

УДК 551.435

Воробьев Александр Егорович,
*Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщикова*
Воробьев Александр Егорович,
*академик М.Д. Миллионщиков атындагы
Грозный мамлекеттик мунай техникалык университети*
Vorobyov Alexander Egorovich,
*Grozny State Oil Technical University
named after Academician M.D. Millionshchikov*

Кожогулова Гульмира Камчибековна,
Научная станция РАН в Бишкеке
Кожогулова Гульмира Камчибековна,
Россия илимдер академиясынын Бишкектеги Илимий станциясы
Kozhogulova Gulmira Kamchibekovna,
Scientific station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek

ТЕЗ ЖАНА УЗАККА СОЗУЛГАН ЧОПО ЖЕР КӨЧКҮЛӨРҮН ИЗИЛДӨӨ

Аннотация. Тез жана узун чопо жер көчкүлөрүн изилдөөнүн жыйынтыктары сунушталды. Геомассанын жер көчкүнүн жылышын шарттаган үч механизм түшүндүрүлдү: тартылуу күчтөрүнүн таасири астында, айдоо жана жер көчкүнүн керебетин трассалардын түбү боюнча майлоо. Тартылуу күчтөрү олуттуу геомассалардын узак аралыкка жылышын камсыз кыла албасы аныкталды. Майлоо жер көчкүнүн геомассасы жылган мезгилде жаан-чачындын кириши же астындагы тоо тектеринин катмарын геохимиялык жол менен өзгөртүү жолу менен пайда болот. Үчүнчү механизм-жер көчкүнүн төмөнкү катмарынын нанобөлүкчөлөрүнүн табигый нанобөлчөк катары катышуусу.

Негизги сөздөр: жер көчкү, жер которуунун механизмдери, тартылуу күчү, жер астындагы тектердин геохимиялык трансформациясы, нанобөлүкчөлөр, нанобөлүкчөлөр сыяктуу.

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ОПОЛЗНЕЙ

Аннотация. Представлены результаты исследований быстрых и протяженных глинистых оползней. Объяснены три механизма, обуславливающих перемещение геомассы оползней: под влиянием сил гравитации, посевдооживления и смазки ложа оползня вдоль основания направляющих. Было установлено, что силы гравитации не обеспечивают перемещение значительных геомасс на дальние расстояния. Смазка образуется путем проникновения дождевых осадков или геохимического преобразования слоя подстилающих пород в период перемещения геомассы оползня. Третий механизм заключается в участии наночастиц нижнего слоя перемещающего оползня в качестве природных наноподшибников.

Ключевые слова: оползни, механизмы перемещения, гравитация, геохимическое преобразование подстилающих пород, наночастицы, как наноподшибники.

INVESTIGATION OF RAPID AND EXTENDED CLAY LANDSLIDES

Abstract. Results of studies of fast and long clay landslides are presented. Three mechanisms are explained that cause the movement of the geomass of landslides: under the influence of gravity forces, sowing and lubrication of the landslide bed along the base of the guides. It has been found that gravity forces do not move significant geomasses over long distances. Grease is formed by the penetration of rainfall or geochemical transformation of the underlying rock layer during the period of movement of the landslide geomass. The third mechanism consists in participation of nanoparticles of lower layer of moving landslide as natural nanoparticles.

Keywords: *landslides, movement mechanisms, gravity, geochemical transformation of underlying rocks, nanoparticles as nanoparticles.*

Введение. К настоящему времени многие исследователи приложили значительные усилия, чтобы определить взаимосвязь базовых характеристик оползней (таких, как схема их распределения, тип, охват площади и объем). Исследовалось влияние на оползни таких характеристик, как уклон склона, его высота, диапазон уклона, экспозиция склона, а также конкретная площадь водосбора. Также были осуществлены исследования по влиянию климатических факторов на оползни (в частности, проявление сильных и продолжительных дождей). Для этого были осуществлены исследования особенностей поведения оползней на основе программного комплекса LANDSLIDEMODELLER [2-5]. Некоторые исследователи изучали взаимосвязь распространения оползней с такими факторами геосреды, как литология и морфология вмещающих горных пород. Также осуществлялись исследования по влиянию на возникновение оползней землетрясений, с их иницирующими факторами (такими, как магнитуда, интенсивность и пиковое ускорение грунта района землетрясения), а также наличие вторичных активных или неактивных разломов.

