

УДК 551.550

НОВАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РОЛИ ГЛИН В ПЕРЕМЕЩЕНИИ ГЕОМАССЫ ОПОЛЗНЯ

Воробьев А.Е.¹, Кожоголова Г.К.²

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет,
г. Грозный, РФ;

²Научная станция НАН Кыргызстана, г. Бишкек, КР

Представлена новая интерпретация роли глин в перемещении геомассы оползня. Детализирована структура глин на наноуровне. Дана сводка физико-химических свойств наночастиц глины, таких как наноформы, удельная площадь поверхности, дзета-потенциал и т.д. Показано, что слой наноразмерных частиц в горной массе оползня существенно влияет на качественно-количественные характеристики его перемещения. Однако их исследования все еще находятся на ранней стадии.

Ключевые слова: оползни, перемещение, горная масса, наночастицы, механизм

ЖЕР КӨЧКҮНҮН ГЕОМАССАСЫН ЖЫЛДЫРУУДА ЧОПОЛОРДУН РОЛУН ЖАҢЫ ЧЕЧМЕЛӨӨ

Воробьев А.Е.¹, Кожоголова Г.К.²

¹ Грозный мамлекеттик мунай техникалык университети

² Бишкектеги Россия Илимдер академиясынын илимий станциясы

Жер көчкүнүн геомассасын жылдырууда чополордун ролун жаңы чечмелөө сунушталды. Чополордун түзүлүшү нанодөңгээлде деталдаштырылган. Наноформалар, бетинин салыштырма аянты, дзета потенциалы ж.б. сыяктуу чопо нанобөлүкчөлөрүнүн физикалык-химиялык касиеттеринин кыскача баяндамасы берилди. Бирок, алардын изилдөөлөрү дагы эле алгачкы этапта.

Баштапкы сөздөр: жер көчкү, жылышуу, тоо массасы, нанобөлүкчөлөр, механизм

A NEW INTERPRETATION OF THE ROLE OF CLAYS IN THE MOVE- MENT OF LANDSLIDE GEOMASS

¹ Vorobyev A.E., ² Kozhogulova G.K.

¹ Grozny State Oil Technical University

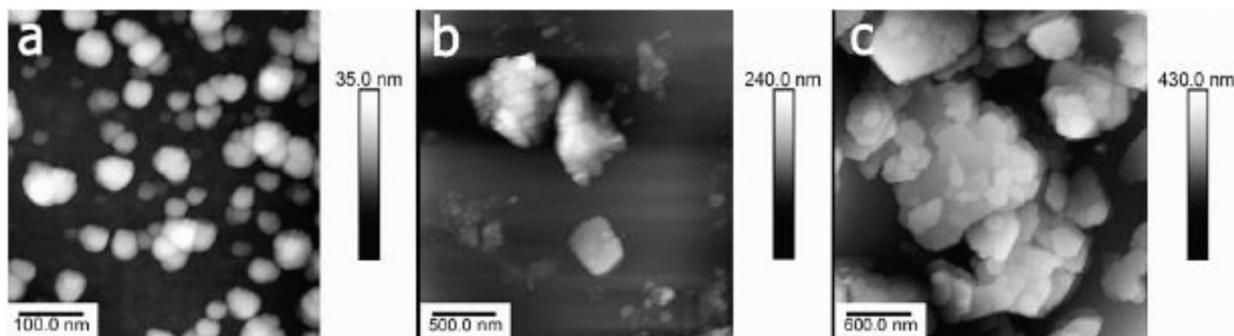
² Scientific Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek

A new interpretation of the role of clays in the movement of landslide geomass is presented. The structure of clays at the nanoscale is detailed. A summary of the physicochemical properties of clay nanoparticles, such as nanoforms, specific surface area, zeta potential, etc. is given. It is shown that the layer of nanoscale particles in the rock mass of a landslide significantly affects the qualitative and quantitative characteristics of its movement. However, their research is still at an early stage.

