, нижняя оценка потенциального годового эффекта, полученная на основании рассмотренных исходных данных, хорошо согласуется с оценкой, полученной согласно первому подходу.

ОЦЕНКА НАУЧНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Целью научных исследований, включая космические, является открытие новых объектов и процессов, получение информации об их свойствах, а также уточнение представлений о ранее открытых и наблюдавшихся явлениях. Одним из критериев эффективности разрабатываемых КС ДЗЗ на этапе проектирования может служить предполагаемая степень результативности планируемых исследований, которая зависит в основном от двух факторов: полноты решения научной задачи и надежности космического комплекса [1].

Полнота решения задачи ДЗЗ количественно может быть выражена как вероятность P_3 обнаружения и опознавания объектов или процессов. Надежность КС ДЗЗ (надежность получения данных об исследуемой области) характеризуется вероятностью $P_{\text{н}}$ его безотказной работы. Таким образом, научная эффективность R использования космической системы ДЗЗ (результативность исследований) может быть охарактеризована выражением [1]

$$R = P_3 P_{\text{н}}.$$

При наличии априорной информации о средних значениях параметров исследуемых объектов, об элементах корреляционной матрицы этих параметров и о вероятности наличия распознаваемых объектов в момент проведения бортовой аппаратурой необходимых измерений вероятность P_3 обнаружения и опознавания объектов может быть представлена в виде [1]

$$P_3 = P_D(r)P_{\Delta_B}(b)P_{T_{\Pi}}(t)P(M)P(\delta), \quad (2)$$

где $P_D(r)$ — вероятность обнаружения космической системой объекта исследования, $P_{\Delta_B}(b)$ — вероятность выделения объекта на фоне других объектов, $P_{T_{\Pi}}(t)$ — вероятность наблюдения объекта, $P(M)$ — вероятность правильной интерпретации объекта, $P(\delta)$ — вероятность отсутствия облачности в районе наблюдений.

Методика определения P_3 по формуле (2) дана в работе [1].

ОЦЕНКА СОЦИАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

К критериям социальной эффективности относятся:

— увеличение числа рабочих мест $N_{\text{рм}}$, которое может быть обосновано на прогнозировании значения добавленной стоимости:

$$N_{\text{рм}} = \frac{D_{\text{н}}}{D},$$

где $D_{\text{н}}$ — добавленная стоимость, которая будет получена в результате выполнения проекта, D — добавленная стоимость выполненного проекта;

— количество людей, повысивших уровень квалификации (определяется путем прогнозирования временных рядов на основании статистических данных по выполненным проектам для групп: молодые специалисты, поступившие в аспирантуру, защитившие диссертации, другие);

— содействие развитию малого и среднего бизнеса, что определяется количеством предприятий малого и среднего бизнеса задействованных в реализации проектов ДЗЗ, а также числом экономически привлекательных сфер деятельности для создания предприятий малого и среднего бизнеса;

— помощь в деятельности общественных и молодежных организаций (число лекций, популярных телепередач, статей и т. п.);

— услуги, способствующие улучшению здоровья и увеличению продолжительности жизни населения Украины (прогноз погоды, экологический мониторинг, городское планирование);

— повышение уровня образования (число конференций, выпускников высших учебных заведений,

специалистов, защитивших ученые степени;
 — увеличение занятости в космической отрасли и смежных отраслях.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Вероятность достижения поставленных целей равна

$$P_{\alpha} = \int_{V_{11}}^{V_{21}} \int_{R_1}^{R_2} \int_{t_1}^{t_2} P(V, t, R) f(V) f(t) f(R) dV dt dR,$$

где $P(V, t, R)$ — функция вероятности достижения целей, зависящая от объема финансирования V , времени его получения t и необходимых материальных ресурсов R , которые при определенных условиях можно принять за случайные величины; $f(V)$, $f(t)$, $f(R)$ — плотности распределения V , t , R .

Влияние разработок, относящихся к ДЗЗ, на научно-техническое развитие предприятий и космической отрасли характеризуется количеством новых технологий, реализованных проектов и программ.

Достоверность P_{np} выполнения N_{np} новых проектов:

$$P_{np} = \prod_{i=1}^{N_{np}} P_i,$$

где

$$P_i = \int_{V_{11}}^{V_{21}} \int_{R_1}^{R_2} \int_{t_1}^{t_2} P(V, t, R) \prod_{i=1}^3 f_i(x_i) \cdot P \left[\nu_{ip} \geq \leq \nu_i \right].$$

При условии учета стохастичности исходной информации полной характеристикой показателя эффективности является закон распределения.