В результате статистического анализа были получены следующие результаты [10]:

1. Более 90 % оползневых склонов имеют уклон более 20°. При этом оползни произошли в основном на горных или холмистых склонах, с уклоном от 20° до 35°.

2. Оползни в основном происходили на горных участках с отметками менее 1200 м.

3. Оползни происходили преимущественно на горных склонах с протяженностью уклона от 200 до 400 м.

4. Количество оползней на горных склонах в северном направлении в 2 раза больше, чем на склонах в других направлениях.

5. Количество оползней на горных склонах с расстоянием до разлома менее 0,5 км в 2 раза больше, чем на склонах других категорий.

6. Количество оползней на горных склонах с расстоянием до ручья менее 5 км в 3 раза выше, чем на склонах других категорий.

7. Не установлена четкая зависимость между оползнями и конкретной площадью водосбора.

8. Не выявлена четкая связь между оползнями и литологией.

Методы исследования: инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS), твердотельный ядерный магнитный резонанс (SSNMR), термогравиметрический анализ (TGA) и рентгеновская порошковая дифракция (XRD).

Основная часть. Первоначально за основу был принят механизм перемещения геомассы оползня на горном склоне только под влиянием сил гравитации. Но дальнейшие исследования показали, что силы гравитации не обеспечивают перемещения таких объемов геомассы и на такие расстояния.

В 2008 г. землетрясение силой 8,2 балла в Китае вызвало возникновение огромного оползня Дагуанбао (рис. 1), в результате которого было перемещено более 1 км³ камней и разнообразных обломков. Этот

геоматериал довольно быстро устремился вниз по склону горы, на расстояние более 4 км [14] а его площадь составила 7,2 км².



Рис. 1. Оползень Дагуанбао [14]

Многие исследователи приложили огромные усилия, чтобы понять, как и почему такие весьма большие геомассы оползней (как, например, Дагуанбао) могут перемещаться на довольно значительное расстояние.

В ходе осуществленных статико-теоретических исследований было установлено, что расстояние выбега оползня напрямую зависит от геометрических параметров склона возникновения и пропорционально его площади и объему (рис. 2).

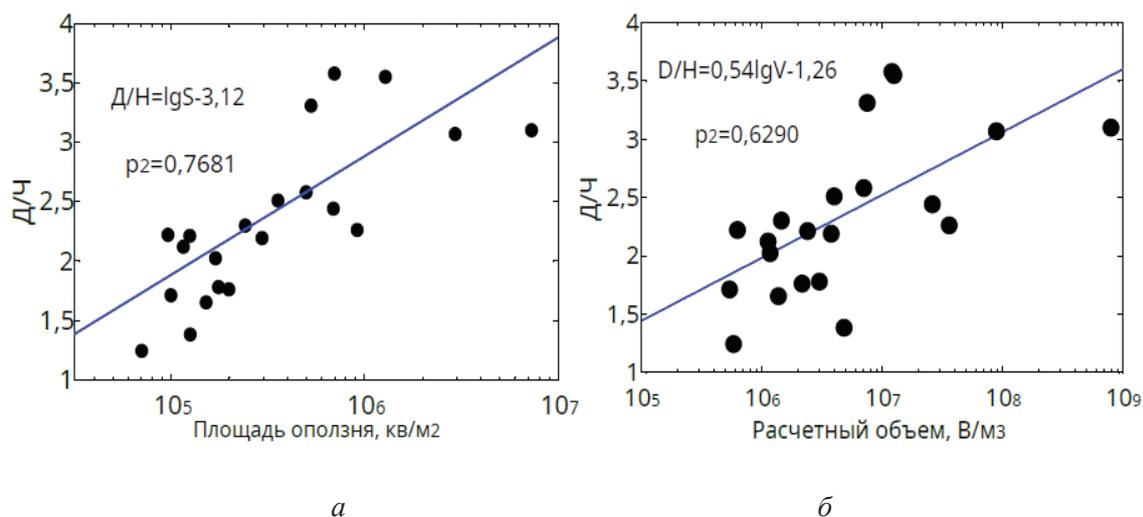


Рис. 2. Зависимость нормированного расстояния выбега от (а) площади оползня и (б) объем оползня [10]

Последующий обзор всех существующих моделей перемещения геомассы оползней позволяет выделить четыре их основные категории [10]:

- объемное псевдооживление и гидродинамический поток оползневых обломков (по типу селя);
- механизмы потери геомассы в сочетании с нормальным фрикционным скольжением;
- специальные формы смазки ложа оползня вдоль основания направляющих.

