

Модели процессов переноса и способов их измерений

А.Н. Брюховецкий^a, Ю.Ю. Володина^b, А.А. Скрыпников^c, А.А. Кривошеев^d,
С.В. Меньшиков^e, Е.В. Михеевский^f

Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Россия

^a bryuhovetski-an@yandex.ru, ^b juliya_volodina@mail.ru, ^c aleksei-skrypnikov@inbox.ru,

^d andrey.krivosheev7@bk.ru, ^e serzh_menshikov_22@mail.ru, ^f mikheyEVsky@list.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-3247-3411>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2768-1937>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-6587-3406>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-2707-2189>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-4806-8787>

Статья поступила 27.10.2022, принята 18.11.2022

В данной статье рассматривается использование процессов переноса в твердых и пористых телах, подвергающихся атмосферным воздействиям, для решения практических задач автоматизации научных исследований в отраслях народного хозяйства, одной из которых является проблема прогнозирования условий образования гололеда на дорожных покрытиях. Эффективный путь решения этих задач в настоящее время связан с построением динамических моделей энерго- и массопереноса и с их численной реализацией с использованием современных интеллектуально-информационных технологий и основан на умении точно рассчитывать динамику процессов переноса в теле дорожного покрытия при воздействии атмосферных процессов: проходящей солнечной радиации, осадков и т. д. При моделировании процессов переноса, как правило, производится численное интегрирование описывающих эти процессы дифференциальных уравнений в частных производных. Решение подобных задач связано с исследованием динамики тепловлажностного переноса, а также солепереноса, сопряженного с тепловлажностным переносом в почве и в приземном воздухе и т. д. При этом для проведения соответствующих расчетов необходимо задать набор констант, характеризующих архитектуру посева и почву, или физические параметры, а также начальное состояние системы — профиль температуры и влажности, профиль концентрации солей и др. Практическое использование моделей энерго- и массообмена на современном этапе наталкивается на ряд трудностей, одной из которых является неполнота информации о переменных состоянии и параметрах отдельных частей модели. Поскольку существующие методы измерений являются косвенными, получение экспериментальных данных о всех составляющих вектора модели либо связано с большими затратами, либо невозможно вообще. Основными недостатками измерительной информации являются следующие: возможность измерения лишь некоторых комбинаций переменных состояния, составляющих незначительную часть полной размерности вектора состояния модели; зашумленность измерений; отсутствие непрерывного наблюдения (серии измерений выполняются только на отдельных этапах). Таким образом, задача оценивания вектора состояния влажности и температуры в моделях энерго- и массообмена является актуальной для управления процессами влаго- и теплопереноса.

Ключевые слова: моделирование процессов переноса; строительство лесовозных автомобильных дорог; информационно-интеллектуальные технологии.

Models of transport processes and methods for their measurement

A.N. Bryukhovetsky^a, Yu.Yu. Volodina^b, A.A. Skrypnikov^c, A.A. Krivosheev^d,
S.V. Menshikov^e, E.V. Mikheevsky^f

Voronezh State University of Engineering Technologies; 19, Revolution Ave., Voronezh, Russia

^a bryuhovetski-an@yandex.ru, ^b juliya_volodina@mail.ru, ^c aleksei-skrypnikov@inbox.ru,

^d andrey.krivosheev7@bk.ru, ^e serzh_menshikov_22@mail.ru, ^f mikheyEVsky@list.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-3247-3411>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2768-1937>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-6587-3406>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-2707-2189>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-4806-8787>

