

УДК 519.863

В. Н. Колпачев, Н. А. Селезнева

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО
РАСПИСАНИЯ РАБОТЫ МОБИЛЬНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ
БРИГАДЫ**

*Воронежский государственный аграрный университет
имени императора Петра I, Воронеж, Россия*

Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия

С целью повышения доступности медицинской помощи и качества оказания медицинских услуг жителям отдаленных, труднодоступных районов и малочисленных населенных пунктов в отдельных регионах Российской Федерации осуществляется развитие выездных форм работы с применением мобильных медицинских комплексов, обслуживаемых мобильными медицинскими бригадами. Построение оптимального расписания работ, то есть последовательности работ, обеспечивающей их завершение не позже заданных сроков, является необходимым этапом календарного планирования выездов мобильных медицинских бригад. При решении этой задачи важно учитывать время перемещения мобильных медицинских бригад и схемы, по которым будет осуществляться их доставка к пунктам выполнения медицинских работ, что, в свою очередь, может определяться метеорологическими, природно-климатическими, географическими условиями в регионе, площадью территории, плотностью расселения жителей, моделью размещения населенных пунктов и поселений на отдельных территориях и другими причинами. В статье рассматриваются модели и алгоритмы, соответствующие некоторым частным постановкам задачи определения оптимальной очередности выполнения работ мобильной медицинской бригадой с учетом времени ее перемещения между пунктами дислокации. Приводится пример применения рассмотренных структур. Выделяются актуальные проблемы в сфере здравоохранения, одним из инструментов исследования которых могут служить приведенные в статье модели и алгоритмы.

Ключевые слова: мобильная медицинская бригада, доступность медицинской помощи, оптимальная последовательность работ, время перемещения бригады.

Введение. Согласно утвержденной Правительством Российской Федерации программе «Развитие здравоохранения» основными направлениями государственной политики в области здравоохранения являются совершенствование организации и оказания медицинской помощи, развитие и внедрение инновационных методов диагностики и лечения [1]. Ряд приоритетных задач, возникающих при реализации этих направлений, связан с развитием сельской медицины (территория России составляет 17 125 191 кв. км, сельские территории занимают почти четвертую часть площади), повышением доступности медицинской (в первую очередь первичной медико-санитарной) помощи и качества оказания медицинских услуг жителям отдаленных, труднодоступных и малочисленных населенных пунктов страны. Оптимальным решением этой задачи стало внедрение и развитие выездных форм работы с

применением мобильных медицинских комплексов.

Мобильный медицинский комплекс включает медицинское и вспомогательное оборудование, смонтированное на базе транспортного средства (или нескольких транспортных средств), предназначенное для оказания медицинской, в том числе консультативной, помощи, проведения диспансеризации, диагностики и профилактики заболеваний (далее – медицинских работ) вне медицинской организации и обслуживается мобильной медицинской бригадой (ММБ), сформированной из врачей и/или средних медицинских работников, в зависимости от цели ее образования и возложенных на нее функций [2].

За каждой ММБ закреплена территория обслуживания. Мобильные комплексы с заданной периодичностью объезжают прикрепленные населенные пункты согласно плану работы, утвержденному руководителем медицинской организации, в составе которой сформирована ММБ.

В работе [3] на основе геоинформационных технологий определен масштаб поселений Арктической зоны, рекомендуемый для обеспечения средствами медицинской помощи населения Крайнего Севера: регион с низкой плотностью населения (около 300-400 человек) и обширной территорией (для Арктической зоны РФ примерно 6-8 тыс. кв. км). Оптимальное количество пунктов проведения медицинских работ (МР) силами одной ММБ составляет 5, что эквивалентно территории площадью 20 тыс. кв. км [3].

В этой связи актуальной является задача построения оптимального расписания работ ММБ, то есть упорядоченной последовательности МР, обеспечивающей их завершение не позже заданных сроков. При решении этой задачи важно учитывать время перемещения мобильных комплексов и схемы, по которым будет осуществляться доставка ММБ к пунктам выполнения МР, что, в свою очередь, может определяться метеорологическими, природно-климатическими, географическими условиями в регионе, площадью территории, плотностью расселения жителей, моделью размещения населенных пунктов и поселений на отдельных территориях и пр.