Так, исследователи установили, что возникающее трение между скользящим геоматериалом и устойчивой породой ложа оползня Дагуанбао нагрело динамически рекристаллизованный слой толщиной $\sim 0,1$ мм до более чем 850° С, что достаточно для того, чтобы началось разложение доломита [14]. А это обеспечило испарение углекислого газа из доломитовой породы, что помогло дополнительно снизить имеющуюся величину трения (коэффициент трения составлял $\mu \approx 0,05$). Одновременно высокие значения температуры и давления внутри оползня Дагуанбао вызвали перекристаллизацию перемещающихся пород: это создавало вязкий слой, который помогал смазывать ложе скольжения данного оползня. Эти два механизма, работающие совместно, позволили оползню Дагуанбаодостичь скорости перемещения около 60 м/с.

Но кроме рассмотренных существуют и другие механизмы быстрого перемещения геомассы оползней. Примером мощных быстрых оползней, произошедших в результате возникновения землетрясений, служит Гиссарское землетрясение в Таджикистане, произошедшее 23 января 1989 г., нанесшее огромный ущерб этой республике и забравшее жизни 274 человек [1, 6].

Предпосылки возникновения этого разрушительного весьма быстрого оползня заключались в том, что к концу января 1989 г. в толще грунта высокого глинистого холма, у подножия которого располагался пос. Шарор, скопилось довольно много влаги [1, 6]. И после первых колебаний земной коры, произошедших под действием землетрясения, верхушка этого холма сдвинулась и огромная (высотой в несколько метров и шириной в 2-а километра) масса грязи и сырой глины, быстро набирая скорость, устремилась к его подножию, полностью разрушив пос. Шарор.

Селу Окули-Боло, располагавшемуся на некотором удалении от этого глинистого холма, повезло несколько больше [1, 6]. Сорвавшийся вниз оползень из полужидкой глины при приближении к этому населенному пункту, уже существенно замедлил свою скорость, т.е. он не был столь катастрофичен. Тем не менее, здесь погибли 67 человек, а оползень разрушил большинство жилищ.

Итог стихийного бедствия, охватившего территорию свыше 2100 км², был таков [1, 6]: 274 человека погибли, десятки людей ранены и госпитализированы, разрушено почти 3000 домохозяйств, полностью уничтожено около 2-х километров автомобильной дороги, убито тысячи голов скота, произошла деградация значительных площадей прилегающих сельхозугодий.

Такие быстрые оползни наблюдаются в разных частях мира. Так, один из самых больших рисков стихийных бедствий в мире являются быстрые глиняные оползни (рис. 3, 4, 5), механизм действия которых основан на проявлении физико-химических свойств так называемых «быстрых» глин. «Быстрая» глина встречается в основном в Норвегии и Швеции, но также встречается в некоторых частях Финляндии, России, Канады и Аляски.



Рис. 3. Быстрые глиняные оползни: а) в Норвегии; б) в Крокнесе недалеко от Альты; в) в Гердруме (2020 г.) [9]

Глина — это разновидность мелкозернистого природного почвенного материала, содержащего разнообразные глинистые минералы. Как правило, глины становятся пластичными во влажном состоянии из-за молекулярной пленки воды, окружающей частицы глины. «Быстрая» глина (также известная в Канаде, как глина Леда и глина Шамплейн-Си) представляет собой одну из нескольких, особо чувствительных к изменению условий окружающей среды, ледниковоморских глин. «Быстрая» глина (известная по-норвежски как *kvikkleire*) относится к особому типу глины, которая при перегрузке может в скоростном режиме разрушаться и разжижаться [1].

