

Теоретические исследования машины для тушения лесных низовых пожаров почвогрунтом на склонах

М.В. Драпалюк^a, М.А. Гнусов^b, Д.Ю. Дручинин^c, М.Н. Лысыч^d, В.В. Посметьев^e, Н.О. Ушаков^f

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова,
ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Россия

^a michael1@yandex.ru, ^b mgnusov@yandex.ru, ^c druchinin.denis@rambler.ru,

^d miklynea@yandex.ru, ^e victorvpo@mail.ru, ^f 89155823000@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, ^e <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-7751-235X>

Статья поступила 08.04.2022, принята 28.04.2022

Борьба при помощи почвогрунта с лесными пожарами, распространяющимися по поверхности земли и травянистой растительности, весьма востребована. Рельеф Российской Федерации разнообразен, и лесные насаждения произрастают на площадях с различным рельефом местности, в том числе и на склонах, что, в свою очередь, составляет около трети общего объема леса. Исследование эффективности машины для тушения лесных пожаров почвогрунтом на склонах выполнено с помощью современных компьютерных технологий, в частности, применен метод динамики частиц. При разработке машины для тушения лесных пожаров предусмотрена возможность работы машины на склонах до 20...25°. Имитационная модель позволила оценить эффективность машины на склонах и выявить особенности ее работы. Наиболее логичный и естественный с точки зрения физики и математики способ проверить влияние склона в модели заключается в изменении угла вектора ускорения свободного падения в поперечном (угол склона α) или продольном (угол склона β) направлениях. Ненулевая поперечная или продольная компоненты ускорения свободного падения приводят к дополнительному стремлению фрагментов почвогрунта двигаться в поперечном или продольном направлениях соответственно. Это оказывает влияние как на траекторию движения частиц потока почвогрунта после метания, так и на геометрическую конфигурацию почвогрунта, расположенного на поверхности, подготовленного к метанию (после диска, перед ротором, вблизи ротора). Так как основной причиной снижения эффективности машины на склонах является отклонение от оптимальных условий движения потока почвогрунта внутри грунтотратора, целесообразно использовать грунтотратор с изменяемыми пространственными углами установки, управляемыми оператором или системой управления в зависимости от появления продольных или поперечных составляющих вектора ускорения свободного падения.

Ключевые слова: машина для тушения лесного пожара; грунтотет; склон; почвогрунт; имитационное моделирование.

Theoretical studies of a machine for extinguishing forest ground fires with soil on slopes

M.V. Drapalyuk^a, M.A. Gnusov^b, D.Yu. Druchinin^c, M.N. Lysych^d, V.V. Posmetyev^e, N.O. Ushakov^f

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia

^a michael1@yandex.ru, ^b mgnusov@yandex.ru, ^c druchinin.denis@rambler.ru,

^d miklynea@yandex.ru, ^e victorvpo@mail.ru, ^f 89155823000@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, ^e <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-7751-235X>

Received 08.04.2022, accepted 28.04.2022

Fighting forest fires spreading over the ground and grassy vegetation with the help of soil is in great demand. The relief of the Russian Federation is diverse, and forest plantations grow on areas with different terrain, including slopes, which, in turn, makes up about a third of the total forest volume. The study of the effectiveness of a machine for extinguishing forest fires with soil on slopes is carried out using modern computer technologies, in particular, the particle dynamics method is applied. When developing a machine for extinguishing forest fires, it is possible to operate the machine on slopes up to 20 ... 25°. The simulation model made it possible to evaluate the efficiency of the machine on slopes and to identify the features of its operation. The most logical and natural way from the point of view of physics and mathematics to check the influence of the slope in the model is to change the angle of the free fall acceleration vector in the transverse (slope angle α) or longitudinal (slope angle β) directions. Non-zero transverse or longitudinal components of free fall acceleration lead to an additional tendency of soil fragments to move in transverse or longitudinal directions, respectively. This affects both the trajectory of movement of soil particles after throwing, and the geometric configuration of the soil located on the surface prepared for throwing (after the disk, in front of the rotor, near the rotor). Since the main reason for the decrease in the efficiency of the machine on slopes is the deviation from the optimal conditions for the movement of the soil flow inside the soil pipeline, it is advisable to use a soil pipeline with variable installation spatial angles controlled by the operator or control system, depending on the appearance of longitudinal or transverse components of the gravitational acceleration vector.

