

УДК 630.3

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4622

Статья

Рациональный алгоритм распределения земляных масс в лесном дорожном строительстве

Ахмед Х. Мохамед^{1,*} и Николай А. Тюрин¹

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5;
E-Mails: ah.abdelwahab@fagr.bu.edu.eg (А. М.); tnalif@mail.ru (Н. Т)

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: ah.abdelwahab@fagr.bu.edu.eg (А. М.);
Tel.: +79006338096

Получена: 25 апреля 2019 / Принята: 29 мая 2019 / Опубликовано: 27 июня 2019

Аннотация: В статье изложен рациональный алгоритм оптимизации распределения земляных масс в лесном дорожном строительстве по критерию стоимости земляных работ с учётом наличного парка машин дорожно-строительной организации. Поэлементно определяются эффективные источники грунта и расстояния его транспортировки. Результаты работы алгоритма рекомендуются для использования на этапе проектирования производства земляных работ строительной организации.

Ключевые слова: строительство лесных дорог; распределения земных масс; земляное полотно автомобильной дороги; алгоритм; стоимость земляных работ

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4622

Article

Rational algorithm of the earth masses distribution in the forest road construction

Ahmed Mohamed^{1,*} and Nikolay Turin¹

¹ St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov, Russia, 194021, Saint Petersburg, Institute per., 5; E-Mails: ah.abdelwahab@fagr.bu.edu.eg (A.M.); tnalif@mail.ru (N. T.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: ah.abdelwahab@fagr.bu.edu.eg (A. M.);
Tel.: +79006338096

Received: 24 April 2019 / Accepted: 29 May 2019 / Published: 27 June 2019

Abstract: In this research a rational algorithm has been designed to optimize the distribution of the earth masses during the construction of the forest road according to the excavation costs. The authors took into consideration the available number of the construction machines in the park of the road construction company. The proposed algorithm allows specialists to determine the effective soil volume and the distance for its transportation. The obtained information may be used for designing the excavation procedures and organizing the forest road construction.

Keywords: forest road construction; earth masses distribution; roadbed preparation; earthmoving algorithm; earthworks cost

1. Введение

Местные грунты являются основным дорожно-строительным материалом, из которого сооружается земляное полотно лесных дорог, а в ряде случаев — и конструктивные слои дорожных одежд.

Вследствие сложных грунтово-гидрологических условий лесной зоны, характеризующейся повышенной влажностью лесных грунтов, земляное полотно лесных автомобильных дорог проектируют, как правило, в насыпях. Выемки используют лишь на коротких участках для смягчения продольных уклонов [5]. На лесных дорогах, как правило, нет равенства объёмов грунта, получаемого при разработке выемок, и требуемого объёма для отсыпки насыпей. В этой связи необходимо использование для возведения насыпей, кроме выемок, ещё боковых и сосредоточенных резервов и грунтовых карьеров (рисунок 1).

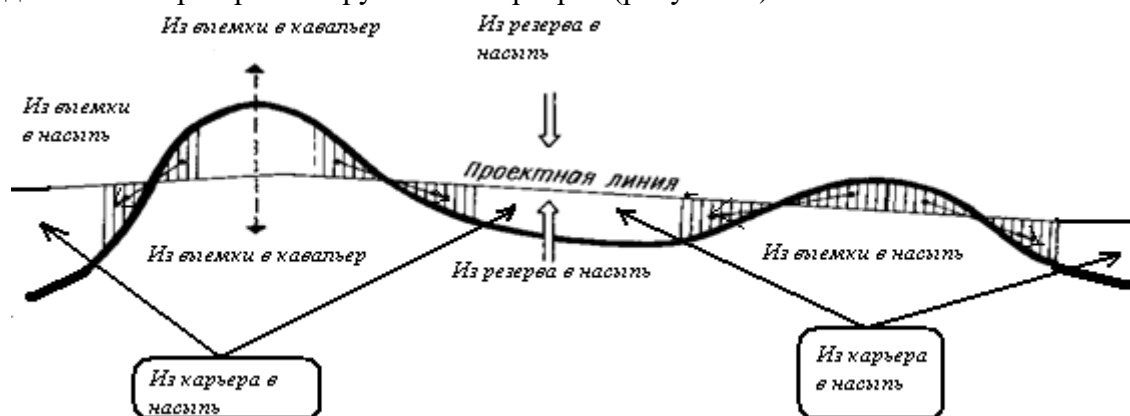


Рисунок 1. Схема распределения земляных масс

Так возникает задача определения рациональных способов выполнения работ и областей применения грунта выемок, резервов и карьеров, в решении которой существенную роль играет отыскание оптимального плана распределения земляных масс и распределение объёмов работ по способам их выполнения.