Received 27.10.2022, accepted 18.11.2022

This article discusses the use of transport processes in solid and porous bodies subjected to atmospheric influences to solve practical problems of automating scientific research in the sectors of the national economy, one of which is the problem of predicting the conditions for the formation of ice on road surfaces. An effective way to solve these problems is currently associated with the construction of dynamic models of energy and mass transfer and their numerical implementation using modern intellectual and information technologies and is based on the ability to accurately calculate the dynamics of transfer processes in the body of the road surface under the influence of atmospheric processes: solar radiation, precipitation, etc. When modeling transport processes, as a rule, numerical integration of partial differential equations describing these processes is performed. The solution of such problems is associated with the study of the dynamics of heat and moisture transfer, as well as salt transfer associated with heat and moisture transfer in the soil and in surface air, etc. At the same time, in order to carry out the corresponding calculations, it is necessary to determine a set of constants

characterizing the sowing architectonics and soil, or physical parameters, as well as the initial state of the system - temperature and humidity profile, salt concentration profile, etc. The practical use of models of energy and mass transfer at the present stage encounters a number of difficulties, one of which is the incompleteness of information about the state variables and parameters of individual parts of the model. Since the existing measurement methods are indirect, obtaining experimental data on all components of the model vector is either expensive or impossible at all. The main disadvantages of measurement information are the following: the ability to measure only some combinations of state variables that make up an insignificant part of the total dimension of the model state vector; noisy measurements; lack of continuous monitoring (series of measurements are performed only at separate stages). Thus, the problem of estimating the state vector of humidity and temperature in models of energy and mass transfer is relevant for controlling the processes of moisture and heat transfer.

Keywords: modeling of transport processes; construction of logging roads; information and intellectual technologies.

Введение. Решение большого класса практических задач автоматизации научных исследований в ряде отраслей народного хозяйства основывается на использовании моделей энерго- и массообмена в твердых и пористых телах, подвергающихся атмосферным воздействиям [20]. Одной из таких задач является проблема прогнозирования условий образования гололеда на дорожных покрытиях [21]. Для решения подобных задач необходимо уметь рассчитывать динамику влаго- и теплопереноса в теле дорожного покрытия при воздействии атмосферных процессов: проходящей солнечной радиации, осадков и т.д. В земледелии основным направлением интенсификации является разработка научно обоснованных ресурсосберегающих и экологически чистых технологий, обеспечивающих высокую продуктивность агроэкосистем. Проектирование таких технологий должно основываться на точных расчетах характеристик энерго- и массообмена и, в частности, водного и температурного режимов почвы и приземного воздуха [22; 24].

Эффективный путь решения этих задач в настоящее время связан с построением динамических моделей энерго- и массопереноса и с их численной реализацией с использованием современных интеллектуально-информационных технологий [23].

При моделировании процессов энергообмена, массообмена и прогнозирования, как правило, производится численное интегрирование описывающих эти процессы дифференциальных уравнений в частных производных [5; 8; 10; 12; 25; 26]. Решение этих задач связано с исследованием динамики тепловлагопереноса, а также солепереноса, сопряженного с тепловлагопереносом в почве и приземном воздухе и т. д. При этом для проведения соответствующих расчетов необходимо задать набор констант, характеризующих архитектуру посева и почву, или физические параметры, а также начальное состояние системы — профиль температуры и влажности, профиль концентрации солей и др. [4; 7; 15; 18; 22].

Известно, что непосредственное измерение большинства этих величин в лабораторных или полевых условиях невозможно [1–3; 6], а необходимость их оценки приводит к решению так называемых «обратных» задач математической физики [9]. Более точно, при этом возникают задачи двух классов — идентификация параметров модели и оценивание начального состояния системы по результатам косвенных измерений [11; 14; 21].

При решении многих практических задач при строительстве лесовозных автомобильных дорог необходимо знать тепловлажностные свойства грунтов. К таким задачам можно отнести, например, следующие: расчет влагообмена в полотне в разные периоды года; расчет глубины промерзания и оттаивания полотна; определение оптимальной продолжительности разравнивания и уплотнения грунтов полотна; изучение процессов перемешивания грунтов с вяжущими и др. [13].

С целью систематизации методов измерения тепловлажностных свойств грунтов тепломассообмен целесообразно разделить на два типа: эксплуатационный и технологический. Эксплуатационный тепломассообмен исследует различные тепловлажностные процессы эксплуатируемых лесовозных автомобильных дорог и имеет целью обоснование нормативов на эксплуатацию и проектирование полотна и одежды [11; 16; 19].