Рассмотрим на простом примере задачу, в которой требуется определить закон распределения \bar{F}_E эффективности за заданный период τ_3 .

Будем считать, что рассматриваемая система состоит из двух различных не резервированных приборов с производительностями γ_1 и γ_2 (пусть $\gamma_1 > \gamma_2$). Время работы каждого прибора определяется временем его безотказной работы и подчинено экспоненциальному закону распределения с интенсивностью отказов λ . Под эффективностью системы будем понимать суммарный объем информации (данных), произведенный двумя приборами.

Понятно, что отказ любого прибора в течение τ_3 может привести к некоторому снижению эффективности системы в целом. Поэтому суммарный результат системы будет определяться временем τ_1 работы 1-го прибора и временем τ_2 работы 2-го прибора. При безотказной работе приборов объем выходной информации будет определяться заданным временем τ_3 . Учитывая это, можно записать

$$E = Q_1(\tau_1) + Q_2(\tau_2), \tag{3}$$

где

$$Q_j(\tau_j) = \begin{cases} q_j \tau_j, & \text{если } \tau_j < \tau_3, \\ q_j \tau_3, & \text{если } \tau_j \geq \tau_3, \end{cases} \quad j = 1, 2. \tag{4}$$

Здесь $q_j = c_j \gamma_j$, c_j — средняя за время τ_3 стоимость единицы информации (снимка) прибора j (пусть $c_j = 1$); τ_j — время безотказной работы прибора j с плотностью вероятности

$$f_j(\tau_j) = \lambda \exp(-\lambda \tau_j), \quad j = 1, 2. \tag{5}$$

Принимая во внимание (3)—(5), определим закон распределения эффективности E как закон распределения функции случайных величин τ_1 и τ_2 .

С использованием теории функции случайных величин получены следующие выражения закона распределения эффективности:

$$\begin{aligned} P(E < E^*) \Big|_{D_Q^3} &= P \left(\tau_1 + \frac{\tau_2 \gamma_2}{\gamma_1} < \frac{E^*}{\gamma_1} \right) \Big|_{D_{\tau}^{3'}} + \\ &+ P \left(\tau_1 + \frac{\tau_2 \gamma_2}{\gamma_1} \geq \frac{E^*}{\gamma_1} \right) \Big|_{D_{\tau}^{3''}} + P \left(\tau_1 + \frac{\tau_2 \gamma_2}{\gamma_1} \geq \frac{E^*}{\gamma_1} \right) \Big|_{D_{\tau}^{3'''}} = \\ &= \lambda^2 \int_0^{\frac{E^*}{\gamma_1}} \int_0^{\frac{E^*}{\gamma_2} - \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \tau_1} \exp[-\lambda(\tau_1 + \tau_2)] d\tau_1 d\tau_2 + \\ &+ \lambda^2 \int_0^{\frac{E^*}{\gamma_1} - \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \tau_3} \int_{\frac{E^*}{\gamma_2} - \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \tau_1}^{\infty} \exp[-\lambda(\tau_1 + \tau_2)] d\tau_1 d\tau_2 + \\ &+ \lambda^2 \int_{\frac{E^*}{\gamma_2} - \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \tau_3}^{\infty} \int_0^{\frac{E^*}{\gamma_1} - \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \tau_2} \exp[-\lambda(\tau_1 + \tau_2)] d\tau_1 d\tau_2 = \\ &= 1 - \frac{1}{\gamma_2 - \gamma_1} \left\{ \gamma_2 \exp \left[-\frac{\lambda}{\gamma_1} [E^* - (\gamma_2 - \gamma_1) \tau_3] \right] - \right. \\ &\quad \left. - \gamma_1 \exp \left[-\frac{\lambda}{\gamma_2} [E^* - (\gamma_1 - \gamma_2) \tau_3] \right] \right\}. \end{aligned}$$

Таким образом, на участке от 0 до $(\gamma_1 + \gamma_2) \tau_3$ функция является кусочно-гладкой, а в точке $(\gamma_1 + \gamma_2) \tau_3$ — имеет разрыв.

Для сравнительного анализа при оценке эффективности в табл. 3 приведены технико-экономические данные космических систем ДЗЗ.