Материалы и методы. Модели и методы решения задач упорядочивания работ в последовательности их выполнения и распределения ресурсов между ними, оптимальных с точки зрения тех или иных критериев, исследуются в рамках календарно-сетевое планирования и управления [4], [5].

Сформулируем задачу определения оптимального по минимуму отклонения от запланированных сроков порядка выполнения работ одной бригадой для случая, когда нельзя пренебречь временем перемещения

бригады от работы к работе [6].

Исходными данными задачи являются: n – число запланированных работ (в n пунктах соответственно), l_{ij} – время доставки бригады от места выполнения i -й к месту выполнения j -й работы (в частности, l_{0i} – от стационарного – 0-го пункта – к месту выполнения i -й работы), τ_i – время выполнения i -й работы, D_i – предполагаемый срок окончания i -й работы. Время перемещения бригады от работы к работе l_{ij} сравнимо с длительностью работ τ_i . Необходимо расположить работы в такой последовательности π , при которой величина Δ (максимум разности между фактическим и плановым сроками завершения i -й работы в последовательности π) примет наименьшее значение, т. е.

$$\Delta(\pi) = \max_i (t_i - D_i) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Обозначенная проблема входит в круг задач управления проектами в строительстве, связанных с разработкой календарных графиков производства ремонтно-строительных, в том числе дорожных, работ.

В публикациях [5] – [7] описаны некоторые варианты сформулированной задачи, соответствующие различным схемам перемещения бригад от работы к работе ($\forall i, j \ l_{ij} = l_{ji}$; $\exists i, j \ l_{ij} \neq l_{ji}$) и предложены основанные на методе ветвей и границ подходы к их решению, отличающиеся способами получения и точностью оценок снизу моментов окончания работ в каждом пункте.

Приведем сетевые модели, соответствующие некоторым частным постановкам рассматриваемой задачи и алгоритмы их оптимизации.

1. *Линейное расположение пунктов* (работы выполняются в пунктах, расположенных «в линию», Рисунок 1).

В рассматриваемой модели q_j – время, затрачиваемое на переезд бригады из 0-го пункта в j -й, $l_{ij} = |q_j - q_i|$.

Далее будем использовать следующие обозначения и формулы:

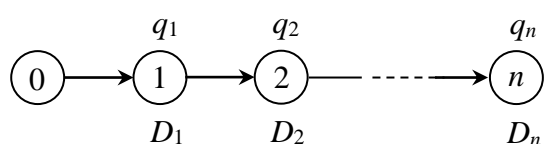


Рисунок 1 – Модель линейной транспортной схемы

i_k – номер работы, выполняемой k -й по счету;

$\pi_k = (i_k, i_{k+1}, \dots, i_n)$, $k \leq n$ – последовательность из $(n - k + 1)$ пунктов;

m – наибольший номер работы, не включенной в последовательность π_k (т. е. $m \neq i_j, j = k, n$).

Наименьшее время доставки бригады из начального пункта к месту

выполнения работы i_k через все пункты, кроме пунктов последовательности π_k :

$$\lambda(\pi_k, i_k) = 2q_m - q_{i_k}. \quad (2)$$

Момент завершения работы в пункте i_k оценивается снизу величиной:

$$t_{i_k} = \lambda(\pi_k, i_k) + \tau_{i_k} + \sum_{i \neq \pi_k} \tau_i. \quad (3)$$

Моменты окончания работ во всех пунктах последовательности π_k оцениваются снизу величиной:

$$t_{i_j} = t_{i_k} + \sum_k^{j-1} |q_{i_q} - q_{i_{q+1}}| + \sum_{q=k+1}^j \tau_{i_q}, \quad j = \overline{k+1, n}. \quad (4)$$

Целевая функция Δ (1) для тех решений, в которых работы последовательности π_k располагаются на последнем месте (в заданной очередности) оценивается снизу величиной:

$$C(\pi_k) = \max_{k \leq j \leq n} (t_{i_j} - D_{i_j}). \quad (5)$$

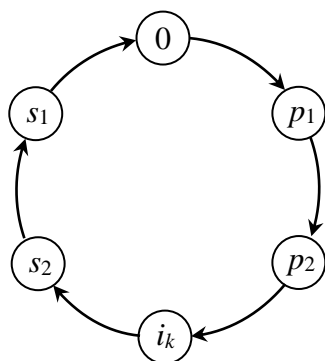
Алгоритм решения:

Сначала множество всех допустимых очередностей разбивается на n подмножеств $\pi(i)$, в которых i -я работа выполняется в последнюю очередь. Рассчитывается оценка (5) для каждого подмножества.

