

Механизмы формирования оползней повышенной опасности (быстрых и протяженных)

В.В. Дьяченко¹, В.А. Туркин²✉, А.Е. Воробьев³, В.В. Кукарцев^{4,5}, Я.А. Тынченко^{6,5}

¹ Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, г. Новороссийск, Российская Федерация

² Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск, Российская Федерация

³ Ферганский медицинский институт общественного здоровья, г. Фергана, Республика Узбекистан

⁴ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Российская Федерация

⁵ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация

⁶ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

✉ turvla@mail.ru

Резюме: Представлены результаты исследования механизма формирования и передвижения быстрых и протяженных глинистых оползней, характеризующихся повышенной опасностью и катастрофичностью последствий для техносферы и особенно геологической среды. Рассмотрены последствия оползней, происшедших в различных физико-географических зонах, с различным минералого-петрографическим составом горных пород. При анализе особенностей формирования оползней учитывались уклоны склона, абсолютные отметки и относительные превышения, изменения уклонов, расчлененности рельефа и экспозиции склона, площади водосборов, близость водных объектов, тектоника, а также состав горных пород. Объяснены три механизма, обуславливающих перемещение геомассы оползней: под влиянием сил гравитации, псевдооживления и смазки ложа оползня по направлению движения. Установлено, что только силы гравитации не обеспечивают быстрое перемещение значительных геомасс на дальние расстояния. Важным фактором является снижение трения на ложе оползня благодаря смазке, которая образуется в результате проникновения дождевых осадков или геохимического преобразования тонкого слоя подстилающих пород в процессе перемещения геомассы оползня. Оползни рассмотренного генезиса могут представлять большую опасность для различных горных выработок, карьеров, фактически для любых форм деятельности и объектов по направлению горное дело.

Ключевые слова: оползни, механизмы перемещения, гравитация, геохимическое преобразование подстилающих пород, экологическая устойчивость, наноподшипники

Для цитирования: Дьяченко В.В., Туркин В.А., Воробьев А.Е., Кукарцев В.В., Тынченко Я.А. Механизмы формирования оползней повышенной опасности (быстрых и протяженных). *Горная промышленность*. 2024;(4):96–100. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-96-100>

Mechanisms of high hazard landslide formation (rapid and slow)

V.V. Dyachenko¹, V.A. Turkin²✉, A.E. Vorobev³, V.V. Kukartsev^{4,5}, Ya.A. Tynchenko^{6,5}

¹ Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) of Kuban State Technological University, Novorossiysk, Russian Federation

² State Maritime University named after Admiral F.F. Ushakova, Novorossiysk, Russian Federation

³ Fergana Medical Institute of Public Health, Fergana, Republic of Uzbekistan

⁴ Siberian State University of Science and Technology named after M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russian Federation

⁵ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

⁶ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ turvla@mail.ru

Abstract: The article discusses the results of studying the mechanism of formation and movement of rapid and slow clay landslides characterized by increased danger and catastrophic consequences for the technosphere. The consequences of landslides that occurred in various physical and geographical zones with different mineralogical and petrographic composition of rocks are considered. The analysis of the landslide formation features takes into account the slope gradients, actual elevations and local differences in elevation, changes in slope gradients, terrain roughness and direction of slopes, catchment areas, proximity of water bodies, tectonics, as well as the composition of soils and rocks. Three mechanisms that cause the movement of the landslide geomaterials are explained: the impact of gravity forces, fluidization and lubrication of the landslide bed in the direction of movement. It has been established that the gravity forces alone do not enable the rapid displacement of significant masses of geomaterials over long distances. An important factor is the reduced friction at the landslide bed due to lubrication, which is formed as a result of rainfall infiltration or geochemical transformation of a thin layer of bedrock in the course of the landslide geomaterial displacement. Landslides of the discussed genesis can pose a great hazard to various mine workings, open pits, in fact to any form of activity and facilities of the mining industry.

Keywords: landslides, movement mechanisms, gravity, geochemical transformation of underlying rocks, environmental sustainability, nanoparticles

For citation: V.V. Dyachenko, Turkin V.A., Vorobev A.E., Kukartsev V.V., Tynchenko Ya.A. Mechanisms of high hazard landslide formation (rapid and slow). *Russian Mining Industry*. 2024;(4):96–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-96-100>

Введение

Убытки, вызванные оползнями, составляют более 5% общих экономических потерь, вызванных землетрясениями, а в густонаселенных горных регионах потери могут быть намного выше. Большую опасность оползни представляют для различных горных выработок, карьеров, фактически для любых форм деятельности по направлению горное дело. Механизмы развития гравитационных склоновых процессов (разрушение и движение склонов) обычно схематически подразделяются на четыре стадии: предразрушительная стадия; стадия разрушения; послеразрушительная стадия; стадия реактивации. В современных моделях обычно не учитываются предразрушительная стадия и кинематика нестабильного грунтового массива после разрушения [1].