Технологический тепломассообмен охватывает более широкий круг процессов, сопровождаемых изменением температуры и влажности при выполнении многих технологических операций: доувлажнение, просушивание, размельчение, транспортирование, уплотнение, разравнивание, перемешивание грунтов и материалов [17].

Пусть в некоторой области $X \subset R^n$ уравнение переноса некоторой субстанции φ имеет вид:

$$a(\varphi, x, t) \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \operatorname{div}(b(\varphi, x, t) \operatorname{grad} \varphi) + f_0, \quad (1)$$

где $x \in X$ — пространственная координата; $t \in [t_0, T]$ — время; t_0 — функция источника.

Обычно размерность пространства n изменяется от 1 до 3. Обозначим границу области X через Γ .

В таком случае уравнение (1) должно быть дополнено соответствующими граничными:

$$\psi(\varphi, \operatorname{grad} \varphi)|_{x \in \Gamma} = f_1(t) \quad (2)$$

и начальным:

$$\varphi(t_0, x) = f_2(t) \quad (3)$$

условиями.

Рассмотрим тот случай, когда начальное состояние неизвестно и должно быть определено на основе косвенных измерений:

$$Y(t, x) = \int_{t_1}^{t_2} \int_x \eta(t, \tau, x, \xi) \varphi(\tau, \xi) d\tau d\xi \quad (4)$$

Это означает, что измерение некоторым прибором производится на интервале времени $[\tau_1, \tau_2]$. Функция η учитывает как пространственное осреднение выходной величины, так и динамические погрешности измерительного устройства. Так, например, при измерении температуры «в точке» $x = x^*$ с помощью транзисторного термометра весовая функция η имеет вид:

$$\eta(t, \tau, x, \xi) = \delta(x^* - \xi)e^{-\lambda(t-\tau)}, \quad (5)$$

где $\delta(x^* - \xi)$ — δ — функция Кронекера, λ^{-1} — постоянная времени транзисторного датчика температуры. Если температура измеряется многоточечным прибором с датчиками, размещенными в точках:

$$x^1, x^2, \dots, x^n \eta(x^1, x^2, \dots, x^n) = \sum_{i=1}^n \delta(x^i - \xi)e^{-\lambda(t-\tau)}.$$

При измерении влажности почвы нейтронным влагомером процесс можно считать безынерционным (так как время переходного процесса прибора мало по сравнению с характерными временами изменения влажности почвы в процессе иссушения). В связи с этим можно записать:

$$\eta(t, \tau, x, \xi) = e^{-\mu r} \delta(t - \tau), \quad (6)$$

где:

$$r = \left| |x - \xi| \right| = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2}.$$

Еще один важный пример связан с дистанционным измерением влажности верхнего слоя почвы с помощью СВЧ-радиометра. В случае одномерного поля влажности при $X = [0, \infty]$ ($x = 0$ соответствует поверхности почвы, ось ординат направлена вниз):

$$\eta(t, \tau, x, \xi) = e^{-\mu r} \delta(t - \tau). \quad (7)$$

Наконец, при измерении «потока субстанции на границе» (например, потока тепла в почву) в той же одномерной задаче $\eta(t, \tau, x, \xi) = \delta^1(x - \xi) e^{\lambda(t-\tau)}$, где δ^1 — производная от δ -функции (как обобщенной функции), λ^{-1} — постоянная времени прибора (тепломера).

Задача наблюдаемости заключается в определении начального состояния модели $\varphi(t_0, x)$ на основании известных значений измеренного на некотором отрезке времени (t_0, τ_2) «выхода» $y(t, x)$ с использованием модели (2), (3).

Заключение. Практическое использование моделей энерго- и массообмена на современном этапе наталкивается на ряд трудностей, одной из которых является неполнота информации о переменных состоянии и параметрах отдельных частей модели. Поскольку существующие методы измерений являются косвенными, получение экспериментальных данных обо всех составляющих вектора модели либо связано с большими затратами, либо невозможно вообще. Основными недостатками измерительной информации являются следующие: возможность измерения лишь

некоторых комбинаций переменных состояния, составляющих незначительную часть полной размерности вектора состояния модели; зашумленность измерений; отсутствие непрерывного наблюдения (серии измерений выполняются только на отдельных этапах).

