

УДК 658.512.6

О.И. Лахин, руководитель направления аэрокосмических систем,
e-mail: lakhin@smartsolutions-123.ru

И.В. Майоров, руководитель отдела математического моделирования,
e-mail: imayorov@smartsolutions-123.ru
НПК «Разумные решения»

Метод адаптивного планирования грузопотока РС МКС на основе мультиагентной технологии

Постановка проблемы: Рассматривается задача построения плана грузопотока Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС). Построение стратегических и тактических планов полета, доставки, возврата, утилизации и размещения на РС МКС грузов, в составе которых имеется более 3500 наименований объектов, сложная и трудоемкая задача, при решении которой необходимо учитывать множество факторов, ограничений и предпочтений, таких, как изменяющиеся потребности в топливе, воде и продовольствии, баллистика и солнечная активность, особенности типов кораблей и стыковочных модулей. События изменения дат старта и посадки, стыковки или отстыковки, состава экипажа и других параметров оказывают влияние на программу полетов и план грузопотока, что требует динамического перепланирования в цепочке изменений связанных между собой параметров, которые должны быть уточнены, пересчитаны и согласованы. Задача представлена в виде динамического баланса интересов между потребностями и возможностями. **Методы:** Предлагается метод адаптивного планирования грузопотока РС МКС в реальном времени, учитывающий приоритеты грузов. В основе данного метода лежат мультиагентные технологии для разрешения конфликтов путем переговоров агентов. Данный метод способен гибко и эффективно адаптировать план грузопотока РС МКС по событиям в реальном времени. **Результаты:** Разработанный метод применяется в интерактивной мультиагентной системе построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС. **Практическая значимость:** Разработанная система на основе мультиагентных технологий внедрена в промышленную эксплуатацию и применяется для планирования грузопотока РС МКС. Система обеспечивает следующие преимущества: построение плана грузопотока РС МКС, близкого по своим параметрам к создаваемым опытными диспетчерами; гибкая и быстрая оперативная реакция на события, требующие перепланирования грузопотока; сокращение ручного труда и

повышение оперативности в принятии решений – в 2-3 раза; возможность мониторинга и контроля исполнения планов в реальном времени.

***Ключевые слова:** поддержка принятия решений, адаптивное планирование, мультиагентная технология, планирование грузопотока, события.*

Введение

Обеспечение жизнедеятельности и проведение научных исследований на борту Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) требуют постоянного планирования доставки различных грузов, их возврата или утилизации, включая научную аппаратуру для космических экспериментов, запасных частей, материалов и инструментов для ремонтов, запас топлива, воздуха, воды и пищи для космонавтов, результатов космических экспериментов и т.п.

Построение стратегических и тактических планов полета, а также доставки, возврата, утилизации и размещения на РС МКС грузов, в составе которых имеется более 3500 наименований объектов, сложная и трудоемкая задача, при решении которой необходимо учитывать множество факторов, ограничений и предпочтений, таких, например, как изменяющиеся потребности в топливе, воде и продовольствии, баллистика и солнечная активность, особенности типов кораблей и стыковочных модулей и т.д. При этом любое событие может оказывать влияние на программу полетов и план грузопотока, например, изменение дат старта и посадки, стыковки или отстыковки, состава экипажа и других параметров, что требует динамического перепланирования в цепочке изменений связанных между собой параметров, которые должны быть уточнены, пересчитаны и согласованы соответствующим образом.

Для решения такого класса сложных и динамичных задач все чаще применяется мультиагентный подход [1-2] – одно из наиболее перспективных направлений в области искусственного интеллекта (ИИ), в котором поиск решения сложной задачи может выполняться распределенным образом, с использованием принципов самоорганизации и эволюции, присущих живым организмам [3-5]. В развиваемом подходе используется

концепция сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей), в которой любой план строится как гибкая (перестраиваемая по событиям) сеть связей агентов потребностей (заявок) и возможностей (ресурсов) [6-7].