При традиционных методах проектирования производства работ распределение земляных масс производится в соответствии с рядом неформализованных правил, дающих многозначные результаты. В общем случае выбор наиболее целесообразных источников грунта и определение областей их действия, с учётом возможных перемещений грунта, а также ограничений на его пригодность, представляют собой многовариантную задачу, для решения которой целесообразно применение математических методов и ЭВМ [6]. Такое обстоятельство послужило причиной разработки математической модели и алгоритма рационального распределения земляных масс в лесном дорожном строительстве, предназначенного для реализации на ЭВМ.

2. Материалы и методы

Описание алгоритма. В качестве исходных данных используются: профильные объёмы насыпей и выемок; группы грунтов по трудности разработки; пикеты и плюсы отдельных профильных объёмов, расположенных между смежными точками поверхности земли; рабочие отметки земляного полотна; отметки уровней грунтовых вод; затраты на производство земляных работ с учётом группы грунта по трудности разработки, вида механизмов и расстояния перемещения; запасы, вид и группа грунта по трудности разработки в сосредоточенных резервах и карьерах; длина подъездных путей к карьерам и пикеты с плюсами точек примыкания карьеров к трассе проектируемой автодороги.

Вся дорога разбивается на элементарные участки, длина каждого из них равна разнице между пикетами смежных точек поверхности земли, т. е.

$$l_i = y_{i+1} - y_i,$$

где y_i , y_{i+1} — пикетаж начала и конца i -го участка поверхности земли; l_i — длина i -го элементарного участка.

Каждому i -му элементарному участку объёма земляных работ соответствуют:

Q_i — объём насыпи, в случае насыпи;

W_i — объём выемки, в случае выемки;

G_i — вид грунта i -го участка;

T_i — группа грунта по трудности разработки на i -м участке;

h_i — рабочая отметка в начале i -го участка;

H_i — отметка земли в начале i -го участка;

B_i — уровень грунтовых вод в начале i -го участка.

При разработке алгоритма приняты следующие допущения:

1. Производственные, геологические и гидрологические условия элементарного объёма земляного полотна, заключённого между двумя смежными точками поверхности земли, постоянны и соответствуют условиям, зафиксированным в первой по ходу расчёта точке.

2. Работы по сооружению земляного полотна производятся заданными проектировщиком максимально четырьмя видами ведущих машин, перемещающими грунт: бульдозерами, экскаваторами, скреперами и автосамосвалами, погружаемыми тем или иным способом. Такой состав механизмов наиболее типичен для дорожного строительства.

Критерием оптимальности распределения земляных масс является минимум стоимости производства земляных работ всеми машинами на всех участках:

$$\sum_{ij} c_{ji} v_{ji} = \min, \quad (1)$$

где c_{ji} — затраты на перемещение 1 м^3 грунта j -й машиной на i -м объекте, руб./ м^3 ; v_{ji} — объём перемещаемого грунта машиной j -го типоразмера на i -м объекте, м^3 .

Стоимость перемещения грунта может быть представлена из постоянной и переменной составляющей расценки, зависящей от категории грунта по трудности разработки в виде

$$c_{ji} = a(T_i) + b(T_i)l_{ji}, \quad (2)$$

где $a(T_i)$ и $b(T_i)$ — постоянная и переменная составляющие расценки на перемещение грунта j -й машиной на i -м объекте; l_{ji} — расстояние перемещения грунта j -й машиной на i -м объекте.

Результатом работы предлагаемого алгоритма распределения земляных масс являются следующие двух- и трёхмерные рабочие массивы объёмов земляных работ, распределённых по источникам и назначению на i -м элементе:

- K_{il} — из выемки в кавальер на расстояние l ;
- V_{ijl} — из j -й выемки в i -ю насыпь на расстояние l ;
- S_{il} — из продольных боковых притрассовых резервов в i -ю насыпь на расстояние l ;
- A_{jil} — из j -го сосредоточенного притрассового резерва или карьера в i -ю насыпь на расстояние l .