Keywords: landslides, displacement, rock mass, nanoparticles, mechanism

Введение. Роль глин в передвижении горной массы оползня изучалась многими исследователями, но лишь с развитием электронной техники визуализации нанообъектов появилась возможность исследовать глины, как объекты, состоящие из нанослоев и сложенные наночастицами [1-5]. Такой подход позволяет получить принципиально новые физико-химические характеристики и особенности глин, способствующие активному передвижению геомассы оползней.

Основная часть. Наноглины представляют собой мелкозернистые кристаллические материалы. Огромное разнообразие этих природных наноматериалов сделало доступной для исследователей и практиков весьма обширную коллекцию глин (рис. 1), имеющих довольно различные физические и химические свойства (табл. 1).



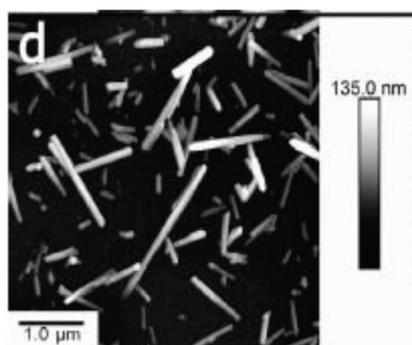


Рис. 1. Типичные АСМ-изображения [8]:

а) бентонита; б) монтмориллонита; в) каолина; г) галлуазита

Таблица 1 Гидродинамические диаметры, значения дзета-потенциала и измеренные АСМ размеры частиц наноглины, наносфер кремнезема и наночешуек оксида графена

Частицы	Гидродинамический диаметр, нм	Зета-потенциал, мВ	Измеренные размеры
галлуазит	510 ± 12	$- 25 \pm 3$	диаметр 50 нм, длина 400-1500 нм
каолин	930 ± 22	$- 36 \pm 1$	ширина 300-700 нм, толщина 30-100 нм
монтмориллонит	1600 ± 60	$- 29 \pm 1$	ширина 300-600 нм, толщина 10-50 нм
бентонит	3040 ± 660	44 ± 2	ширина 4 мкм, 100 нм толщиной
кремнезем	122 ± 3	$- 39 \pm 6$	диаметр 120 нм
оксид графена	1940 ± 90	$- 47 \pm 2$	ширина 2000 нм, толщина 2-10 нм

Na-монтмориллонит представляет собой слоистый смектит из филлосиликатной глины (рис. 2). При этом, монтмориллонит (ММТ) представляет собой природную минеральную глину [8], со слоистой структурой и характерными особенностями, такими как большая площадь внутренней поверхности и емкость катионного обмена (СЕС), а также высокая абсорбционная способность.

чешуйчатые частицы монтмориллонита

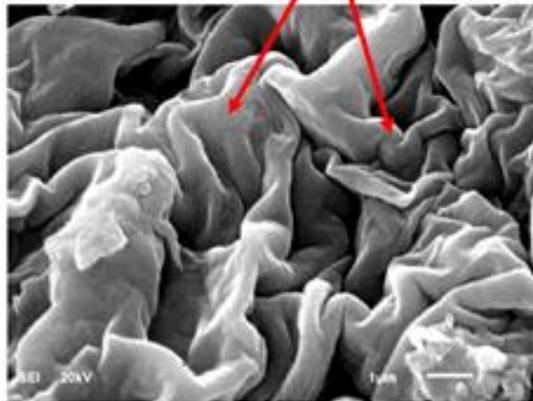


Рис. 2. СЭМ-изображение монтмориллонита [6]

В случае смектитов (рис. 3) октаэдрический лист оксидов металлов зажат между двумя тетраэдрическими листами кремнезема. В тетраэдрическом листе кремнекислородные тетраэдры связаны с соседними тетраэдрами общими тремя углами, в то время как четвертый угол каждого тетраэдра образует часть соседнего октаэдрического листа. Октаэдрический лист обычно состоит из алюминия или магния в шестикратной координации с кислородом из тетраэдрического листа и с гидроксидом.