Далее из всех полученных подмножеств выбирается подмножество с минимальной оценкой, определяемое последовательностью $\pi_k = (i_k, i_{k+1}, \dots, i_n)$. Это подмножество, в свою очередь, разбивается на $(k-1)$ подмножеств $\pi_{k-1}(i) = (i, i_k, i_{k+1}, \dots, i_n)$, где $i \neq i_k, j = \overline{k, n}$, для каждого из которых рассчитывается оценка (5).

Когда будет получена такое подмножество $\pi_1 = (i_1, i_2, \dots, i_n)$ (оптимальное решение), что оценки (5) всех остальных подмножеств не меньше $C(\pi_1)$, алгоритм завершается [6], [8].

2. *Круговое расположение пунктов* (работы выполняются в пунктах, которые расположены произвольно и могут быть соединены замкнутой линией, Рисунок 2).



Для данной модели применяется описанный выше алгоритм, отличающийся способом определения оценок $\lambda(\pi_k, i_k)$.

Далее используются следующие обозначения и формулы:

Q – множество пунктов, не принадлежащих последовательности π_k ;

Рисунок 2 – Модель круговой транспортной схемы [6]

s_1 – наибольший номер среди пунктов $i \in Q$.

2.1. Случай одностороннего движения:

$$\lambda(\pi_k, i_k) = \begin{cases} L + q_{i_k}, & \text{если } i_k \neq s_1, \\ q_{i_k}, & \text{если } i_k = s_1. \end{cases}$$

где L – длина замкнутого пути.

2.2. Случай двустороннего движения

I – направление, обозначенное дугами в модели, приведенной на Рисунке 2;

II – направление, противоположное направлению I ;

$p_1 \in Q$ – номер первого после 0-го пункта (при движении в направлении I);

$p_2 \in Q$ – номер пункта, для которого $p_2 < i_k$ и между p_2 и i_k нет пунктов $i \in Q$;

$s_2 \in Q$ – номер пункта, для которого $s_2 > i_k$ и между s_2 и i_k нет пунктов $i \in Q$.

Возможны различные варианты перемещения бригады при выполнении работ [7]:

Варианты 1, 2, 4, 5. Сначала бригада выполняет работы во всех пунктах $i \in Q$ [в направлении I / в направлении II], затем перемещается в пункт i_k [в направлении I / в направлении II]:

$$\lambda_1(\pi_k, i_k) = L + q_{i_k}, \quad (I-I)$$

$$\lambda_2(\pi_k, i_k) = 2q_{s_1} - q_{i_k}, \quad (I-II)$$

$$\lambda_4(\pi_k, i_k) = 2L - q_{i_k}, \quad (II-II)$$

$$\lambda_5(\pi_k, i_k) = L - q_{i_k} - 2q_{p_1}. \quad (II-I)$$

Вариант 3. Сначала бригада выполняет все работы $i \in Q$ от p_1 до p_2 (в направлении I), затем от работы p_2 перемещается в направлении II , выполняя все работы $i \in Q$ от s_1 до s_2 , и, после этого, выполняет работу i_k :

$$\lambda_3(\pi_k, i_k) = L - q_{i_k} - 2q_{p_2}.$$

Вариант 6. Сначала бригада выполняет все работы $i \in Q$ от s_1 до s_2 , (в направлении II), затем перемещается из s_2 в направлении I , выполняя работы $i \in Q$ от p_1 до p_2 , и, после этого, выполняет работу i_k :

$$\lambda_6(\pi_k, i_k) = 2(L - q_{s_2}) - q_{i_k}.$$

Полученные результаты сравниваются, и выбирается вариант с наименьшим значением величины λ :

$$\lambda(\pi_k, i_k) = \min_{1 \leq j \leq 6} \lambda_j(\pi_k, i_k).$$

3. *Линейное расположение пунктов*, соответствующее частному случаю, когда 0-й пункт размещается между пунктами, в которых выполняются работы (начальный пункт находится слева от пункта i_k).