Keywords: forest fire extinguishing machine; soil thrower; slope; soil; simulation.

Введение. Рельеф Российской Федерации разнообразен, и лесной фонд располагается на различных участках земли, в том числе и на склонах, что, в свою очередь, составляет около трети общего объема леса. Гибель горных лесных массивов происходит в основном от лесных пожаров, которые имеют свои специфические черты и по характеру развития, и по последствиям, в отличие от равнинных [1].

Среди многочисленных внешних факторов, определяющих пирологические режимы лесных ландшафтов, особое значение имеет рельеф. Это один из основных физико-географических показателей, производной которого является растительность. Даже в пределах одной климатической зоны рельеф создает большое разнообразие лесорастительной фауны [2]. Стоит также отметить, что в результате природных процессов биотопливо скапливается на склонах, как и на равнинных участках леса, что негативно влияет на пожарную безопасность в лесном массиве [3]. В работе [4] отмечены этапы и режимы движения лесных пожаров, указаны сложности в моделировании поведения лесного пожара. Из этого следует, что области научных исследований в лесном хозяйстве как технологический прогресс, так и методы реверс-инжиниринга каждый день движутся вперед, и большое количество вопросов, связанных с лесовосстановлением и защитой леса, в том числе от лесных пожаров, являются открытыми. Необходимо построение моделей и программных продуктов для исследования систем и процессов, ориентированных на новые поколения эволюционного развития.

Первым шагом в теоретическом изучении, в частности, в моделировании лесных пожаров, было внедрение теплового потока в качестве интенсивной линии лесных пожаров [5]. В условиях современных методов компьютерного моделирования физических и технологических процессов особый интерес представляют методы, базирующиеся на концепции дискретного представления вещества, — метод динамики частиц (молекулярной динамики) и метод дискретных элементов [6–10]. Численная модель горных/почвенных сред, принятая в настоящем исследовании, основана на методе сферических дискретных элементов (DEM), который широко признан в качестве подходящего инструмента для моделирования геоматериалов [11–16].

Объекты и методы исследования. *Исследование эффективности машины для тушения лесных пожаров на склонах.* При разработке машины для тушения лесных пожаров предусмотрена возможность работы машины на склонах до 20...25°. Имитационная модель позволила оценить эффективность машины на склонах и выявить особенности ее работы.

Наиболее логичный и естественный с точки зрения физики и математики способ проверить влияние склона в модели заключается в изменении угла вектора ускорения свободного падения в поперечном (угол склона α) или продольном (угол склона β) направлениях. Ненулевая поперечная или продольная компоненты ускорения свободного падения приводят к дополнительному стремлению фрагментов почвогрунта двигаться в поперечном или продольном направлениях соответственно.

Это оказывает влияние как на траекторию движения частиц потока почвогрунта после метания, так и на геометрическую конфигурацию почвогрунта, располагающегося на поверхности и подготовленного к метанию (после диска, перед ротором, вблизи ротора).

Влияние угла поперечного склона. Для изучения влияния угла поперечного склона α на показатели эффективности машины для тушения лесных пожаров проведена серия компьютерных экспериментов, в которой изменяли угол α от -30° до $+30^\circ$ с шагом 10° . Отрицательные углы α (рис. 1, *а*) соответствуют метанию почвогрунта вниз по склону, при этом можно ожидать увеличения дальности метания (рис. 1, *а*); положительные углы α — соответствуют метанию почвогрунта вверх по склону, при этом можно ожидать уменьшения дальности метания.

Как видно на поперечных проекциях XZ , наличие боковой составляющей вектора ускорения свободного падения приводит к незначительному наклону плоскости поверхности почвогрунта (рис. 1, *а, в*) в результате интенсифицирующего воздействия на почвогрунт машины для тушения лесных пожаров.