Таким образом, задача оценивания вектора состояния влажности и температуры в моделях энерго- и массообмена является актуальной для управления процессами влаго- и теплопереноса.

Оценивание вектора состояния в моделях энерго- и массообмена требует проведения теоретических и практических исследований особенностей решения этой задачи. Эти особенности определяются специальным видом уравнений динамики процессов влаго- и теплопереноса, большой размерностью и сильной разреженностью систем дискретных уравнений, реализующих численное моделирование этих процессов, а также отмеченными выше недостатками измерительной информации.

Определение неизвестного начального вектора состояния по совокупности измерений связано с решением «обратных задач» математической физики. При этом требуется получить условия разрешимости задачи, исследовать опросы наблюдаемости системы заданной структуры посредством определенного типа измерений. Эта задача весьма актуальна в условиях сильно разреженных матриц перехода и малых объемов измерительной информации. Особенности разностных уравнений, описывающих динамику процессов влаго- и теплопереноса и являющихся дискретным аналогом дифференциальных уравнений параболического типа, приводят к плохой обусловленности систем уравнений оценивания начального состояния векторов водного потенциала и температуры почвы. Это обстоятельство значительно осложняет численное решение задачи оценивания, особенно в нелинейном случае и при больших погрешностях измерений, и требует разработки специальных методов и алгоритмов, позволяющих обеспечить необходимый уровень точности оценивания, и исследования условий сходимости этих методов.

Определение вектора состояния системы на основе зашумленной измерительной информации приводит к необходимости решения задачи оптимального статистического оценивания. Известно, что наиболее распространенным критерием оптимальности процессов оценивания является минимум ковариационной матрицы ошибок оценки. При нелинейном оценивании особую важность приобретает получение аналитического выражения минимальной ковариационной матрицы, так называемой теоретической нижней границы оценки, позволяющей определить предельную точность оценивания для рассматриваемой нелинейной задачи и оценить качество алгоритмов.

Литература

1. Никитин В.В. Математическая модель сети лесовозных автомобильных дорог на основе оптимальных параметров // Теория и практика инновационных технологий в АПК:

материалы нац. науч.-практической конф. (19-21 апр. 2022 г.). Воронеж, 2022. С. 120-134.
2. Тихомиров П.В. Определение геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог по средствам современных it-технологий // Теория и практика