Если s и p – пункты, наиболее удаленные от 0-го (соответственно слева и справа) из всех $i \in Q$, то

$$\lambda(\pi_k, i_k) = 2q_s + 2q_p - q_{i_k}.$$

4. *Радиальное расположение пунктов* (бригада из начального пункта перемещается в пункт i , $i = \overline{1, n}$, и после выполнения i -й работы возвращается обратно, Рисунок 3).

Для рассматриваемой модели a_i и b_i – время перемещения бригады из 0-го пункта в i -й и из i -го пункта в 0-й соответственно,

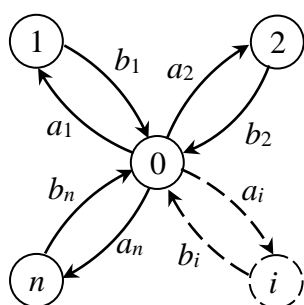


Рисунок 3 – Модель радиальной транспортной схемы

соответственно, $i, j = \overline{1, n}$.

В общем случае $a_i \neq b_j$, что может быть обусловлено дополнительными

временными затратами, например, на подготовку оборудования.

Время доставки бригады от места выполнения i -й работы к месту выполнения j -й работы:

$$\lambda_{ij} = b_i + a_j,$$

Задача (1), соответствующая модели на Рисунке 3, всегда имеет оптимальное решение, в котором работы выполняются в последовательности неубывания величины $b_i + D_i$ [6], [7].

Результаты. Рассмотрим пример применения описанных моделей и алгоритмов к решению задачи (1) определения оптимальной очередности выполнения МР одной ММБ с учетом времени перемещения ММБ от работы к работе.

Пусть мобильная медицинская бригада должна выполнить 5 медицинских работ на определенной территории (такой, что время перемещения ММБ от медицинской организации в пункт выполнения МР и от пункта к пункту сравнимо с продолжительностью МР). Предположим, что доставка ММБ к пунктам выполнения работ осуществляется по линейной транспортной схеме (Рисунок 1, $n = 5$); значения величин q_i , τ_i , D_i (в одноименных единицах времени) заданы векторами:

$$q = (1; 2; 3; 4; 5)^T, \tau = (2; 3; 3; 5; 4)^T, D = (7; 9; 25; 15; 16)^T.$$

Решение задачи выполнено в среде MathCad. Данные и результаты

$(q_j, \tau_j, D_j, \lambda_j, t_j, C_j)$ для первого ($j = 1$) и второго ($j = 2$) шагов алгоритма (2) – (5) приведены на Рисунке 4.

Графовая модель реализации алгоритма (2) – (5) для данного примера показана на Рисунке 5. Оценки величины (1), вычисленные по формуле (5) для подмножеств, полученных на каждом этапе решения, подписаны рядом с соответствующими вершинами в скобках. Путь, соединяющий компоненты оптимального решения, состоит из дуг, выделенных жирными линиями.

```

ORIGIN := 1

q1 := (1 2 3 4 5)^T   tau1 := (2 3 3 5 4)^T   D1 := (7 9 25 15 16)^T

n := длина(D1)   i := 1..n   lambda1_i := 2*q1_n - q1_i   lambda1^T = (9 8 7 6 5)   T1 := sum_i tau1_i = 17

t1 := lambda1^T + T1 = (26 25 24 23 22)   C1 := (t1^T - D1)^T = (19 16 -1 8 6)

q2 := (1 2 4 5)^T   tau2 := (2 3 5 4)^T   D2 := (7 9 15 16)^T

n := длина(D2)   i := 1..n   lambda2_i := 2*q2_n - q2_i   lambda2^T = (9 8 6 5)   T2 := sum_i tau2_i = 14

t2 := lambda2^T + T2 = (23 22 20 19)   C2 := (t2^T - D2)^T = (16 13 5 3)
    
```