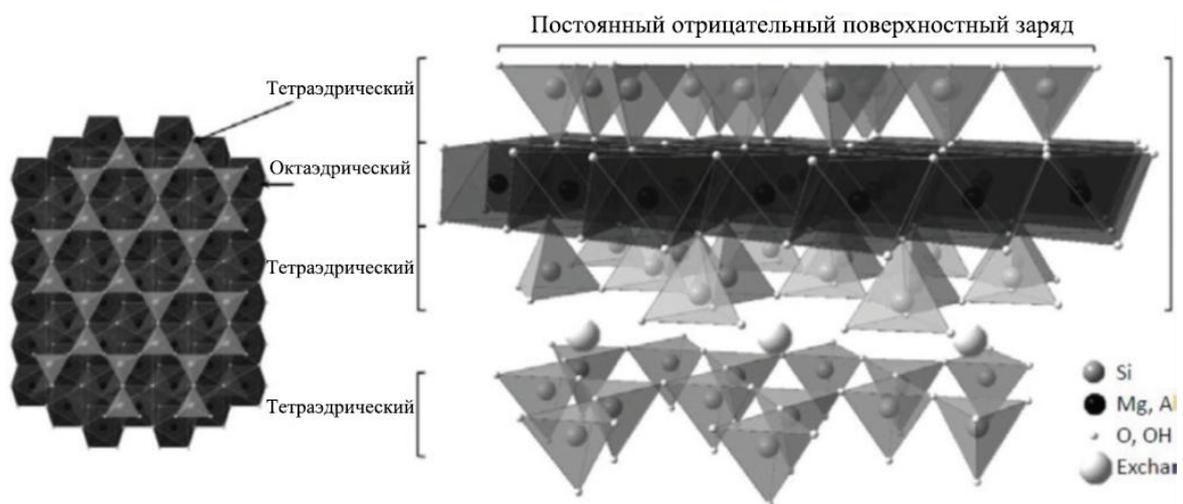


Рис. 3. Строение смектитов [8]:

Глины образованы слоистыми тетраэдрическими (Т) и октаэдрическими (О) пластами

Отдельный слой является основной структурной единицей наноглины, и эти слои склонны располагаться друг над другом, как страницы в книге. Отдельные слои состоят из тетраэдрических и/или октаэдрических пластин, и такое расположение пластин играет весьма важную роль в определении и различении этих глинистых минералов.

СДГ включают широкий спектр химических соединений и их слоистую структуру, которая может быть очень разнообразной для образования политипов [8]. Например, алюмосиликатные катионные наночастицы, такие как монтмориллонит (ММТ), имеют восьмиугольные и четырехугольные пластины, с высокими внутренними поверхностями.

Основная структура катионных глин основана на каркасе, где структурная единица состоит из восьмиугольно-скрученного листа между двумя четырехугольными пластинами. На рис. 4 представлена структура такой двухслойной гидроксидно-катионной глины.