Так как быстрая глина изначально откладывается в морской среде, то частицы глинистых минералов (из-за наличия на их поверхности постоянных отрицательных зарядов и зарядов, зависящих от pH) оказываются всегда заряженными отрицательно. Из-за необходимости соблюдения электронейтральности и нулевого баланса электрических зарядов эти отрицательные электрические заряды всегда компенсируются положительными зарядами катионов (таких, как Na^+), адсорбированных на поверхности быстрой глины или присутствующих в ней [11]. При этом обменные катионы присутствуют в прослойках глинистых минералов и на внешних базисных плоскостях глинистых

пластинок. Катионы также компенсируют отрицательные заряды на краях частиц такой глины, вызванные протолизомсиланольных и алюинольных групп (зарядов, зависящих от рН окружающей среды). Кроме того, пластинки такой глины всегда окружены двойным электрическим слоем (ДЭС) или двойным диффузным слоем (ДДС), толщина которых, как правило, зависит от значения величины солёности воды формирования данного геоматериала. В солёных условиях (при довольно высокой ионной силе) эти слои сжимаются и в дальнейшем разрушаются. Этот процесс существенно облегчает агрегацию пластинок глины, которые флокулируют и слипаются в более стабильную структуру агрегатов. После того, как морские отложения глины оказываются подняты на сушу и больше не подвергаются воздействию солёной воды, дождевая вода медленно проникает внутрь плохо уплотнённого слоя глины и избыток NaCl, присутствующий в такой глине начинает диффундировать. В результате электрические слои становятся менее сжатыми и начинают расширяться. Это приводит к более сильному электростатическому отталкиванию между отрицательно заряженными пластинками глины, которые гораздо легче диспергируются и образуют устойчивые суспензии в воде (явление пептизации). Этот эффект приводит к существенной дестабилизации структуры глинистых агрегатов. Такая глина становится настолько нестабильной, что, когда её масса подвергается достаточному напряжению, то поведение этого геоматериала может резко измениться с поведения зернистого материала на поведение водянистой жидкости.

В результате, при недостаточном механическом уплотнении глинистого слоя при сдвиговом напряжении более слабое сжатие

ДЭС солями в подвижной глине приводит к отталкиванию глинистых частиц и их перестройке в более слабую и неустойчивую структуру. Необходимо отметить, что быстрая глина быстро восстанавливает исходную прочность при повторном добавлении соли (обеспечивающем сжатие ДЭС), что позволяет частицам такой глины восстанавливать высокую степень сцепления друг с другом.

С помощью рентгеновского дифрактометра были исследованы образцы быстрых глин крупных оползней Непала, для определения роли глинистых минералов в возникновении таких оползней [7]. Рентгеноструктурным анализом были выявлены иллит, хлорит и каолинит (как основные глинистые минералы в подстилающей геомассе оползней). Сравнение оползневой активности и типов глинистых минералов показывает, что оползни с подстилкой, содержащей иллит в качестве доминирующего компонента, оказываются более активными, чем оползни с небольшим содержанием иллита или без него в сочетании с хлоритом и каолинитом.

Третий механизм быстрого перемещения геомассы оползней, предложенный нами, связан с наночастицами глин и, прежде всего, галлуазита, выполняющих роль эффективной смазки на поверхностях скольжения.

Галлуазит является членом семейства каолиновых алюмосиликатов, но, в то время как наночастицы каолинита имеют пластинчатую форму, то наночастицы галлуазита представляют собой нанотрубки (имеющими длину 0,5–2 мкм и внешний диаметр около 200 нм, с диаметром просвета 10–15 нм), в которых листы алюмосиликата свернуты в спираль (рис. 4). Обычно оболочки галлузитовых трубок включают 15–20 слоев.