- инновационных технологий в АПК: материалы нац. науч.-практической конф. (19-21 апр. 2022 г.). Воронеж, 2022. С. 134-157.
3. Prokopets V.S. Influence of the strength of the road structure on the re-sistance to movement // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы нац. науч.-практической конф. (19-21 апреля 2022 г.). Воронеж, 2022. С. 168-186.
 4. Никитин В.В. Техничко-экономическая эффективность проектирования сетей лесовозных автомобильных дорог с применением информационно-интеллектуальной системы // Автоматизация. Современные технологии. 2022. Т. 76. № 5. С. 225-229.
 5. Боровлев А.О., Высоцкая И.А. Повышение эффективности лесовозных автомобильных дорог // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 4. С. 9-13.
 6. Чирков Е.В. Экспериментальное исследование методов автоматизированного проектирования трассы лесовозной автомобильной дороги // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 1. С. 29-33.
 7. Болтнев Д.Е. Интегрирование дифференциального уравнения движения лесовозного автопоезда на основе аналитического выражения одной огибающей динамическую характеристику кривой // Строительные и дорожные машины. 2021. № 7. С. 14-20.
 8. Саблин С.Ю. Исследования скоростей движения лесовозного подвижного состава // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 1. С. 37-43.
 9. Жук А.Ю. Исследование математической модели рельефа местности при проектировании автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 2 (50). С. 88-93.
 10. Zelikov V.A. Structural models of road landscapes and micro-landscapes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser «International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production», 2021. P. 012116.
 11. Borovlev A.O. Algorithm for determining the curvature of the project line of a truck haul road and the rate of change in its curvature // Civil Engineering and Architecture. 2021. V. 9. № 5. P. 1582-1589.
 12. Borovlev A.O. Intelligent design system for logging truck roads // SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. V. 69. № 8. P. 89-95.
 13. Никитин В.В. Принципиальные схемы размещения дорожной сети в условиях их целесообразного применения // Строительные и дорожные машины. 2021. № 11. С. 55-59.
 14. Labudin B.V. Increasing pit road inclinations at high latitude deposits of solid minerals // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. V. 15. № 19. P. 2168-2173.
 15. Mogutnov R.V. Designing mathematical models of geometric and technical parameters for modern roadbuilding machines versus the main parameter of the system // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology. Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019), 2019. P. 823-827.
 16. Kozlov V.G. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. V. 25. № 3. P. 678-694.
 17. Бурмистров Д.В., Могутнов Р.В., Рябова О.В., Сафонова Ю.А. Исследование вероятностных связей и зависимостей, определяющих оптимальные методы организации и планирования ритмичного строительства лесовозных автомобильных дорог // Лесной вестн. Forestry Bulletin. 2019. Т. 23. № 1. С. 70-76.
 18. Logoida V.S. Development of the method for individual forecasting of technical state of logging machines // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. V. 8. № 5. P. 2178-2183.
 19. Козлов В.Г. Методы математического моделирования автомобильных дорог и их теоретические основы // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы междунар. науч.-практической конф. молодых ученых и специалистов (14-16 нояб. 2018 г.). Воронеж, 2018. С. 347-355.
 20. Козлов В.Г. Анализ влияния погодно-климатических факторов на системы комплекса водитель-автомобиль-дорога-среда // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы междунар. науч.-практической конф. молодых ученых и специалистов (14-16 нояб. 2018 г.). Воронеж, 2018. С. 324-331.
 21. Козлов В.Г. Теоретические основы и методы математического моделирования лесовозных автомобильных дорог // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2018. № 6 (366). С. 117-127.
 22. Скрыпников А.В. Оценка влияния на скорость движения постоянных параметров плана и профиля при различных состояниях поверхности дороги // Бюллетень транспортной информации. 2018. № 6 (276). С. 23-27.
 23. Бурмистров Д.В. Исследование и моделирование процессов организации и планирования строительства лесовозных автомобильных дорог: дис. ... на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Северный (Арктический) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск, 2018. 206 с.
 24. Skrypnikov A.V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12. № 2. P. 511-515.
 25. Köhler Jochen. Reliability of Timber Structures [Electronic resource]. Zurich: SFIT, 2007. 241 p. URL: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:2337/eth-2337-01.pdf> (дата обращения: 17.11.2022).
 26. Hwang C.L., Masud A. Multiple Objective Decision Making - Methods and Applications: A State of the Art Survey: Lecture Notes in Economics and Matematical Systema № 164, Springer-Verlag. New York, 1979.

References

1. Nikitin V.V. Mathematical model of a network of logging roads based on optimal parameters // Teoriya i praktika innovacionnyh tekhnologij v APK: materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (19-21 apr. 2022 g.). Voronezh, 2022. P. 120-134.
2. Tihomirov P.V. Determination of the geometric elements of logging roads using modern it-technologies // Teoriya i praktika innovacionnyh tekhnologij v APK: materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (19-21 apr. 2022 g.). Voronezh, 2022. P. 134-157.
3. Prokopets V.S. Influence of the strength of the road structure on the resistance to movement // Teoriya i praktika innovacionnyh tekhnologij v APK: materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (19-21 aprelya 2022 g.). Voronezh, 2022. P. 168-186.
4. Nikitin V.V. Technical and economic efficiency of designing logging road networks using an information-intellectual system // Automation and modern technology. 2022. V. 76. № 5. P. 225-229.
5. Borovlev A.O., Vysockaya I.A. Improving the efficiency of logging roads // Modern High Technologies. 2021. № 4. P. 9-13.
6. CHirkov E.V. Experimental study of methods for computer-aided design of the route of a logging road // Automation and modern technology. 2021. V. 75. № 1. P. 29-33.
7. Boltnev D.E. Integration of the differential equation of motion of a timber road train based on the analytical expression of one envelope of the dynamic characteristic of the curve //