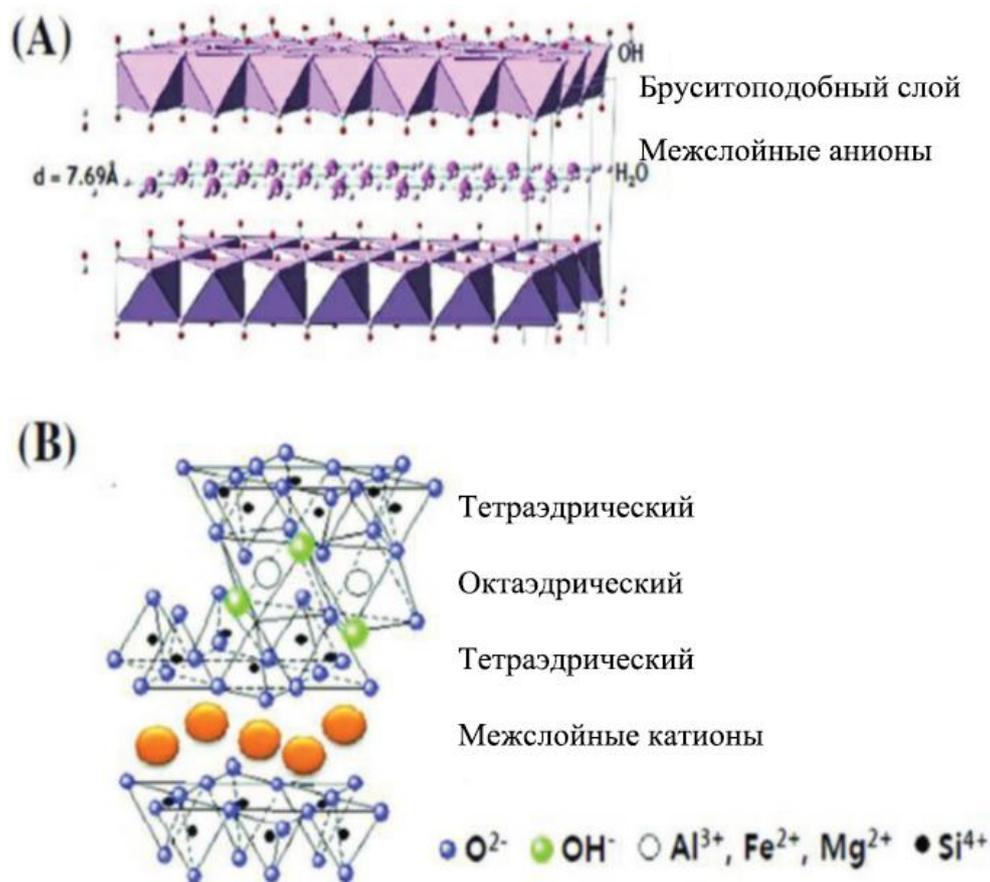


Рис. 4. (А) Двухслойный гидроксид и (Б) катионная глина (ММТ) [8]

Реакционная способность глин во многом зависит от их способности к набуханию [8]. Так, каолинит (из семейства глин 1:1), тальк и пиррофиллит (из семейства глин 2:1) не имеют структурного заряда и, следовательно, не набухают и обладают низкой адсорбционной способностью.

Высокослойная загрузка вермикулита и иллита ограничивает их склонность к набуханию и гелеобразованию, хотя их площадь поверхности относительно высока. Сметтиты характеризуются относительно низким зарядом слоя, что позволяет их частицам полностью диссоциировать в воде и придает им довольно интересные реологические/гелеобразующие свойства и поверхностную реакционную способность.

В результате, ММТ с суммарным зарядом сетки вполне может набухать в присутствии воды и гидрофильных растворителей, т.к. положительно заряженные биологически активные соединения могут внедряться в межслоевые (внутрислойные) пространства за счет электростатического взаимодействия.

Электрические заряды глин. При этом пространство между соседними слоями может содержать свободные катионы натрия, кальция или магния (рис. 5), которые электростатически притягиваются к внешним отрицательно заряженным поверхностям.