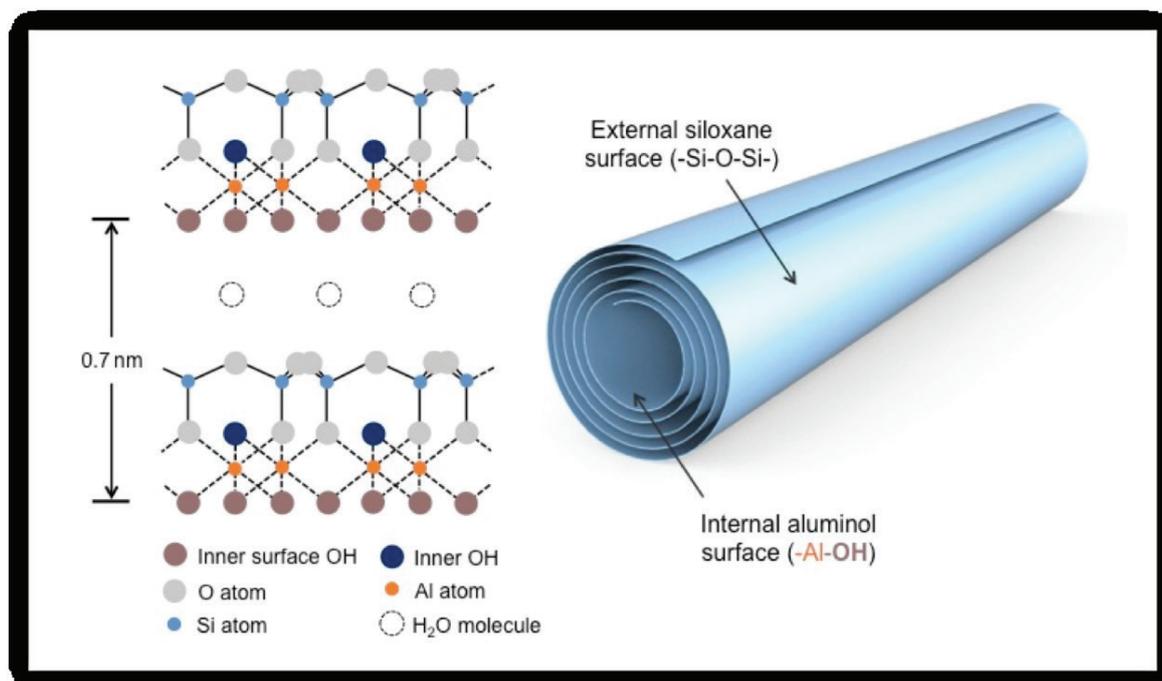


Рис. 4. Схема строения галлуазитовой нанотрубки[12]

Кроме того, галлуазиты, в зависимости от условий кристаллизации и геологического строения [15], могут иметь и другую морфологию (такую, как, например, сфероидальная или дисковая – рис. 5).

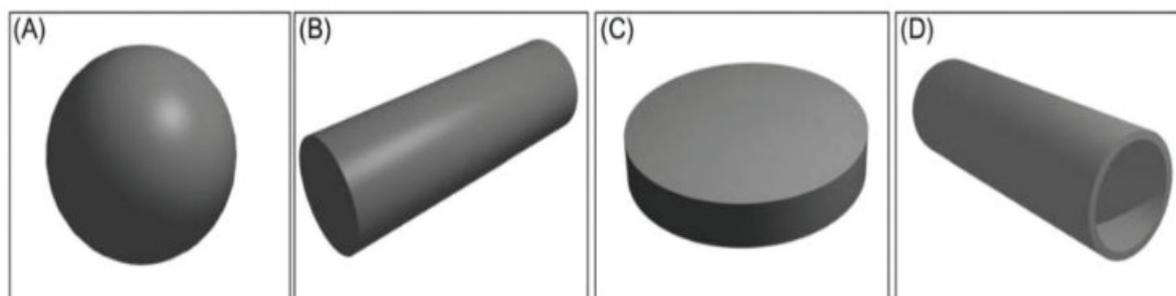


Рис. 5. Геоморфология глинистых наночастиц:

а) однородная сфера; б) однородный цилиндр; в) однородный диск; г) полый цилиндр

В ходе исследований было установлено, что нанотрубки галлуазита обладают довольно уникальными физическими (табл. 1), химическими и электрохимическими свойствами.