Укрупнённая блок-схема предлагаемого алгоритма представлена на рисунке 2.

После ввода исходных данных (блок 2) создаётся рабочий массив элементарных рабочих объёмов земляных работ, представляющий собой копию исходного профильного объёма земляных работ продольного профиля. В дальнейшем, по мере распределения земляных масс, объёмы распределённых насыпей и выемок в рабочем массиве будут обнуляться. Окончанием распределения земляных масс будет обнуление всех насыпей и выемок в рабочем массиве.

Весь алгоритм распределения земляных масс последовательно разбивается на четыре этапа, рассчитывающих распределение земляных масс соответственно [1] и [4]:

- 1) из полувыемки в полунасыпь;
- 2) из выемки в насыпь или кавальер;
- 3) из боковых притрассовых резервов поперечным перемещением грунта в насыпь;
- 4) из сосредоточенных резервов и карьеров продольным перемещением грунта в насыпь.

2.1. Первый этап алгоритма

На первом этапе алгоритма (блок 4—7) распределяются участки полувыемок и полунасыпей в поперечном направлении по следующим правилам:

— если $Q_i \neq 0$, $W_i \neq 0$ и вид местного грунта Γ_i не соответствует техническим условиям для укладки в насыпь, то весь объём полувыемки перемещается в кавальер $K_i = W_i$, $T_i = C_i$, а рабочий массив на участке корректируется на $W_i = 0$;

— если $Q_i \neq 0$, $W_i \neq 0$ и вид местного грунта Γ_i соответствует техническим условиям для укладки в насыпь, а $Q_i < W_i$, то грунт из полувыемки перемещается в полунасыпь $V_i = Q_i$, $T_i = C_i$, а рабочий массив последовательно корректируется по правилу $W_i = W_i - Q_i$ и $Q_i = 0$;

— если $Q_i \neq 0$, $W_i \neq 0$ и вид местного грунта Γ_i соответствует техническим условиям для укладки в насыпь, а $Q_i > W_i$, то грунт из уширенной раскрытой полувыемки перемещается в полунасыпь $V_i = Q_i$, $T_i = C_i$, а рабочий массив корректируется по правилу $W_i = 0$ и $Q_i = 0$.