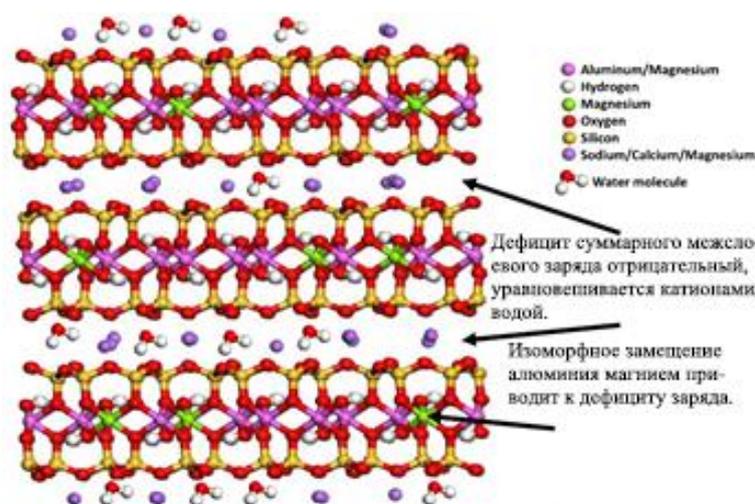


Рис. 5. Молекулярная структура Na-монтмориллонита, показывающая конфигурацию, изоморфное замещение, дефицит заряда и межслоевые катионы в коллоидной форме

Расположенные на их межслоевых поверхностях отрицательные заряды уравниваются катионами. В виде коллоидов межслоевые катионы отделяются от частиц глины и связываются с другими отрицательно заряженными поверхностями [6]. Эти частицы, из-за наличия разорванных связей на их концах, также имеют положительно заряженные края.

При этом слои глины делятся на 2 разных типа, по преобладанию анионов и катионов, в зависимости от уровня заряда слоя и типов межслоевых ионов (рис. 6).

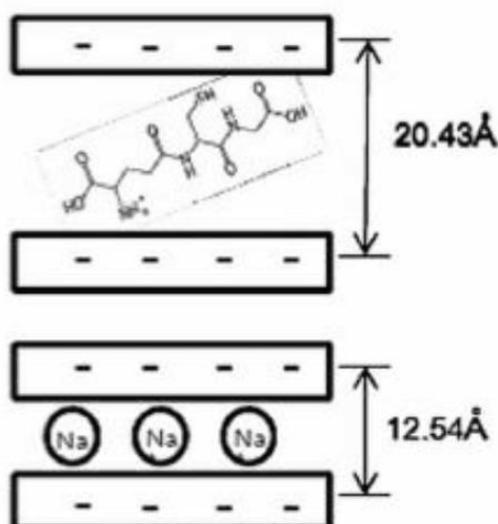


Рис. 6. Слои наноглины [8]

Глинистые геоматериалы с анионным слоем обычно создаются двухслойными гидроксидами (СДГ), с изменяемыми анионами в межслоевых пространствах (рис. 7).

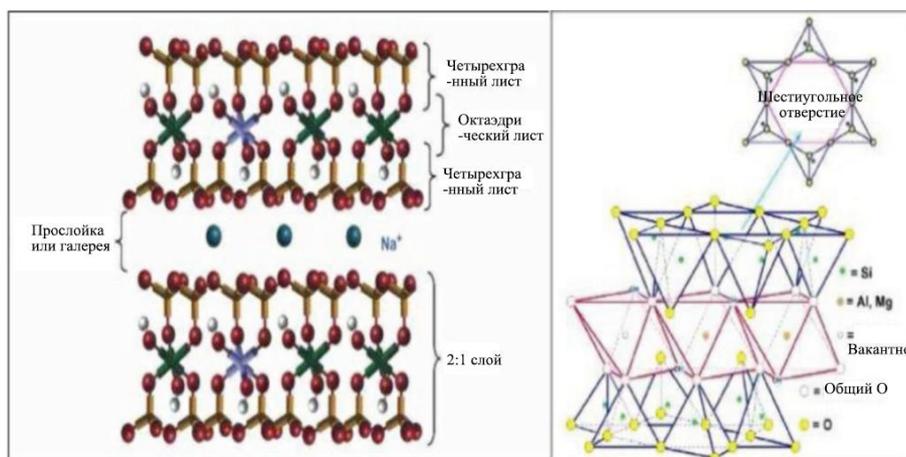


Рис. 7. Структура сети ММТ [8]

В результате, на частице смектитовой глины возникают 2 типа электрических зарядов:

1) Постоянные отрицательные заряды на поверхности из-за изоморфного катионного замещения в тетраэдрических и/или октаэдрических слоях, уравновешенные обменными катионами (такими, как Na или Ca^{2+}) в межслойной галерее.