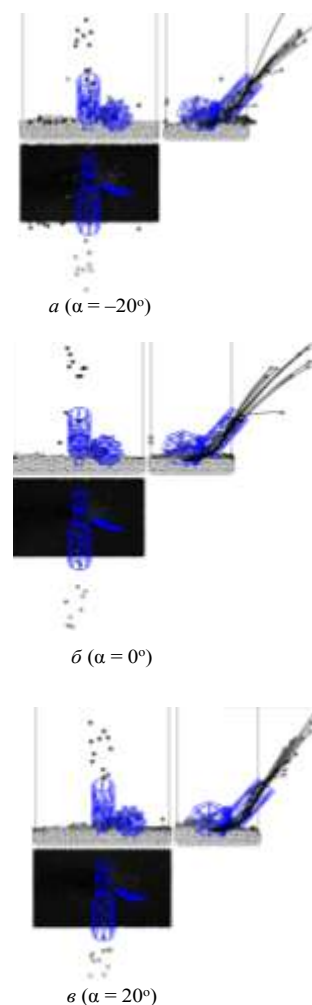


Рис. 1. Характер движения почвогрунта в процессе работы машины для тушения лесных пожаров в трех проекциях при различных углах α склона в поперечном направлении

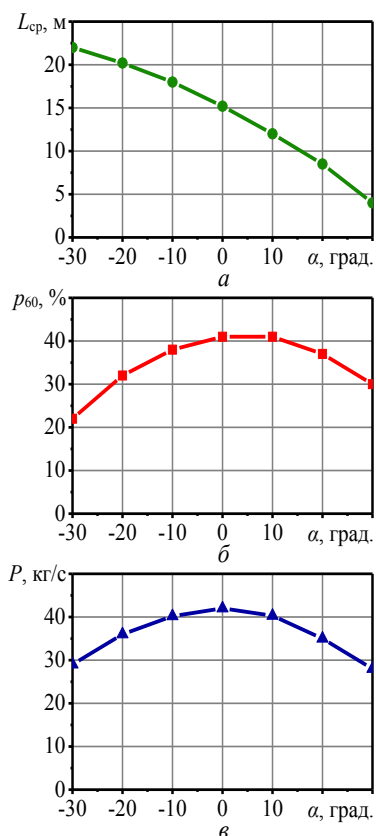


Рис. 2. Влияние угла α склона в поперечном направлении на среднюю дальность метания почвогрунта L_{cp} , долю почвогрунта в полосе шириной 60 см p_{60} и производительность машины P

Проведенная серия компьютерных экспериментов позволила установить, что с увеличением угла α склона от -30 до $+30^\circ$ снижается дальность метания почвогрунта с 23,8 до 4,1 м (рис. 2, *a*). Такая зависимость обусловлена тем, что при отрицательных углах α производится метание вниз по склону, и почвогрунт движется по траектории, близкой к широкой параболе. В результате этого точка оседания почвогрунта на поверхность склона находится далеко от машины для тушения лесных пожаров почвогрунтом. При положительных же углах склона α производится метание вверх по склону, и почвогрунт движется по траектории, близкой к узкой параболе, с точкой оседания почвогрунта, незначительно отдаленной от машины для тушения лесных пожаров почвогрунтом, в поперечном направлении.

Показатель кучности метания почвогрунта p_{60} достигает максимума при метании незначительно вверх по склону с углами склона $0...10^\circ$ (рис. 2, *б*). При значительном увеличении или уменьшении угла склона показатель кучности снижается преимущественно из-за неоптимальности условий захвата почвогрунта ротором и движения почвогрунта внутри машины. Дополнительной, но менее выраженной причиной снижения кучности в сторону отрицательных углов склона является увеличение дальности метания и, соответственно, расширение полосы осадения почвогрунта.

Производительность машины для тушения лесных пожаров почвогрунтом максимальна при работе на горизонтальной поверхности, и при увеличении или уменьшении угла поперечного склона до 30° снижается

с 42 до 28...29 кг/с (рис. 2, *в*). Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, при наличии боковой составляющей вектора ускорения свободного падения поток почвогрунта после диска и до ротора смещается в боковом направлении от оси ротора, поэтому ротор захватывает меньший объем почвогрунта. Во-вторых, условия движения почвогрунта после ротора внутри направляющего грунтопровода отличаются от оптимальных (почвогрунт больше прижимается к одной или другой стенкам грунтопровода), поэтому снижается поток почвогрунта, переведенного в полезный баллистический режим, и увеличивается поток почвогрунта, оседающего обратно на поверхность из грунтопровода.