Анализ устойчивости склонов в жестких глинах сложен. Упрощенные подходы, такие как метод предельного равновесия, не способны решить проблему прогнозирования устойчивости склонов в жестких глинах. Традиционные численные методы могут эффективно использоваться для прогнозирования деформационных процессов, происходящих в откосах на предразрушительной стадии [2–4]. Однако могут проявиться серьезные недостатки численных методов из-за значительной трансформации морфологии оползневого тела при больших смещениях, например, после разрушения. Для преодоления этого ограничения необходимы альтернативные численные методы, например, использующие способ Эйлера [5], основанные на обработке больших массивов данных. В последнее время было разработано несколько численных методов для анализа задач большой деформации, которые можно использовать и в горном деле. Наиболее распространенными из них являются метод гидродинамики сглаженных частиц и метод материальной точки [6–9]. Но, в любом случае, в основе всякого анализа и прогноза развития оползневых процессов должны лежать особенности горных пород, формирующих склон. Данная работа в большей степени посвящена исследованию влияния минералого-петрографических и геохимических особенностей грунта на развитие гравитационных склоновых процессов.

Методы исследования

Задачи исследования реализованы с помощью следующих двух групп методов: вариационно-статистического, для обработки фактического материала, характеризующего рассмотренные оползни, и различных стандартных физико-химических методов по исследованию грунтов – инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, твердотельный ядерный магнитный резонанс, оптическая микроскопия и рентгеновская порошковая дифракция.

В первую очередь рассматривались такие базовые характеристики оползней, как морфология распределения масс, тип, объем, охват площади и т. д. Детальные исследова-

ния взаимосвязи формирования оползней с такими факторами, как литология и морфология горных пород, образующих склоны, проводились в Чеченской республике, где распространены отложения четвертичного, неогенового и верхнепалеогенового возраста, а также терригенно-карбонатные массивы нижнего палеогена и верхнего мела [10; 11]. Представленный в данной работе анализ особенностей формирования и поведения оползней, их возможного влияния на добычу полезных ископаемых и техносферную безопасность различных горных выработок произведен нами вариационно-статистическим методом с помощью программного комплекса LANDSLIDEMODELLER [12; 13].

Обсуждение

Оползни относятся к гравитационным процессам, которые представляют собой смещение горных пород одновременно по типу скольжения и обвала [10; 14]. Исследования показали, что только силами гравитации перемещение огромных объемов грунта на большие расстояния и с высокой скоростью можно объяснить не всегда. Результаты вариационно-статистической обработки и обобщения различных исследований [10; 15] позволили сформулировать следующие предпосылки формирования оползней.

1. Чаще всего (90% случаев) оползневые склоны имеют уклон более 20° и в основном, как это показано на рис. 1, от 20–35°.

2. Наиболее распространены оползни в горах с абсолютной высотой до 1200 м и с протяженностью склона 200–400 м.

3. На горных склонах северной экспозиции количество оползней в 2 раза больше, чем на склонах в других направлениях. Это обусловлено меньшей солнечной инсоляцией и меньшим испарением влаги с почвы, а также большей влажностью грунтов северных склонов.

4. Вблизи тектонических нарушений (расстояние менее 0,5 км до масштабных разломов) количество оползней в 2 раза больше, чем на склонах с большим расстоянием.

5. Вблизи ручьев или рек (с расстоянием менее 5 км) количество оползней на горных склонах в 3 раза выше, чем на остальных склонах.

6. Связь между частотой схода оползней и площадью водосбора не обнаружена.

7. Не установлена существенная связь между оползнями и литологией горных пород. Хотя очевидно, что массы грунта терригенно-карбонатного состава не отличаются быстрым и далеким перемещением, даже при наличии субпараллельных канав (трещин) отрыва (длиной 30–120 м). Они могут существовать в стабильном состоянии достаточно долго, даже после отсоединения от основного массива грунта.