В настоящей работе рассматривается метод адаптивного планирования грузопотока РС МКС, развивающий предложенный ранее метод сопряженных взаимодействий в ПВ-сетях за счет использования приоритетов грузов. Показываются преимущества разработанного решения для адаптивной обработки событий, не требующей останова и перезапуска системы, а также перспективы его развития.

1. Задача планирования грузопотока РС МКС

Для формулировки математической постановки задачи планирования ресурсов транспортных кораблей предполагается, что каждый из запросов (заказов) на ресурсы и каждый ресурс могут иметь собственные критерии принятия решений (например, сроки, себестоимость, риск и другие), причем их важность может изменяться в ходе выполнения задач.

Для унификации критериев, предпочтений и ограничений для заявок и ресурсов вводится понятие удовлетворенности соответствующих агентов.

Структуру планов грузопотока РС МКС можно описать через набор планов ресурсов и заказов на доставки, возврат или утилизацию грузов, где на нижнем уровне ресурсы представлены конкретными местами в транспортном корабле. Заказы на этом уровне - элементарные грузы, не делимые на составляющие. Более крупные планы - контейнеры для оборудования и баки для размещения топлива, воды и газов и т.д.

При этом каждому плану уровня h (полета транспортного корабля, контейнеров для грузов, баков для топлива и т.п.) ставятся в соответствие цели ресурсов и заказов, состояние которых описывается через функции удовлетворенности $u^{res h}_j$ по критериям i из множества $\{x_i^h\}$ с весом $\alpha^{res h}_{ij}$, показывающие, насколько критерии отклоняются от желаемых значений $x_{ij}^{id h}$ для данного ресурса j по плану h . Функции удовлетворенности задаются в кусочно-линейном виде по аргументам. Значения функций удовлетворенности лежат в сегменте от 0 до 1. Критерии сворачиваются аддитивным способом в единую функцию удовлетворенности. В данной

модели целевая функция ресурсов (*res*) на плане уровня *h* по удовлетворенности зависит от отклонения критериев x_i^h , от значений критериев на предшествующем уровне *h-1* и значений удовлетворенности ресурсов и задач на выбранном уровне плана. Аналогично может быть задана функция с весом $\beta^{task\ h}_{mn}$ удовлетворенности заказов (задач) $u^{task\ h}_n$ на уровне плана *h*, в качестве критериев рассматривается множество $\{y_n^h\}$. На уровне таких планов для ресурсов и задач вводятся приоритеты $\{w_j^{res\ h}\}$ и $\{w_n^{task\ h}\}$ соответственно. Тогда задача оптимизации плана доставки грузов сводится к максимизации удовлетворенности ресурсов и заявок для планов уровня $h=1..H$:

$$u^h = u^{res\ h} + u^{task\ h} =$$

$$\sum_j w_j^{res\ h} u_j^{res\ h} + \sum_n w_n^{task\ h} u_n^{task\ h} = \sum_j w_j^{res\ h} \sum_i \alpha_{ij}^{res\ h} f_{ij}^{res\ h}(x_i^h - x_{ij}^{id}, x_i^{h-1}, f_{ij}^{res\ h-1}) + \sum_n w_n^{task\ h} \sum_m \beta_{mn}^{task\ h} f_{mn}^{task\ h}(y_m^h - y_{mn}^{id}, y_n^{h-1}, f_{mn}^{task\ h-1})$$

$$x^{res\ h*} = \max_{x_i^h}(u^{res\ h}) \quad (1)$$

$$y^{task\ h*} = \max_{y_m^h}(y^{task\ h})$$

где $x^{res\ h*}$ и $y^{res\ h*}$ - оптимальные значения критериев переменных ресурсов и задач для планов уровня *h*. Для плана нижнего уровня 1 функции компонент удовлетворенности f_{ij} при $h=1$ зависят только от отклонений аргументов,

$$x_i \in D^I, y_m \in D^M \quad \forall i, j, \quad I = Dim(D^I), M = Dim(D^M)$$

Переменные *x* и *y* лежат в области критериев ресурсов D^I и D^M заявок, *I* и *M* – размерности соответствующих пространств.