Рисунок 4 – Фрагмент решения задачи в среде MathCad

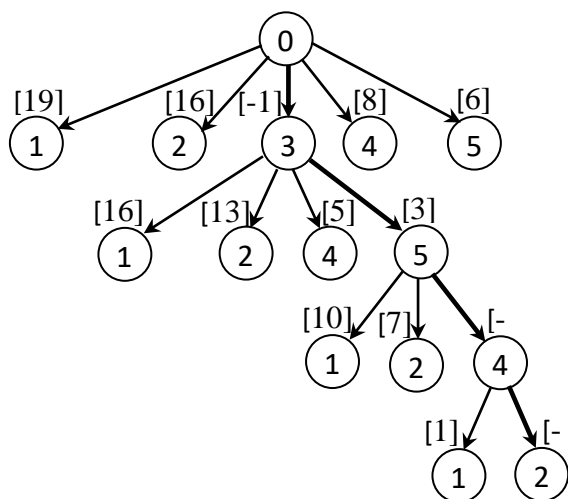


Рисунок 5 – Модель решения задачи

Таким образом, оптимальное расписание работы ММБ в условиях рассматриваемого примера представляет собой последовательность работ $\pi_1 = (1, 2, 4, 5, 3)$. Как видно из Рисунка 5, оценки (5) всех остальных подмножеств больше, чем $C(\pi_1)$.

Заключение. Рассмотренные постановки задачи (1), несмотря на их простоту, вместе с алгоритмами их решения, могут

служить инструментом исследования частных вопросов в рамках актуальных проблем в сфере здравоохранения, например, кроме уже обозначенных, связанных с повышением эффективности работы мобильных медицинских формирований, осуществляющих мероприятия по локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций: эпидемий,

последствий стихийных бедствий, военных действий, технологических катастроф [9]; с организационным совершенствованием работы медицинских учреждений на основе методов «бережливого» производства, когда достигается постоянное сокращение всех типов потерь (в том числе временных: лишних движений, ненужной транспортировки и других) [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 26 декабря 2017 г. № 1640 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие здравоохранения» [Электронный ресурс]. – (<https://www.rosminzdrav.ru/ministry/programms/health/info>).
2. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 15 мая 2012 г. №543н «Об утверждении Положения об организации оказания первичной медико-санитарной помощи взрослому населению» (с изменениями и дополнениями). Приложение №8 «Правила организации деятельности мобильной медицинской бригады» [Электронный ресурс]. – (<http://base.garant.ru/70195856/>).
3. Седова А. П. Способы повышения качества медицинского обеспечения населения арктических регионов на основе интеллектуальных геоинформационных систем: автореф. дис. канд. тех. наук / Седова Алена Павловна. – Санкт-Петербург, 2012. – 25 с.
4. Исследование операций в экономике: учебник для академ. бакалавр. / под ред. Н. Ш. Кремера. – М.: Изд-во Юрайт, 2017. – 438 с.
5. Модели и методы распределения ресурсов в управлении проектами / С. А. Баркалов [и др.]. – М.: ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, 2004. – 87 с.
6. Баркалов П. С. Оптимизация календарного графика работ для различных транспортных схем / П. С. Баркалов, В. Н. Колпачев // Проблемы управления. – 2005. – № 2. – С. 50-53.
7. Прикладные задачи управления строительными проектами: монография / В. И. Алферов [и др.]. – Воронеж: Центрально-Черноземное книжное издательство, 2008. – 765 с.
8. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах / Э. Майника. – М.: Мир, 1981. – 324 с.
9. Башинский О. А. Организационно-методическое обеспечение оказания медицинской помощи пострадавшим в чрезвычайных ситуациях с травмами на догоспитальном этапе силами и средствами МЧС России: автореф. дис. канд. мед. наук / Башинский Олег Андреевич. – Санкт-Петербург, 2018. – 24 с.

10. Гурина М. А. Создание эффективной системы управления качеством в медицинских организациях на основе внедрения технологии «бережливого» производства / М. А. Гурина // Вестник ВГУИТ. – 2017. – Т. 79. – № 4. – С. 378-384.