1. Авдудевский В. С., Успенский Г. Р. Народнохозяйственные и научные космические комплексы. — М.: Машиностроение, 1985.—416 с.
2. Исаченко И. И. Космос и экономика: (характер взаимодействия)

Таблица 3. Техничко-экономические показатели космических систем ДЗЗ

Название, основные характеристики системы	Стоимость, млн долл. США
«Landsat», США «Landsat-1, 2, 3» (1972, 1975, 1978) Масса — 0.95 т, многоспектральное сканирующее устройство (МСУ) с разрешающей способностью 60 м	Общие затраты на программу «Landsat» по состоянию на 1990 г. — 1000 Затраты на создание и эксплуатацию первых трех КА по состоянию на 1978 г. — 251, в том числе: НИР — 34; разработка и изготовление КА — 149; создание и эксплуатация центра обработки данных — 54; закупка трех ракет-носителей — 14
«Landsat-4, -5» (1982 и 1984 гг.) Масса — 2.2 т, МСУ с разрешающей способностью 30 м	Общие затраты на систему по состоянию на 1983 г. — 645, в т. ч. на разработку КА — 570; ежегодные расходы на эксплуатацию — 20.
«Landsat-6» (1993, потерян во время запуска) Масса — 2.75 т, МСУ с разрешающей способностью 30 м	Общая сумма затрат на систему — 256.5; МСУ — 92; запуск — 36.5; модернизация наземной станции — 2.9
«Landsat-7» (1999) Масса — 2.75 т, МСУ с разрешающей способностью 15 м	Общая сумма затрат на систему — 750; МСУ — 200
«Spot» (Франция, Швеция, Бельгия) «Spot-1» (1986), «Spot-2» (1990), «Spot-3» (1993) «Spot-4» (1998), «Spot-5» (2002) Оптический сканер HRS с панхроматическим и многозональным режимами с разрешающей способностью 10 м и 20 м соответственно. Дополнительно на «Spot-4, -5» прибор «Vegetation» (4 канала с разрешением 1 км при полосе обзора 2250 км). На «Spot-5» HRS с разрешающей способностью 5 м (2.5 м при наземной спец. обработке) и 10 м соответственно.	Полные затраты на систему, включая ее эксплуатацию в течение 2 лет — 800. Затраты на создание и запуск «Spot-1» — 315. Затраты на создание «Spot-2» — 130. Ежегодные расходы на эксплуатацию системы с двумя спутниками («Spot-1, -2») — 30. Затраты на каждую из систем «Spot-3, -4» оцениваются в 350
ERS, Европейское космическое агентство (ESA) ERS-1 (1991), ERS-1 (1995) Масса — 2.4 т, активный микроволновой прибор АМІ (режим радиолокатора или скаттерометра), альтиметр (высотомер), радиометр.	Затраты на создание системы — 900. Годовые расходы на эксплуатацию — около 52
«Envisat-I», ESA (1998) Масса — 8 т, длина — 10 м, ширина — 3 м Мощность солнечных батарей — 6.5 кВт. Оснащен 10 приборами для ДЗЗ.	Общие затраты на осуществление программы — 2200, в т.ч.: на создание КА — 850, на создание наземного сегмента — 185
JERS-1, Япония (1992) Масса — 1.4 т, оснащен многозональной оптической системой с разрешением 18x24 м и радиолокатором с разрешением 18 м	Общие затраты на систему, включая эксплуатацию — 500, в т. ч. на создание КА — 350
«Radarsat-1», Канада (1995) Масса — 3.15 т, радиолокатор с синтезированной апертурой с разрешающей способностью 25 м	Затраты на создание КА — 500
СВЕРС-1, -2, Бразилия — Китай (1996, 1999) Масса — 1.4 т, оптический сканер с разрешением 20 м	Общие затраты на создание системы — 200

- ствия в условиях капитализма). — М.: Мысль, 1979.—228 с.
3. Монокрович Э. И. К расчету экономического эффекта от использования агрометеорологической информации в производстве зерна // Экономическая эффективность гидрометеорологического обеспечения сельского хозяйства: Тр. казах. регионального научно-исслед. ин-та. — М.: Моск. отд. гидрометеоздата, 1982.—С. 3—14.
4. Николаев В. И., Брук В. М. Системотехника: методы и приложения. — Л.: Машиностроение, 1985.—199 с.

METHODOLOGY ASPECTS OF EFFICIENCY ESTIMATION OF SPACE REMOTE SENSING SYSTEMS

A. I. Fedyakin, V. P. Zubko, S. V. Zayats, B. M. Mamchuk

We propose the methodology of efficiency estimation of space remote sensing systems on the basis of the analysis of some economic, scientific and technical aspects with consideration for input information stochastic.