Таким образом, задача планирования сформулирована в системе как задача максимизации удовлетворенности всех участников. Рекурсивность задачи (1) по уровню планов и нелинейность по зависимостям от решений на предшествующем уровне, допускает итерационное решение при помощи “вложенных” сетевых мультиагентных планировщиков, что доказывается результатами экспериментальной реализации в различных приложениях.

В результате, получаемое решение (“хорошее расписание”) должно быть найдено как баланс (равновесие) интересов заказов и ресурсов, что может достигаться выявлением и разрешением конфликтов путем переговоров и согласованным принятием решений всех тех участников, на состояние которых может оказать влияние очередное новое событие.

2. Предлагаемый подход к решению задачи

В предлагаемом подходе решение любой сложной задачи распределения, планирования и оптимизации ресурсов рассматривается как поиск баланса интересов всех участников, что достигается путем выполнения последовательных приближений, от самого грубого, простого, но быстро получаемого решения – к более сложным и лучшим решениям, что важно для оперативной и гибкой адаптации планов по событиям в реальном времени.

В этих целях предлагается набор базовых программных агентов, которые стараются добиться заданных им целевых установок (идеальных значений показателей), и даже получив максимум возможного в текущей ситуации, не оставляют попыток их улучшить.

Например, груз при планировании хочет быть доставлен точно в срок и с минимальной ценой, а транспортный корабль - максимально эффективно использован, т.е. не иметь недогруза или перегрузки. Груз получает активность и быстро размещается в расписание на первое свободное место в корабле, но дальше может активироваться сам корабль, который будет оценивать свое состояние и пытаться его улучшить за счет привлечения недостающих ему грузов.

Выигрыш в эффективности при использовании мультиагентных технологий достигается за счет перехода к принятию решений “по ситуации” в реальном времени, когда пользователь, а в будущем, и сама система, смогут управлять важностью критериев.

Разработанный подход основан на концепции “холона”, предложенного для построения мультиагентных систем в работе [8], где допускается вложенность и связанность многоуровневых планов и впервые были введены

специальные классы агентов “заказов ”(грузов), “продуктов” (в данном случае, полетов) и “ресурсов” (транспортных кораблей), а также “штабной агент” для координации решений.

Такой подход применяется для решения задачи многокритериального планирования заказов на ресурсы, в числе критериев для рассматриваемой задачи традиционно рассматриваются приоритеты грузов, объемы, типы, риски и другие. Реализация мультиагентного подхода для решения рассматриваемой задачи адаптивного планирования грузопотока основана на использовании разработанной ранее концепции сетей потребностей и возможностей и метода сопряженных взаимодействий для управления ресурсами на виртуальном рынке в реальном времени [5,9].

Требование “реального времени” здесь напрямую связано с обеспечением эффективного использования ресурсов, поскольку появление задержек в принятии решений о распределении ресурсов может привести к потере качества обеспечения РС МКС или к полному срыву сроков поставки грузов. В таких условиях, когда ни число заказов, ни число ресурсов заранее не известны, применение классических методов распределения, планирования и оптимизации ресурсов чаще всего оказывается неприемлемым на практике.

Предлагается использовать метод, развивающий разработанный ранее метод сопряженных взаимодействий за счет использования приоритетов, позволяющий решать задачи управления распределением разнородных ресурсов РС МКС в реальном времени.

3. Модификация метода сопряженных взаимодействий

Предлагаемый метод учитывает особенности планирования грузопотока на РС МКС и приоритеты грузов различного назначения. Модифицированный метод состоит из двух фаз: первоначальной инициализации размещения грузов по полетам и проактивного улучшения состояний заказов и грузов.

Предполагается, что потребности в грузопотоке изначально заданы и имеется начальная программа полета. У всех грузов грузопотока заданы

массы грузов, их типы и виртуальные стоимости, и временной диапазон доставки.