V. N. Kolpachev, N. A. Selezneva

MODELS AND ALGORITHMS OF FORMATION THE OPTIMAL WORK TIMETABLE OF THE MOBILE MEDICAL BRIGADE

*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I,
Voronezh, Russia*

Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russia

In order to improve the accessibility of medical care and the quality of medical services to residents of remote, hard-to-reach areas and small settlements in certain regions of the Russian Federation, forms of medical care are being developed using mobile medical complexes serviced by mobile medical teams. The construction of an optimal work timetable, that is, a sequence of work that ensures their completion no later than the deadlines set, is an important stage in the scheduling of mobile medical brigades' departures. When solving this problem, it is important to take into account the time for the movement of mobile medical teams and the schemes by which they will be delivered to the points of medical work, which in turn can be determined by meteorological, climatic, geographical conditions in the region, the area of the territory, the density of settlement residents, a model for locating settlements in certain territories and other reasons. The article deals with models and algorithms that correspond to some particular wording of tasks of determining the optimal order of execution of work by a mobile medical brigade, taking into account the time of its movement between points of deployment. An example of the application of the structures considered is given. Highlighted the actual problems in the field of health, for the research of which the models and algorithms described in the article can be used.

Keywords: mobile medical brigade, accessibility of medical care, optimal sequence of service, time of relocation of the brigade.

REFERENCES

1. Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 26 dekabrya 2017 g. No. 1640 «Ob utverzhdenii gosudarstvennoy programmy Rossiyskoy Federatsii «Razvitiye zdravookhraneniya» [Elektronnyy resurs]. – (<https://www.rosminzdrav.ru/ministry/programms/health/info>).
2. Prikaz Ministerstva zdravookhraneniya i sotsial'nogo razvitiya RF ot 15 maya 2012 g. No. 543n «Ob utverzhdenii Polozheniya ob organizatsii okazaniya pervichnoy mediko-sanitarnoy pomoshchi vzrosloму naseleniyu» (s izmeneniyami i dopolneniyami). Prilozheniye №8 «Pravila organizatsii deyatel'nosti mobil'noy meditsinskoy brigady» [Elektronnyy resurs]. – (<http://base.garant.ru/70195856/>).
3. Sedova A. P. Sposoby povysheniya kachestva meditsinskogo

- obespecheniya naseleniya arkticheskikh regionov na osnove intellektual'nykh geoinformatsionnykh sistem: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk / Sedova Alena Pavlovna. – Sankt-Peterburg, 2012. – 25 s.
4. Issledovaniye operatsiy v ekonomike: uchebnyy dlya akadem. bakalavr. / pod red. N. S.H. Kremera. – M.: Izd-vo Yurayt, 2017. – 438 s.
 5. Modeli i metody raspredeleniya resursov v upravlenii proyektami / S. A. Barkalov [i dr.]. – M.: IPU im. V. A. Trapeznikova RAN, 2004. – 87 s.
 6. Barkalov P. S. Optimizatsiya kalendarnogo grafika rabot dlya razlichnykh transportnykh skhem / P. S. Barkalov, V. N. Kolpachev // Problemy upravleniya. – 2005. – No. 2. – S. 50-53.
 7. Prikladnyye zadachi upravleniya stroitel'nymi proyektami: monografiya / V. I. Alferov [i dr.]. – Voronezh: Tsentral'no-Chernozemnoye knizhnoye izdatel'stvo, 2008. – 765 s.
 8. Maynika E. Algoritmy optimizatsii na setyakh i grafakh / E. Maynika. – M.: Mir, 1981. – 324 s.
 9. Bashinskiy O. A. Organizatsionno-metodicheskoye obespecheniye okazaniya meditsinskoy pomoshchi postradavshim v chrezvychaynykh situatsiyakh s travmami na dogospital'nom etape silami i sredstvami MCHS Rossii: avtoref. dis. kand. med. nauk / Bashinskiy Oleg Andreyevich. – Sankt-Peterburg, 2018. – 24 s.
 10. Gurina M. A. Sozdaniye effektivnoy sistemy upravleniya kachestvom v meditsinskikh organizatsiyakh na osnove vnedreniya tekhnologii «berezhlivogo» proizvodstva / M. A. Gurina // Vestnik VGUIT. – 2017. – Vol. 79. – No. 4. – S. 378-384.