Таким образом, машина для тушения лесных пожаров остается эффективной при углах поперечного склона от -20 до $+15^\circ$. При этом обеспечивается дальность метания от 10 до 24 м, кучность осадения почвогрунта в полосе шириной 60 см — от 32 до 42 %, производительность машины — от 36 до 42 кг/с.

Влияние угла продольного склона. В рамках реализации серии компьютерных экспериментов по изучению влияния угла продольного склона β на показатели эффективности машины для тушения лесных пожаров изменяли угол β так же, как и α , от -30 до $+30^\circ$ с шагом 10° . Отрицательные углы β (рис. 3, *a*) соответствуют движению машины для тушения лесных пожаров вниз по склону, положительные — движению машины вверх по склону (рис. 3, *в*).

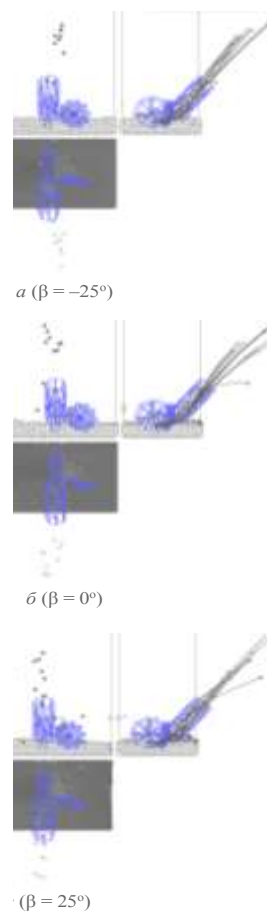


Рис. 3. Характер движения почвогрунта в процессе работы машины для тушения лесных пожаров в трех проекциях при различных углах β склона в продольном направлении

Как видно на продольных проекциях YZ , наличие продольной составляющей вектора ускорения свободного падения приводит к незначительному наклону плоскости поверхности почвогрунта (рис. 3, а, в) в результате интенсифицирующего воздействия на почвогрунт машины для тушения лесных пожаров.

В результате компьютерных экспериментов установлено, что в случаях движения машины вверх по склону и вниз по склону практически однотипно происходит незначительное ухудшение показателей эффективности машины.

Основной причиной ухудшения показателей эффективности машины при отклонении угла β продольного склона от нулевого значения является отклонение от оптимальных условий перемещения потока почвогрунта внутри машины (преимущественно при контакте с грунтопроводом). Отклонение угла β в отрицательном или положительном направлении до 30° приводит к снижению дальности метания почвогрунта с 15,2 до 11...12 м (рис. 4, а), снижению показателя кучности осадения почвогрунта в целевой полосе шириной 60 см с 41 до 36 %, снижению производительности машины с 42 до 38 кг/с.

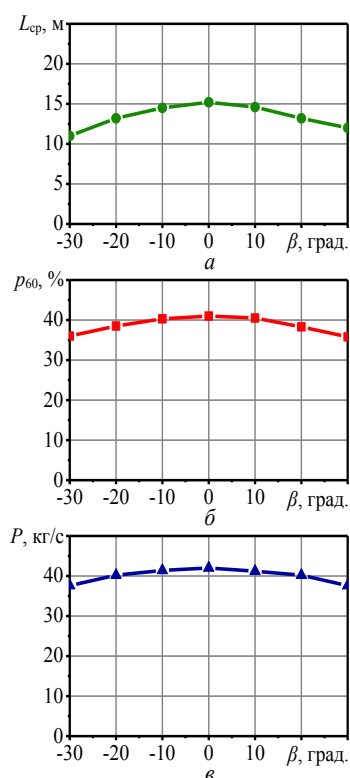


Рис. 4. Влияние угла β склона в продольном направлении на среднюю дальность метания почвогрунта $L_{ср}$, долю почвогрунта в полосе шириной 60 см p_{60} и производительность машины P

Литература

1. Павличенко Е.А., Буряк Л.В. Оценка влияния экспозиции склонов на горимость и потери лесного покрова Южно-Сибирской горной страны // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии: докл. VII Всерос. конф. с междунар. участием. М.: ЦЭПЛ РАН, 2019. С. 146-148.