При поступлении новой заявки на размещение груза происходит следующее:

1. Иницируется создание нового агента груза.
2. Агент нового груза опрашивает агентов запусков (полетов) транспортных кораблей, включенные в план полета РС МКС, относительно принципиальной возможности планирования доставки в рамках данного полета, и получает от них ответы.
3. Агент нового груза анализирует и ранжирует возможные варианты по их выгоды для себя (оценка осуществляется в соответствии со степенью соответствия варианта требованиям нового груза, упорядоченных по степени важности).
4. Если свободного места на выбранном грузом полете транспортного корабля достаточно для размещения (груз проходит по весу и объемам), доставка данного груза включается в план грузопотока.
5. Начинаются переговоры по разбору конфликта и поиску его разрешения путем перемещения непосредственно конфликтующих грузов между полетами, а также тех, кто вовлекается в конфликты далее, причем используются протоколы разрешения конфликтов, связанные со сдвигами в пределах ресурса, вытеснением на другой ресурс и обменов между ресурсами.
6. Порядок активации агентов зависит от приоритетов групп грузов и ситуации, складывающейся в ПВ-сети.
7. Каждый агент на этапе проактивного улучшения планов делает попытку улучшить свое размещение для повышения функции удовлетворенности.
8. Работа метода завершается, когда ни один агент более не может улучшить ситуацию, вышло время для планирования, или решение не существенно улучшается в пределах заданного порога.

В результате, получаемая ПВ-сеть представляет собой пример самоорганизующейся системы, формирующей и изменяющей расписания ресурсов, а также адаптирующей свое поведение под действием событий, происходящих в реальном времени.

4. Оценка эффективности метода адаптивного планирования грузопотока РС МКС

Для оценки эффективности разработанного метода адаптивного планирования грузопотока РС МКС было проведено экспериментальное исследование зависимости времени обработки событий и формирования нового плана грузопотока от загруженности грузами транспортного средства.

Решение поставленной задачи производилось с применением одного из точных методов решения, в качестве которого использовался метод ветвей и границ, и модификации метода сопряженных взаимодействий.

В проведенной серии экспериментов задавалось от 100 до 1000 грузов. Результаты испытаний на одних и тех же детерминированных наборах исходных данных (рис. 1) показали, что:

- модифицированный метод сопряженного взаимодействия находит допустимые решения за меньшее время, чем точный метод ветвей и границ;
- значения целевых функций, найденные модифицированным методом сопряженных взаимодействий, имеют отклонение от глобального экстремума в пределах 10-15 %.

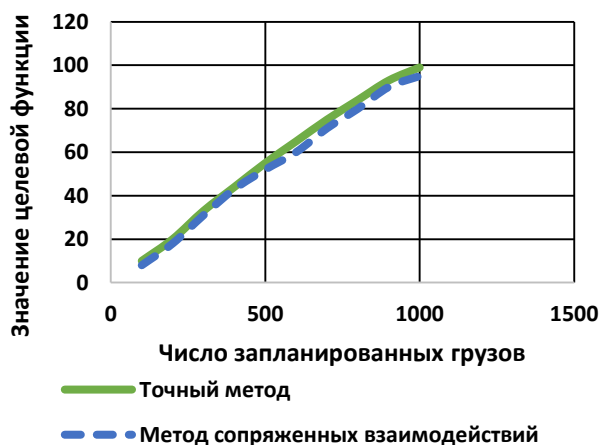
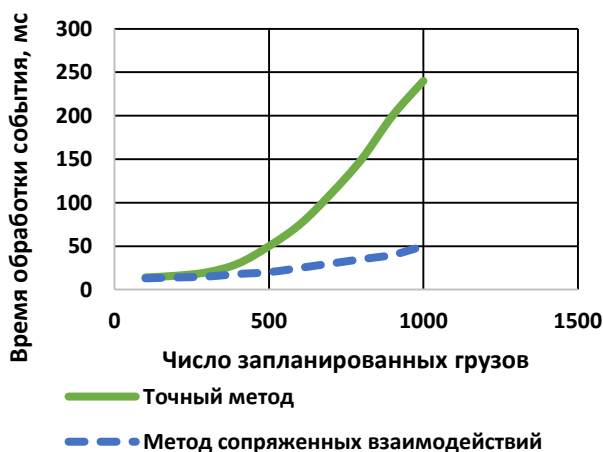


Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований скорости формирования нового плана по событию

Исходя из результатов проведенного экспериментального исследования можно сделать вывод, что для решения на практике рассматриваемой задачи модифицированный метод сопряженных взаимодействий является более предпочтительным.