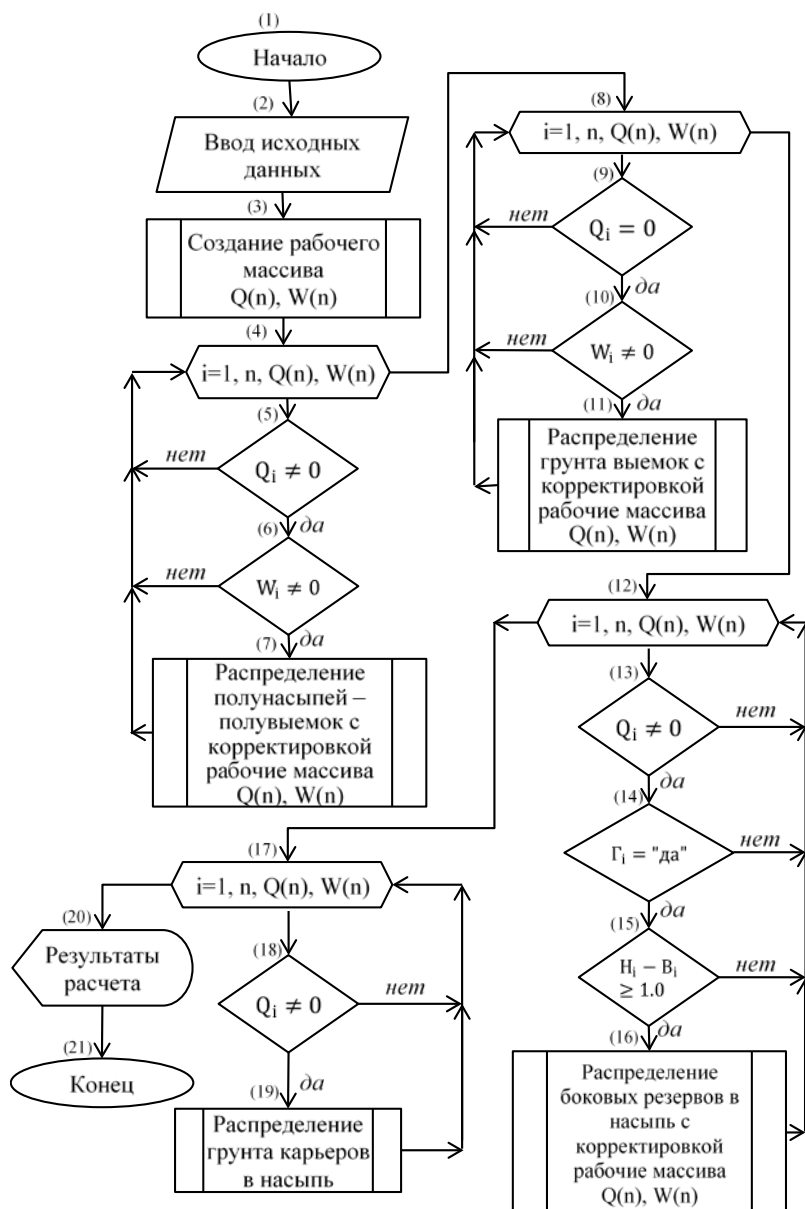


Рисунок 2. Укрупнённая блок-схема алгоритма

2.2. Второй этап алгоритма

Второй этап алгоритма (блоки 8—11) производит распределение грунта из выемок в соседние насыпи или кавальеры:

— если $Q_i = 0$, $W_i \neq 0$ и вид местного грунта Γ_i не соответствует техническим условиям для укладки в насыпь, то весь объём выемки перемещается в кавальер $K_i = W_i$, $T_i = C_i$, а рабочий массив корректируется на $W_i = 0$;

— если вид грунта в выемке Γ_i соответствует техническим условиям для сооружения земляного полотна, то он распределяется сначала в соседние ближайшие к выемке насыпи, а затем и более дальние. Максимальное расстояние перемещения грунта из данной выемки

в соседние насыпи определяется экономически целесообразной величиной, определяемой из условия равенства затрат:

$$Z_{\text{вн}} = Z_{\text{вк}} + Z_{\text{рн}}, \quad (3)$$

где $Z_{\text{вн}}$ — затраты маш.-ч. на разработку и перемещение грунта из i -й выемки в j -ю насыпь; $Z_{\text{вк}}$ — затраты маш.-ч. на разработку и перемещение грунта из i -й выемки в кавальер; $Z_{\text{рн}}$ — затраты маш.-ч. на разработку и перемещение грунта из бокового резерва в j -ю насыпь.

На основании сметных норм на строительные земляные работы (1) при разработке и перемещении грунта бульдозером в развернутом виде имеем [2]:

$$\frac{V}{1000} \left(a(T_i) + b(T_i) \frac{l-10}{10} \right) = \frac{V}{1000} \left(a(T_l) + b(T_l) \frac{l_k-10}{10} \right) + \frac{V}{1000} \left(a(T_j) + b(T_j) \frac{l_r-10}{10} \right);$$

откуда

$$l_3 = \frac{0.1b(T_l)l_k + a(T_j) + 0.1b(T_j)l_r}{0.1b(T_i)} + 10, \quad (4)$$

где l_3 — максимальное экономически целесообразное расстояние перемещения грунта бульдозером из выемки в насыпь; l_k — расстояние перемещения грунта бульдозером из выемки в кавальер; l_r — расстояние перемещения грунта бульдозером из бокового резерва в насыпь; V — объём перемещаемого грунта в м^3 ; $a(T_i)$, $a(T_j)$ — затраты маш.-ч. на разработку и перемещение грунта из i -й выемки в j -ю насыпь и из бокового резерва в j -ю насыпь на расстояние 10 м; $b(T_i)$, $b(T_j)$ — затраты маш.-ч. на перемещение грунта из i -й выемки в j -ю насыпь и из бокового резерва в j -ю насыпь на каждые последующие 10 м.

Перемещение грунта в j -ю насыпь будет экономически целесообразно, если

$$|y_i - y_j|/2 \leq l_3, \quad (5)$$

где y_i , y_j — пикеты начала и конца распределяемых элементарных участков i -й выемки и j -й насыпи.