В целом снижение показателей эффективности машины при движении вверх или вниз по склону не так значительно, как при движении со значительными углами склона в поперечном направлении. Поэтому разработанная машина для тушения лесных пожаров практически сохраняет эффективность при движении вверх или вниз по склону.

Так как основной причиной снижения эффективности машины на склонах является отклонение от оптимальных условий движения потока почвогрунта внутри грунтопровода, целесообразно использовать почвогрунтопровод с изменяемыми пространственными углами установки, управляемыми оператором или системой управления в зависимости от появления продольных или поперечных составляющих вектора ускорения свободного падения.

Заключение

Машина для тушения лесных пожаров остается эффективной при углах поперечного склона от -20 до 15° . При этом обеспечивается дальность метания от 10 до 24 м, кучность осадения почвогрунта в полосе шириной 60 см — от 32 до 42 %, производительность машины — от 36 до 42 кг/с. Отклонение угла β в отрицательном или положительном направлении до 30° приводит к снижению дальности метания почвогрунта с 15,2 до 11...12 м (рис. 4, а), снижению показателя кучности осадения почвогрунта в целевой полосе шириной 60 см с 41 до 36 %, снижению производительности машины с 42 до 38 кг/с. Разработанная машина для тушения лесных пожаров практически сохраняет эффективность при движении вверх или вниз по склону. Некоторое снижение показателей эффективности машины на 10...20 % при движении вверх или вниз по склону не так значительно, как при движении со значительными углами склона в поперечном направлении, при котором могут снижаться показатели эффективности на 25...75 %. Так как основной причиной снижения эффективности машины на склонах является отклонение от оптимальных условий движения потока почвогрунта внутри грунтопровода, целесообразно использовать грунтопровод с изменяемыми пространственными углами установки, управляемыми оператором или системой управления в зависимости от появления продольных или поперечных составляющих вектора ускорения свободного падения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-38-60041

2. Смагин В.Н. Типы лесов гор южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1980. 334 с.
3. Матвеева Т.А., Цыкалов А.Г. Роль рельефа в формировании запасов лесных горючих материалов // Хвойные бореальной зоны. 2010. Т. 27. № 3-4. С. 327-329.
4. Xavier Viegas Domingos. 1998. Forest fire propagation Phil. Trans. R. Soc. A.3562907-2928.