8. Следует уделить большее внимание направлению и углу падения пластов горных пород при оценке формирования оползней, а также различным техногенным факторам (дорогам, шламонакопителям, карьерам, другим

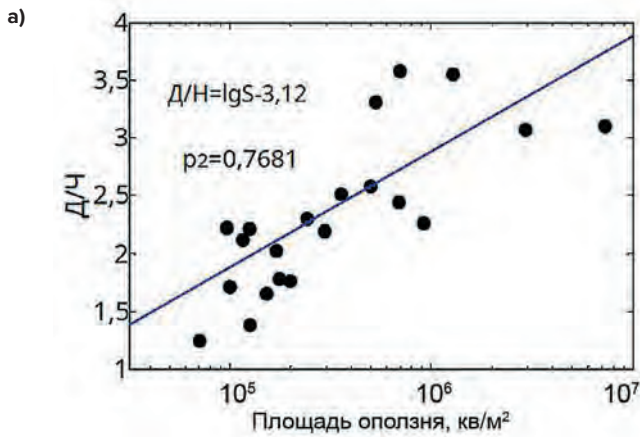


Рис. 1
Связь дистанции смещения геомасс с (а) площадью оползня и (б) его объемом
Источник: [15]

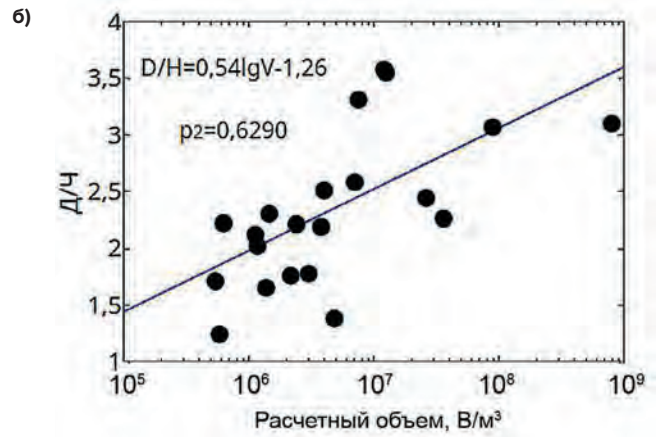


Fig. 1
Relationship between the distance of geomaterial displacement and the landslide area (a) and its volume (b)
Source: [15]

горным выработкам, ГОКам), деятельность которых на определенном этапе может стать триггером оползней [16].

Большие исследования были посвящены сходу в Китае в 2008 г. громадного оползня Дагуанбао. Он был вызван землетрясением (8,2 балла) и очень быстро переместил вниз по склону горы более 1 км³ обломочного материала на расстояние около 5 км от поверхности отрыва, а площадь поверхности оползня составила 7,2 км² [15]. В результате трения геомасс оползня о породы ложа динамически рекристаллизованный слой мощностью около 1 мм нагрелся до температуры более 850°C, что достаточно для начала разложения доломита [17]. В результате произошло испарение CO₂ из доломита, что дополнительно снизило величину трения (коэффициент трения составлял $\mu \approx 0,05$). В результате высоких температур и давления в нижней части оползня образовался слой пониженной вязкости, который уменьшил трение скольжения геомасс оползня. Взаимодействие этих механизмов позволило оползню Дагуанбао достичь скорости перемещения около 60 м/с. Исследования показали, что траектория и протяженность движения оползня определяются геометрическими параметрами склона, пропорциональны его площади и объему обломочного материала.

Другим примером быстрого перемещения оползней, образовавшихся в результате землетрясений, служит Гиссарское – в Таджикистане, произошедшее 23 января 1989 г. [18]. Предпосылкой его возникновения являлось интенсивное обводнение грунта высокого глинистого холма, у подножия которого находился пос. Шарор, а основание холма было подрезано выработкой для прокладки дороги и коммуникаций. После первых сейсмических колебаний верхушка этого холма потеряла устойчивость и огромная, высотой в несколько метров и шириной в два километра масса размокшей глины и обломочного материала устремилась вниз. Подобные быстрые оползни наблюдаются в разных районах Земли. Наибольшую опасность для селитебных ландшафтов и горнодобывающей инфраструктуры представляют грунтовые (глиняные) оползни, механизм действия которых основан на проявлении физико-химических свойств так называемых «быстрых» глин, которые широко развиты в Норвегии и Швеции, а также встречаются в России, Финляндии,

Канаде и Аляске. Механизм электростатической дестабилизации структуры глинистых агрегатов и формирования быстрых оползней подробно рассмотрен в работе [12].

Обобщение моделей перемещения оползней позволяет выделить три основные группы факторов (причин) [15]: объемное псевдооживление и гидродинамический поток массы оползня (по типу селя); механизмы потери геомассы в сочетании с нормальным фрикционным скольжением; различные варианты смазки ложа оползня по направлению движения (рис. 1).