2) Положительные (амфотерные) заряды на краях из-за разорванных групп Si-O, Al-OH и Mg-OH. При $pH <$ нулевой точки заряда (ZPC) эти краевые заряды становятся положительными с емкостью анионного обмена, а при $pH >$ ZPC они становятся отрицательными с емкостью катионного обмена.

Выделенные из глин наночастицы. В ходе исследования было установлено, что галлуазит образован гидратированными слоями 1:1, которые превращаются в нанотрубки (лист оксида алюминия внутри и слой кремнезема на внешней поверхности), а сепиолиты (и палыгорскит) характеризуются их перевернутыми 2:1 ленточными конструкциями. Такие компоновки обеспечивают большую пористость и сорбционную емкость. В таблице 2 представлена сводка физико-химических свойств наночастиц глины, таких как наноформы, удельная площадь поверхности, дзета-потенциал и т.д.

Таблица 2 Физико-химические свойства наночастиц глины [8]

Наноглина	Химическая формула	Форма	Зета Потенциал (мВ)	Удельная поверхность площадь (м /грамм)
Галлуазит MP1	$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \times 2H_2O$	Трубка- тая	- 41	65
Галлуазит	$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \times 2H_2O$		- 32,1	64
Наномер ПГВ	$Mu (Al_2Mg)_3(Si)O_4(OH)_{10} \times n$ H_2O	Тром- боцит	- 51,9	нет дан- ных

	$\text{Na}_2\text{Mg}_{3,0-x-4-10} (\text{FOH}_{1-y-2})$	МЭ-100	- 52,3	9
	$(\text{Si,Al}) (\text{Al,Fe, Mg})\text{O}_4(\text{OH}_2), \text{Xn}, \text{m}_4(\text{H}_2\text{O})_2$	Деле-лит	- 45,1	600
	$\text{Na}_{0,4}\text{MgLi}_{2,7}\text{Si}_{0,3}\text{O}_4(\text{OH})_{10}$	Бенто-нит	-36,6	600
	$(\text{Натрий, Ca})_{0,33}(\text{Al, Mg})_2 \text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Клуазит Na^+	-48,6	800

Кроме того, было установлено, что каолины представляют собой пластинчатые частицы глины размером от нанометров до микрометров, тогда как галлуазит представляют собой полые палочковидные частицы (нанотрубки) с диаметром просвета ~20 нм и длиной от 300 нм до 2 мкм (рис. 8).