- URL: <http://doi.org/10.1098/rsta.1998.0303> (дата обращения: 28.04.2022).
5. Bakhshaii Atoossa, Johnson E.A. A review of a new generation of wildfire-atmosphere modeling // Canadian Journal of Forest Research. 2019. n. pag.
 6. Кривцов А.М. Деформация и разрушение твердых тел с микроструктурой. М.: Физматлит, 2007. 304 с.
 7. Арсентьев В.А. Методы динамики частиц и дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации процессов переработки природных и техногенных материалов // Обогащение руд. 2010. № 1. С. 30-35.
 8. Попиков П.И., Дручинин Д.Ю., Шерстюков Н.А. Методика моделирования лесной почвы при взаимодействии с рабочими органами лесохозяйственных машин // Resources and Technology. 2017. V. 14. № 3. P. 1-12.
 9. Драпалюк М.В., Бартнев И.М., Гнусов М.А., Дручинин Д.Ю. Математическая модель процесса подачи и выброса почвогрунта рабочими органами комбинированной машины для тушения лесных пожаров // Политематический сетевой электр. науч. журнал Кубанского гос. аграрного ун-та. 2012. № 84. С. 232-246.
 10. Попиков П.И., Гончаров П.Э., Шаров А.В. Математическая модель рабочего процесса лесного пожарного грунтомета с энергосберегающим гидроприводом // Лесотехнический журнал. 2017. № 4. С. 182-189.
 11. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical method for granular assemblies Geotechnique, 29. 1979. P. 47-65.
 12. Campbell C.S. Rapid granular flows Annu. Rev. Fluid Mech., 2. 1990. P. 57-92.
 13. Mustoe G. (Ed.), Eng. Comput., 9(2), 1992 (Special issue on Discrete Element Methods).
 14. Williams J.R., O'Connor R. Discrete element simulation and the contact problem Arch. Comput. Methods Engrg., 6 (4). 1999. P. 279-304.
 15. Драпалюк М.В., Бартнев И.М., Гнусов М.А., Дручинин Д.Ю. Математическая модель процесса подачи и выброса почвогрунта рабочими органами комбинированной машины для тушения лесных пожаров // Политематический сетевой электр. науч. журнал Кубанского гос. аграрного ун-та. 2012. № 84. С. 232-246.
 16. Drapalyuk M., Stupnikov D., Druchinin D., Pozdnyakov E. Forest fires: methods and means for their suppression // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. 226. P. 012061.
 2. Smagin V.N. Types of forests in the mountains of southern Siberia. Novosibirsk: Nauka, 1980. 334 p.
 3. Matveeva T.A., Cykalov A.G. The role of relief in the formation of reserves of forest combustible materials // Conifers of the boreal area. 2010. V. 27. № 3-4. P. 327-329.
 4. Xavier Viegas Domingos. 1998. Forest fire propagation Phil. Trans. R. Soc. A.3562907-2928.
URL: <http://doi.org/10.1098/rsta.1998.0303> (data obrashcheniya: 28.04.2022).
 5. Bakhshaii Atoossa, Johnson E.A. A review of a new generation of wildfire-atmosphere modeling // Canadian Journal of Forest Research. 2019. n. pag.
 6. Krivcov A.M. Deformation and destruction of solids with microstructure. M.: Fizmatlit, 2007. 304 p.
 7. Arsent'ev V.A. Methods of dynamics of particles and discrete elements as a tool for research and optimization of the processing of natural and technogenic materials // Obogashchenie Rud (Mineral processing). 2010. № 1. P. 30-35.
 8. Popikov P.I., Druchinin D.YU., SHERstyukov N.A. Technique for modeling forest soil in interaction with the working bodies of forestry machines // Resources and Technology. 2017. V. 14. № 3. P. 1-12.
 9. Drapalyuk M.V., Bartenev I.M., Gnuosov M.A., Druchinin D.YU. Mathematical model of the process of supply and ejection of soil by the working bodies of a combined machine for extinguishing forest fires // Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2012. № 84. P. 232-246.
 10. Popikov P.I., Goncharov P.E., SHarov A.V. Mathematical model of the working process of a forest fire soil thrower with an energy-saving hydraulic drive // Forestry Engineering Journal. 2017. № 4. P. 182-189.
 11. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical method for granular assemblies Geotechnique, 29. 1979. P. 47-65.
 12. Campbell C.S. Rapid granular flows Annu. Rev. Fluid Mech., 2. 1990. P. 57-92.
 13. Mustoe G. (Ed.), Eng. Comput., 9(2), 1992 (Special issue on Discrete Element Methods).
 14. Williams J.R., O'Connor R. Discrete element simulation and the contact problem Arch. Comput. Methods Engrg. 6 (4). 1999. P. 279-304.
 15. Drapalyuk M.V., Bartenev I.M., Gnuosov M.A., Druchinin D.YU. Mathematical model of the process of supply and ejection of soil by the working bodies of a combined machine for extinguishing forest fires // Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2012. № 84. P. 232-246.
 16. Drapalyuk M., Stupnikov D., Druchinin D., Pozdnyakov E. Forest fires: methods and means for their suppression // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. 226. P. 012061.

References

1. Pavlichenko E.A., Buryak L.V. Evaluation of the influence of slope exposure on fire and loss of forest cover in the South Siberian mountainous country // Aerokosmicheskie metody i geoinformacionnye tekhnologii v lesovedenii, lesnom hozyajstve i ekologii: dokl. VII Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem. M.: CEPL RAN, 2019. P. 146-148.