Химическая формула	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Внутренний диаметр	10–40 нм
Внешний диаметр	40–70 нм
Длина	0,2–40 мкм
Плотность	2,14–2,59 г см ⁻³
Модуль упругости	До 600 ГПа
Прочность	Н/Д
Удельная поверхность	50–137 м ² ·г ⁻¹ (по сравнению с УНТ 100–1000 и графеном до 3630 м ² ·г ⁻¹)
Объем пор	1.25 mL·г ⁻¹
поровое пространство	14–46.8%
Средний размер пор	7,97–10,02 нм
Кристаллическая система	Моноклиника
Параметры ячейки	$a = 5,14 \text{ \AA}, b = 8,9 \text{ \AA}, c = 14,7 \text{ \AA}, \beta = 104^\circ,$ $a:b:c=0,578:1:1,65, Z=2$ (моноклинная)

Так, они представляют собой натуральные трубчатые геоматериалы, обладающие рядом физико-химических особенностей (таких, как уникальная микропространственная структура, значительное соотношение длины и диаметра, большой объем просвета и широко распространение). Необходимо заметить, что из-за скрученной структуры галлузитовые нанотрубки де-

монстрируют различные химические свойства между внутренней (Al-OH) и внешней поверхностью (Si-O-Si), т.е. химически внешняя поверхность этих трубок имеет свойства, подобные SiO₂, тогда как внутреннее ядро нанотрубки связано с Al₂O₃ (рис. 6). В частности, эти две функциональные группы имеют разные поверхностные заряды и pH. Кроме того, просвет канальца такой нанотрубки заряжен положительно с pH - 8,5, а наружная оболочка - отрицательно с pH - 1,5.

Поведение заряда (дзета-потенциала) частиц галлузита может быть описано суперпозицией преимущественно отрицательного (при pH 6–7) поверхностного

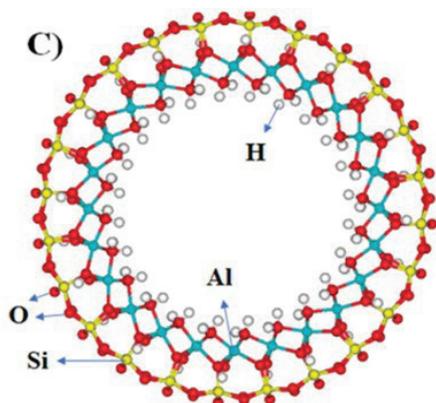


Рис. 6. Поперечное сечение одностенных галлузитовых нанотрубок [8]

потенциала SiO_2 и небольшого вклада положительной внутренней поверхности Al_2O_3 (при pH 2–7) [13]. В дальнейшем, их имеющийся электрический заряд обеспечивает структурирование расположения нанотрубок.

При этом необходимо отметить, что нанотрубки природного галлуазита, как правило, имеют высокое содержание воды из-за наличия единичных слоев, разделенных молекулами воды, а также металлических частиц (рис. 7).

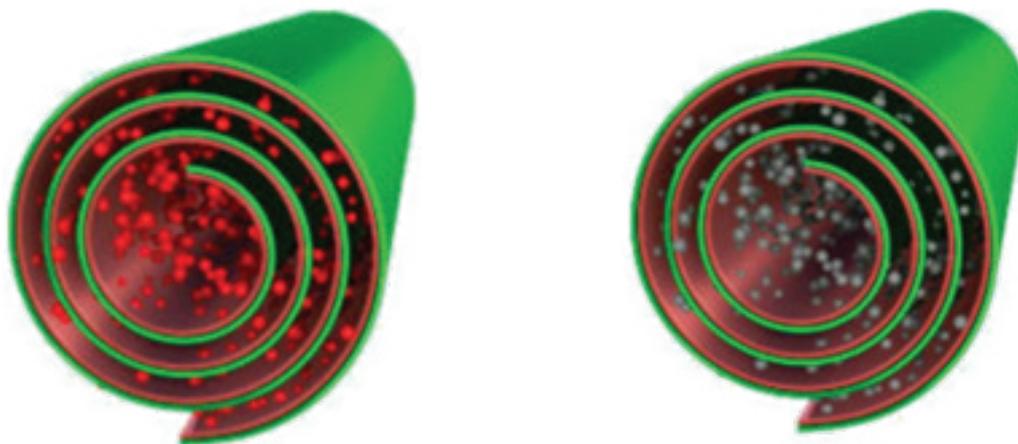


Рис. 7. Галлузитовые нанотрубки с различным магнитным наполнением

Для того, чтобы галлузитовые нанотрубки могли реализовать свой максимальный потенциал в качестве природных подшибников при перемещении геомассы оползней, должно быть перестроено случайное распределение ориентации нано-

трубок, т.к. их несоосность будет создавать неэффективную передачу напряжения. И здесь возможно структурирование расположения нанотрубок под влиянием возникающего при перемещении геомассы оползня локального магнитного поля.