Механизм быстрого перемещения геомассы оползней, предложенный авторами, обусловлен морфологией глинистых наночастиц и прежде всего галлуазита, выполняющих роль эффективной смазки на поверхностях скольжения. Галлуазит – глинистый минерал подкласса слоистых силикатов, имеет гипергенное происхождение и по составу близок к каолиниту. Но, в отличие от каолинита, наночастицы которого имеют пластинчатую форму, наноагрегаты галлуазита представляют собой нанотрубки (длиной 0,5–2 мкм и диаметром около 200 нм), в которых листы алюмосиликата свернуты в спираль. Оболочки галлуазитовых трубок включают 15–20 слоев. Эти наночастицы имеют огромную механическую прочность, выдерживают высокие температуры и колоссальное давление. При этом необходимо заметить, что нанотрубки галлуазита обычно имеют высокое содержание воды из-за наличия единичных слоев, разделенных молекулами воды, а также ионами металлов. Для того чтобы галлуазитовые нанотрубки могли эффективно выполнять роль природных подшипников при перемещении геомассы оползней, случайное распределение ориентации нанотрубок должно быть перестроено, иначе их несоосность будет помехой снижению трения. И это возможно под влиянием возникающего при перемещении геомассы оползня локального магнитного поля и особенностей строения и распределения заряженных частиц в галлуазитовых нанотрубках [13].

Заключение

В результате обобщения материалов и проведенных исследований уточнены три механизма формирования быстрых и протяженных глинистых оползней: под влиянием

янием сил гравитации, псевдооживления и смазки ложа оползня во время скольжения. Установлено, что только силы гравитации не обеспечивают быстрого перемещения значительных геомасс на дальние расстояния. Важным фактором является снижение трения на ложе оползня благодаря смазке, которая образуется в результате проникновения дождевых осадков или геохимического преобразования тонкого слоя подстилающих пород в процессе перемещения геомассы оползня. Третий механизм

может заключаться в участии наночастиц нижнего слоя оползня в качестве природных наноподшипников, самоорганизующихся под влиянием локального магнитного поля, возникающего при перемещении оползня. Оползни рассмотренного генезиса могут представлять большую опасность для различных горных выработок, карьеров, фактически для любых форм деятельности и объектов по направлению горное дело.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares no relevant conflict of interests.

Вклад авторов

Авторы заявляют о равноценном вкладе всех соавторов в работу.

Authors' contribution

The authors declare equal contribution of all co-authors to the work.

Список литературы / References

- Leroueil S. Natural slopes and cuts: movement and failure mechanism. *Geotechnique*. 2001;51(3):197–243. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.3.197>
- Conte E., Donato A., Troncone A. A finite element approach for the analysis of active slow-moving landslides. *Landslides*. 2014;11(4):723–731. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0446-9>
- Troncone A., Conte E., Donato A. Two and three-dimensional numerical analysis of the progressive failure that occurred in an excavation-induced landslide. *Engineering Geology*. 2014;183:265–275. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.027>
- Conte E., Donato A., Pugliese L., Troncone A. Analysis of the Maierato landslide (Calabria, Southern Italy). *Landslides*. 2018;15(10):1935–1950. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0997-x>
- Crosta G.B., Imposimato S., Roddeman D.G. Numerical modelling of large landslides stability and runout. *Natural Hazards and Earth System Science*. 2003;3(6):523–538. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-523-2003>
- Calveti F., di Prisco C.G., Vairaktaris E. DEM assessment of impact forces of dry granular masses on rigid barriers. *Acta Geotechnica*. 2017;12(1):129–144. <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0434-z>
- Malozymov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Qi M. Mathematical modeling of mechanical forces and power balance in electromechanical energy converter. *Mathematics*. 2023;11(10):2394. <https://doi.org/10.3390/math11102394>
- Pirulli M., Pastor M. Numerical study on the entrainment of bed material into rapid landslides. *Geotechnique*. 2012;62(11):959–972. <https://doi.org/10.1680/geot.10.P.074>
- Fern J., Rohe A., Soga K., Alonso E. *The material point method for geotechnical engineering*. A Practical Guide. CRC Press; 2019. 442 p. <https://doi.org/10.1201/9780429028090>
- Жуков И.А., Голиков Н.С., Мартюшев Н.В. Рационализация конструкции секции скребкового конвейера средствами автоматизированного метода анализа прочностных характеристик. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022;14(1):142–150.
Zhukov I.A., Golikov N.S., Martyushev, N.V. Design rationalization of the scraper conveyor section by means of an automated method of strength characteristics analysis. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(1):142–150. (In Russ.)
- Босиков И.И., Ключев Р.В., Силаев И.В., Стась Г.В. Комплексная оценка трудноформализуемых вентиляционно-технологических процессов на угольных шахтах. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(3):516–527. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-516-527>
Bosikov I.I., Klyuev R.V., Silaev I.V., Stas G.V. Comprehensive assessment of formalized ventilation difficulty and technological processes in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(3):516–527. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-516-527>
- Босиков И.И., Ключев Р.В., Хетагуров В.Н., Силаев И.В. Комплексная оценка гидродинамических процессов на карьере клинского месторождения с помощью методов управления ими в массивах горных пород. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(2):284–297.
Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N., Silaev I.V. Comprehensive assessment of hydrodynamic processes in the Klinskoye Quarry with the use of their control methods in rock masses. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(2):284–297. (In Russ.)

13. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Kondratiev V.V., Tynchenko V.S., Gladkikh V.A. et al. Reuse and mechanochemical processing of ore dressing tailings used for extracting Pb and Zn. *Materials*. 2023;16(21):7004. <https://doi.org/10.3390/ma16217004>
14. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Valuev D.V., Qi M. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks. *Mathematics*. 2024;12(3):480. <https://doi.org/10.3390/math12030480>
15. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Kukartsev V.V., Konyukhov V.Y. et al. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media. *Geosciences*. 2024;14(4):102. <https://doi.org/10.3390/geosciences14040102>
16. Kuznetsov D.V., Klyuev S.V., Ryazanov A.N., Sinitin D.A., Pudovkin A.N., Kobeleva E.V., Nedoseko I.V. Dry mixes on gypsum and mixed bases in the construction of low-rise residential buildings using 3D printing technology. *Construction Materials and Products*. 2023;6(6):5. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-6-5>
17. Sinitin D.A., Elrefaei A.E.M.M., Glazachev A.O., Kuznetsov D.V., Parfenova A.A., Volokitina I.E. et al. Study of the characteristics of pavement elements made of rein-forced soil with the use of secondary resources. *Construction Materials and Products*. 2023;6(6):2. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-6-2>
18. Krestinenko N.V. Vernacular architecture in the space of a modern city, based on deep learning methods and three-dimensional structural analysis. *Construction Materials and Products*. 2023;6(6):9. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-6-9>

Информация об авторах

Дьяченко Владимир Викторович – доктор географических наук, профессор, Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, г. Новороссийск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-0479-2909>; e-mail: v-v-d@mail.ru

Туркин Владимир Антонович – доктор технических наук, профессор, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2945-6143>; e-mail: turvla@mail.ru

Воробьев Александр Егорович – доктор технических наук, профессор, проректор, Ферганский медицинский институт общественного здоровья, г. Фергана, Республика Узбекистан; <https://orcid.org/0000-0002-7324-428X>; e-mail: fogel_al@mail.ru

Кукарцев Владислав Викторович – кандидат технических наук, доцент, кафедра информационно-экономических систем, ИИЭ, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Российская Федерация; НОЦ Технологии искусственного интеллекта, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация; ResearcherID: U-6956-2019, Scopus Author ID: 57202283852, SPIN-код: 3522-2910, <https://orcid.org/0000-0001-6382-1736>; e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru

Тынченко Ядвига Александровна – младший научный сотрудник, Лаборатория биотопливных композиций, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация; НОЦ Технологии искусственного интеллекта, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: t080801@yandex.ru

Information about the authors

Vladimir V. Dyachenko – Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) of the Kuban State Technological University, Novorossiysk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-0479-2909>; e-mail: v-v-d@mail.ru

Vladimir A. Turkin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2945-6143>; e-mail: turvla@mail.ru

Alexander E. Vorobev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-rector, Fergana Medical Institute of Public Health, Fergana, Fergana, Republic of Uzbekistan; <https://orcid.org/0000-0002-7324-428X>; e-mail: fogel_al@mail.ru

Vladislav V. Kukartsev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Information and Economic Systems, IIE, Siberian State University of Science and Technology named after M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russian Federation; Artificial Intelligence Technology Scientific and Education Center, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation; ResearcherID: U-6956-2019, Scopus Author ID: 57202283852, <https://orcid.org/0000-0001-6382-1736>; e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru

Yadвига A. Tynchenko – Junior Researcher, Laboratory of Biofuel Compositions, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; Artificial Intelligence Technology Scientific and Education Center, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation; e-mail: t080801@yandex.ru

Article info

Received: 25.05.2024

Revised: 01.07.2024

Accepted: 05.07.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.05.2024

Поступила после рецензирования: 01.07.2024

Принята к публикации: 05.07.2024