Во второй серии экспериментов (1000 грузов), где сравнивались бесконфликтная фаза планирования с проактивной фазой планирования модифицированного метода сопряженных взаимодействий, адаптивный алгоритм планирования показал почти 15% преимущество над неадаптивным, использующим бесконфликтное планирование грузов в порядке поступления.

В третьей серии экспериментов оценивалась производительность системы, были проведены экспериментальные исследования по нагрузочному тестированию, которые показали, что время обработки поступающих событий в систему приемлемо при одновременной работе 150 пользователей, практически не имея деградации с равномерным ростом числа пользователей.

Эксперименты показали, что применение метода адаптивного планирования грузопотока РС МКС на основе мультиагентных технологий, базирующегося на принципах самоорганизации и эволюции, показали свое преимущество, и подтвердили свою работоспособность и эффективность для решения задачи планирования грузопотока РС МКС, при этом обеспечивая оперативность и гибкость при перестроении плана грузопотока РС МКС по событиям в реальном времени.

Заключение

Рассмотрена постановка задачи и метод адаптивного планирования грузопотока, применяемый при создании интеллектуальной системы управления грузопотоком РС МКС на основе мультиагентной технологии.

В данной реализации системы планирования грузопотока применение мультиагентных технологий обеспечивает следующие преимущества:

- построение плана грузопотока РС МКС, близкого по своим параметрам к создаваемым опытными диспетчерами;
- гибкая и быстрая оперативная реакция на события, требующие перепланирования грузопотока;
- возможность согласования полученных планов всеми участниками процесса планирования;
- сокращение ручного труда при планировании грузопотока, а также сложности и трудоемкости расчетов;
- повышение оперативности в принятии решений – в 2-3 раза;
- возможность мониторинга и контроля исполнения планов в реальном времени;
- уменьшение зависимости от человеческого фактора, включая ошибки.

Разработанная система внедрена в промышленную эксплуатацию в ОАО «РКК «Энергия» и применяется для планирования грузопотока РС МКС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ.

Список литературы

1. **Wooldridge, M.** An Introduction to Multi-Agent Systems. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, England, 2002. 340 p.
2. **Vos, S.** Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling, eds A Nareyek, Springer-Verlag, Berlin, 2001. P. 1–23.
3. **Fatos Xhafa, Ajith Abraham.** Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications, Springer Publishing Company, Incorporated, 2008. 342 p.
4. **Gongfa, L.** A hybrid particle swarm algorithm to JSP problem // IEIT Journal of Adaptive & Dynamic Computing, 2011. P. 12–22.
5. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing Complexity, Southampton, UK, WIT Press, 2014. 202 p.

6. **Виттих, В. А., Скобелев, П. О.** Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия, 2009, №2. С. 78–87.
7. **Виттих В.А., Скобелев П.О.** Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика, 2003, №1. С. 177–185.
8. **Vittikh, V.A., Larukhin, V.B., Tsarev, A.V.** Actors, Holonic Enterprises, Ontologies and Multi-Agent Technology // Proc. of 6th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2013), August 26 – 28, 2013, Prague, Czech Republic. Springer, 2013. P. 13–24.
9. **Skobelev, P.** Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry. Paulo Leitão, Stamatis Karnouskos (Ed.). Elsevier, 2015. P. 207–230.