Библиография

1. Воробьев А.Е., Кожоголов К.Ч., Разаков Ж.П., Кожоголов Б.К., Шамшиев О.Ш., Тагаев Р.А., Воробьев К.А. Геоинжиниринг: оружие поражения или технологии развития? / Под редакцией Ивашова Л.Г. Бишкек (Кыргызстан). 2020. 406 с.
2. Воробьев А.Е., Нифадьев В.И., Усманов С.Ф. Исследование особенностей поведения оползней на основе программного комплекса LANDSLIDEMODELLER // В сборнике: Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы V Международная научно-практическая конференция (Посвящается Году экологии в России; Третьей годовщине присоединения Крыма к России; Столетию Воронежского Государственного университета; 10-летию кафедры экологической геологии геологического факультета Воронежского государственного университета). 2017. С. 114-120.
3. Воробьев А.Е., Нифадьев В.И., Усманов С.Ф. Исследование особенностей поведения оползней на основе программного комплекса „landslidemodeller” // Горный Вестник Узбекистана №3 (Июль-Сентябрь). 2017.
4. Воробьев А.Е., Нифадьев В.И., Усманов С.Ф. Исследование поведения оползней на основе программного комплекса LANDSLIDE MODELLER // Вестник Кузбасского государственного технического университета № 5. 2017. С. 44-49.

5. Воробьев А.Е., Нифадьев В.И., Усманов С.Ф. Основные особенности поведения оползней, полученные на основе программного комплекса LANDSLIDEMODELLER // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Материалы шестнадцатой международной конференции. Москва – Донецк. 18-22 сентября 2017 г. – М.: Изд-во Спутник +, 2017. С. 134-140.
6. Дрожь земли и кипящая грязь: история Гиссарской катастрофы // <https://yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Ftj.sputniknews.ru%2Fanalytics%2F20200122%2F1030587526%2Fgissar-zemletryasenie-1989-katastrofa-tajikistan.html&promo=navbar>.
7. *Bhupati Neupane*. Role of clay minerals in the occurrence of landslides along Narayangarh-Mugling Highway Section, central Nepal // Journal of Nepal Geological Society. N 43. 2011. Pp. 301-308. DOI:10.3126/jngs.v43i0.25619.
8. *Cong Cheng, Weihua Song, Qiang Zhao and Hailei Zhang*. Halloysite nanotubes in polymer science: purification, characterization, modification and applications // Nanotechnology Reviews N 3. 2020. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0024>.
9. *David Nikel*. Quick Clay Landslides in Norway // Living in Norway. May 12, 2021.
10. *Guangqi Chen, Yange Li, Yingbin Zhang and Jian Wu*. Earthquake Induced a Chain Disasters, Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning, // <http://www.intechopen.com/books/earthquakeresearch-and-analysis-statistical-studies-observations-and-planning/earthquake-induced-a-chain-disasters>.
11. Quick clay // https://en.wikipedia.org/wiki/Quick_clay.
12. Properties & applications // <http://halloysiteexpert.com/properties-applications>.
13. *Song K*. Micro- and nano-fillers used in the rubber industry // Progress in Rubber Nanocomposites, 2017.
14. *Wei Hua, Runqiu Huang, Mauri Mc.Saveneyab, Lu Yaoc, QiangXua, Mingshi Fengd, Xianghui Zhang*. Superheated steam, hot CO₂ and dynamic recrystallization from frictional heat jointly lubricated a giant landslide: Field and experimental evidence // Earth and Planetary Science Letters. Volume 510, 15 March 2019, pp. 85-93.
15. *Yurdacan H.M., Mufrettin Murat Sari*. Functional green-based nanomaterials towards sustainable carbon capture and sequestration // Sustainable Materials for Transitional and Alternative Energy, 2021.