- Construction and Road Building Machinery. 2021. № 7. P. 14-20.
8. Sablin S.YU. Studies of the speed of movement of timber rolling stock // *Modern High Technologies*. 2021. № 1. P. 37-43.
 9. ZHuk A.YU. Study of the mathematical model of the terrain in the design of roads // *Systems. Methods. Technologies*. 2021. № 2 (50). P. 88-93.
 10. Zelikov V.A. Structural models of road landscapes and micro-landscapes // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser «International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production»*, 2021. P. 012116.
 11. Borovlev A.O. Algorithm for determining the curvature of the project line of a truck haul road and the rate of change in its curvature // *Civil Engineering and Architecture*. 2021. V. 9. № 5. P. 1582-1589.
 12. Borovlev A.O. Intelligent design system for logging truck roads // *SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2021. V. 69. № 8. P. 89-95.
 13. Nikitin V.V. Principal schemes for the placement of the road network in the conditions of their expedient application // *Construction and Road Building Machinery*. 2021. № 11. P. 55-59.
 14. Labudin B.V. Increasing pit road inclinations at high latitude deposits of solid minerals // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. V. 15. № 19. P. 2168-2173.
 15. Mogutnov R.V. Designing mathematical models of geometric and technical parameters for modern roadbuilding machines versus the main parameter of the system // *Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology. Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*, 2019. P. 823-827.
 16. Kozlov V.G. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // *Journal of the Balkan Tribological Association*. 2019. V. 25. № 3. P. 678-694.
 17. Burmistrov D.V., Mogutnov R.V., Ryabova O.V., Safonova YU.A. Study of probabilistic relationships and dependencies that determine the optimal methods for organizing and planning the rhythmic construction of logging roads // *Lesnoj vestn. Forestry Bulletin*. 2019. V. 23. № 1. P. 70-76.
 18. Logoida V.S. Development of the method for individual forecasting of technical state of logging machines // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019. V. 8. № 5. P. 2178-2183.
 19. Kozlov V.G. Methods of mathematical modeling of roads and their theoretical foundations y // *Innovacionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya APK: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. molodyh uchenyh i specialistov (14-16 noyab. 2018 g.)*. Voronezh, 2018. P. 347-355.
 20. Kozlov V.G. Analysis of the influence of weather and climatic factors on the systems of the complex driver-car-road-environment // *Innovacionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya APK: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. molodyh uchenyh i specialistov (14-16 noyab. 2018 g.)*. Voronezh, 2018. P. 324-331.
 21. Kozlov V.G. Theoretical foundations and methods of mathematical modeling of logging roads // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoj zhurnal (Forestry journal)*. 2018. № 6 (366). P. 117-127.
 22. Skrypnikov A.V. Evaluation of the influence on the speed of the constant parameters of the plan and profile under various conditions of the road surface // *The Bulletin of Transport Information (BTI)*. 2018. № 6 (276). P. 23-27.
 23. Burmistrov D.V. Research and modeling of the processes of organizing and planning the construction of logging roads: dis. ... na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk / Severnyj (Arkticheskij) feder. un-t im. M.V. Lomonosova. Arhangel'sk, 2018. 206 p.
 24. Skrypnikov A.V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. V. 12. № 2. P. 511-515.
 25. Köhler Jochen. Reliability of Timber Structures [Electronic resource]. Zurich: SFTI, 2007. 241 p. URL: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:2337/eth-2337-01.pdf> (data obrashcheniya: 17.11.2022).
 26. Hwang S.L., Masud A. Multiple Objective Decision Making - Methods and Applications: A State of the Art Survey: Lecture Notes in Economics and Matematical Systema № 164, Springer-Verlag. New York, 1979.