Если перемещение грунта из выемки в насыпь будет экономически целесообразно (5), то распределение земляных масс будет выполняться по следующим правилам:

— если $Q_j \neq 0$, $W_i \neq 0$, вид местного грунта выемки Γ_i соответствует техническим условиям для укладки в насыпь и $Q_j \geq W_i$, то весь объём выемки перемещается в насыпь $V_i = W_i$, $T_i = C_i$, а рабочий массив корректируется на $Q_j = Q_j - W_i$ и $W_i = 0$;

— если $Q_j \neq 0$, $W_i \neq 0$, вид местного грунта выемки Γ_i соответствует техническим условиям для укладки в насыпь и $Q_j < W_i$, то часть объёма выемки перемещается в насыпь $V_i = Q_j$, $T_i = C_i$, а рабочий массив корректируется на $W_i = W_i - Q_j$ и $Q_j = 0$.

Если перемещение грунта из выемки в насыпь будет экономически нецелесообразно (5), то распределение земляных масс будет выполняться по следующим правилам:

— если $Q_j \neq 0$, $W_i \neq 0$, и $|y_i - y_j|/2 > l_3$ то весь объём выемки перемещается в кавальер $K_i = W_i$, $T_i = C_i$, а рабочий массив корректируется на $W_i = 0$.

В результате работы второго этапа алгоритма все объёмы земляных работ выемок будут обнулены в рабочем массиве и окажутся распределёнными либо в насыпи, либо в кавальеры.

2.3. Третий этап алгоритма

Третий этап алгоритма распределения земляных масс (блоки 12—16) предполагает возведение участков насыпей из продольных боковых притрассовых резервов по следующим правилам:

— если $Q_i \neq 0$, вид местного грунта резерва G_i соответствует техническим условиям для укладки в насыпь, уровень грунтовых вод на участке ниже дна резерва $H_i - B_i \geq 1.0$ и высота насыпи менее предельной для поперечного возведения земляного полотна $h_i \leq 1.0$, то весь объём насыпи создаётся из притрассового резерва $S_i = Q_i$, $T_i = C_i$, а рабочий массив корректируется на $Q_i = 0$;

— если $Q_i \neq 0$, вид местного грунта резерва G_i соответствует техническим условиям для укладки в насыпь, уровень грунтовых вод на участке ниже дна резерва $H_i - B_i \geq 1.0$ и высота насыпи более предельной для поперечного возведения земляного полотна $h_i > 1.0$, то нижняя часть насыпи создаётся из притрассового резерва $S_i = Q_i - V_i$, $T_i = C_i$, а рабочий массив корректируется на $Q_i = Q_i - V_i$.

В результате работы третьего этапа алгоритма распределения земляных масс на дороге остаются насыпи, которые могут быть созданы из сосредоточенных притрассовых резервов или карьеров путём продольного перемещения грунтов. Все остальные объёмы земляных работ в рабочем массиве к этому моменту оказываются обнулёнными.

2.4. Четвёртый этап алгоритма

Четвёртый этап алгоритма (блоки 17—19) обеспечивает создание оставшихся насыпей путём продольного перемещения грунта из сосредоточенных притрассовых резервов или карьеров. Пикетаж границы зон снабжения соседними карьерами или резервами определяется из условия равенства расстояния транспортировки грунта до сооружаемого участка насыпи по формуле

$$g_i = 0.5(y_{j+1}^k - y_j^k - p_j + p_{j+1}), \quad (6)$$

где y_{j+1}^k, y_j^k — пикетаж примыканий карьерных дорог к строящейся трассе; p_j, p_{j+1} — протяжённость карьерных дорог соседних источников грунтов.