The Adaptive Scheduling Method for International Space Station Cargo Flow based on Multi-Agent Technology

O. I. Lakhin, Head of AeroSpace Center at “Smart Solutions” Ltd., e-mail :

lakhin@smartsolutions-123.ru,

443013 Samara, Russian Federation

I. V. Mayorov, Head of Mathematics & Modeling Department at “Smart Solutions” Ltd., e-mail: imayorov@smartsolutions-123.ru

443013 Samara, Russian Federation.

Date received 28.08.15

Problem statement:

The problem real time cargo flow scheduling for International Space Station (ISS) is considered. The problem of strategic and tactical scheduling of flight plans, delivery, return, disposal and allocation of ISS cargo flow, including more than 3500 entities, is very complex and time-consuming. In order to solve this problem it is important to consider numerous factors, constraints and preferences, such as changing fuel, water and supplies demand, ballistics and solar activity,

particular types of spaceships and docking modules. Changes in dates of launch, landing, docking and undocking, crewmembers number or other parameters affect the flight program and cargo flow. These changes cause dynamic re-scheduling in the chain of changes of interconnected parameters that would be specified, recalculated and coordinated. The problem is formalized as a dynamical balance of interests (consensus) between orders and resources.

Methods: *The method of real-time adaptive cargo flow re-scheduling is proposed. The method is based on multi-agent technology for conflicts discovery and solving by agents negotiations. ISS cargo flow scheduling method develops the suggested method of conjugate interactions in the Demand-Resource Networks (DRN) by using cargo priorities. Advantages of the suggested solution for adaptive events processing without system stop and restart are shown. Benefits of the method include high flexibility and efficiency for event-driven adaptation of cargo schedules in real time.*

Results: *The developed method was implemented in multi-agent system for ISS cargo scheduling with the use of multi-agent platform for real time scheduling.*

Practical relevance: *The developed system is based on the multi-agent technologies and is now in commercial operation. It is applied in the cargo flow scheduling for the Russian Segment of the ISS. The system provides such advantages as ISS cargo flow scheduling similar to the schedules created by the experienced operators; flexible and quick reaction to the events that cause cargo flow re-scheduling; reduction of manual labour and increased decision-making efficiency by 2-3 times; real-time monitoring and control of the schedule implementation.*

For citation:

Lakhin O.I., Mayorov I.V. The Adaptive Scheduling Method for International Space Station Cargo Flow based on Multi-Agent Technology, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol., no.4, pp. ...

References

1. **Wooldridge, M.** An Introduction to Multi-Agent Systems. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, England, 2002, 340 p.
2. **Vos, S.** Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling, eds A Nareyek, Springer-Verlag, Berlin, 2001, pp. 1–23.
3. **Fatos Xhafa, Ajith Abraham.** Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications, Springer Publishing Company, Incorporated, 2008, 342 p.
4. **Gongfa, L.** A hybrid particle swarm algorithm to JSP problem // *IEIT Journal of Adaptive & Dynamic Computing*, 2011, pp. 12–22.
5. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing Complexity, Southampton, UK, WIT Press, 2014, 202 p.
6. **Skobelev, P.** *Metod sopryazhennyh vzaimodejstvij dlya upravleniya raspredeleniem resursov v real'nom masshtabe vremeni* (Open multi-agent systems for decision-making support), *Avtometriya, Journal of Siberian Branch of Russian Academy of Science*, 2002, no. 6, pp. 45-61 (in Russian).
7. **Skobelev, P., Vittikh, V.** *Mul'tiagentnyye modeli vzaimodejstviya dlya postroeniya setej potrebnostej i vozmozhnostej v otkrytyh sistemah* (Models of Self-organization for Designing Demand-Resource Networks), *Automation and Control, Journal of Russian Academy of Science*, 2003, no. 1, pp. 177-185 (in Russian).
8. **Vittikh, V.A., Larukhin, V.B., Tsarev, A.V.** Actors, Holonic Enterprises, Ontologies and Multi-Agent Technology // *Proc. of 6th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2013), August 26 – 28, 2013, Prague, Czech Republic*. Springer, 2013, pp.13–24.
9. **Skobelev, P.** Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In *Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry*. Paulo Leitão, Stamatis Karnouskos (Ed.). Elsevier, 2015, pp. 207–230.

Published: О.И. Лахин, И.В. Майоров. Метод адаптивного планирования грузопотока РС МКС на основе мультиагентной технологии // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т.16, №.12. – С. 847–852.

doi: 10.17587/mau.16.847-852