Расстояние транспортировки грунта из i -го карьера в j -ю насыпь определяется [3] по формуле

$$D_{ij} = |y_j - y_i| + p_j. \quad (7)$$

Четвёртый этап алгоритма распределения земляных масс предполагает возведение участков насыпей только из сосредоточенных резервов и карьеров по следующим правилам:

— если $Q_i \neq 0$, $y_i \leq g_i$, $V_j \neq 0$ и $Q_i \leq V_j$, то весь объём насыпи создаётся из ближайшего j -го карьера $A_i = Q_i$, $T_i = C_j$ с транспортировкой грунта на расстояние D_{ij} , а рабочий массив корректируется на $V_j = V_j - Q_i$ и $Q_i = 0$;

— если $Q_i \neq 0$, $y_i \leq g_i$, $V_j \neq 0$ и $Q_i > V_j$, то часть объёма насыпи создаётся из ближайшего j -го карьера $A_i = Q_i - V_j$, $T_i = C_j$ с транспортировкой грунта на расстояние D_{ij} , а рабочий массив корректируется на $Q_i = Q_i - V_j$ и $V_j = 0$.

Во всех остальных случаях, если $Q_i \neq 0$, то весь объём оставшихся насыпей создаётся из ближайшего $j+1$ -го резерва или карьера $A_i = Q_i$, $T_i = C_{j+1}$ с транспортировкой грунта на расстояние D_{ij+1} , а рабочий массив корректируется на $V_{j+1} = V_{j+1} - Q_i$ и $Q_i = 0$. Процесс распределения земляных масс заканчивается при условии обнуления в рабочем массиве всех оставшихся объёмов насыпей.

3. Обсуждение и заключение

Следует отметить, что предложенный алгоритм был реализован на языке программирования C#. Малое время работы предложенного алгоритма, состоящего в основном из логических операций, выполняемых на ЭВМ быстрее, чем арифметические, подтвердило целесообразность такого подхода к алгоритмизации распределения земляных масс в лесном дорожном строительстве.

Список литературы

1. ГЭСН 81-02-01-2017. Сборник 1. Земляные работы (ред. 2017 г.). Государственные элементные сметные нормы на строительные и специальные строительные работы. — Москва, 2017. — 253 с.
2. ЕНиР. Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Сборник Е2. Земляные работы. — Вып. 1. Механизированные и ручные земляные работы / Госстрой СССР. — Москва : Стройиздат, 1989. — 224 с.
3. Технологические машины и комплексы в дорожном строительстве (производственная и техническая эксплуатация): учебное пособие / В. Б. Пермяков, В. И. Иванов, С. В. Мельник [и др.] ; под ред. В. Б. Пермякова. — Москва : БАСТЕТ, 2014. — 752 с.
4. *Першин, М. Н.* Возведение земляного полотна автомобильных дорог : учебное пособие / М. Н. Першин, Г. И. Артюхина. — Санкт-Петербург : Изд-во СПбГАСУ, 2007.
5. *Подольский, В. П.* Строительство автомобильных дорог. Земляное полотно / В. П. Подольский, А. В. Глагольев, П. И. Пospelов. — Москва : Издательский центр «Академия», 2013. — 432 с.
6. *Akay, A. E.* Applying the Decision Support System, TRACER, to Forest Road Design / A. E. Akay, J. Sessions // Western Journal of Applied Forestry. — 2005. — Vol. 3, No 20. — P. 184—191.

References

1. GESN 81-02-01-2017. Part 1. Earth working (published 2017). Governmental elementary estimated standards for construction and special construction works. — Moscow, 2017. — 253 p.

2. ENiR. Uniform standards and valuations for construction, assembly and repair and constructed works. Part E2. Earth working. First issue. mechanization and manual of excavation / Government of USSR. — Moscow : Stroiizdat, 1989. — 224 p.
3. Technological machines and complexes for the road construction (production and technical operation): a training manual / V. B. Permyakov, V. E. Ivanov, S. V. Melnik [et al.] ; by ed. V. B. Permyakov. — Moscow : BASTET, 2014. — 752 p.
4. *Pershin, M. N.* The Erection of the roadbed in the highway: a textbook / M. N. Pershin, G. I. Artukhina. — Saint Petersburg : Publisher SPbGASU, 2007.
5. *Podolskiy, V. P.* Road construction. Roadbed / V. P. Podolskiy, A. V. Glagolev, P. I. Pospelov. — Moscow : Publishing Center «Academy», 2013. — 432 p.
6. *Akay, A. E.* Applying the Decision Support System, TRACER, to Forest Road Design / A. E. Akay, J. Sessions // Western Journal of Applied Forestry. — 2005. — Vol. 3, No 20. — P. 184—191.

© Мохамед А. Х., Тюрин Н. А., 2019