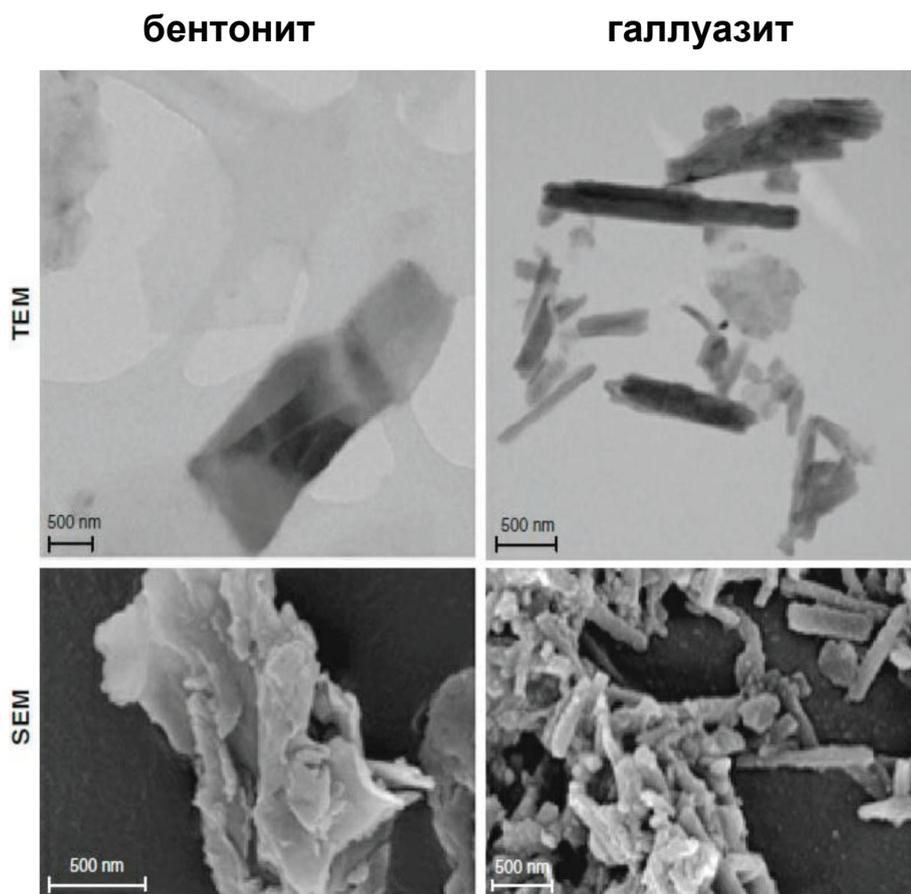


Рис. 8. SEM и TEM изображения наноглин [8]

Присутствующие в горной массе наночастицы образуют наносодержащий слой, который обеспечивает передающую и пропускную способность

или проскальзывание горной массы оползня, т.к. определяет качественно-количественное значение трения, а также преобразование вектора сил между сильным и прерывистым трением и плавным скольжением. Так, даже при малом (2 %) содержании в породе глинистые минералы (иллит, каолинит, смектит и др.) способны образовать почти сплошные тонкие (1–4 нм) пленки на поверхности трения [7].

Особенности механизма передвижения геомассы оползня. В настоящее время трение горной массы оползня подразделяют на кинетическое и статическое трение.

При этом, кинетическое трение определяется разной скоростью периодического встряхивания перемещаемой горной массы, которое характеризуется прерывистым смещением, внезапным исчезновением прочности и хрупкой деформацией. Кинетическое трение горной массы оползня к тому же может обладать двухподложечным скольжением, образуя бинарную нанослойную систему.

Так, например, с помощью электронного микроскопа была определена поверхность динамической тонкой оболочки гаечного сброса в мезозойском граните разлома. В этом случае, как гладкая, так и шероховатая поверхности были обнаружены в верхней и нижней структурах двух слоев. При чем, на гладкой плоскости наноразмерные зерна горной породы имеют неправильную форму и мозаичную текстуру. Напротив, на шероховатой плоскости отдельные наночастицы (диаметром 70–90 нм) шлифовального зерна несколько мельче, чем на гладкой плоскости, здесь они образуют составные шлифовальные зерна (200 нм и 300 нм) и выходят в структуру подложки из двух слоев.

Статическое трение, которое имеет меньшую величину, контролируется стержневым действием плоскости скольжения и представляет собой квазистатическое кумулятивное скольжение в парастатических условиях. Кроме того, статическое трение демонстрирует непрерывные конечные

смещения, а размер распределения наночастиц является относительно однородным, с более сильным проникновением. Эта функция, из-за её пластичных характеристик, называется унитарной нанослойной системой.

Согласно полученным в ходе аналитических исследований экспериментальным результатам, ширина бинарной наноразмерной слоистой системы хрупкой деформации относительно невелика (от нескольких миллиметров до 10 см).

Наноразмерные частицы (наноразмерные шлифовальные зерна) в плоскостях сдвига горных пород возникают в результате определенного износа при перемещении горной массы оползня, в следствие её трения. Причем, процесс трения горной массы оползня представляет собой довольно неустойчивую и весьма сложную систему, ограниченную действием многих элементов, проявлением нелинейной сильной связи.

В 1995 г. была предложена новая концепция многофазного нанокompозитного покрытия разных ионов. Из этой теории становится совершенно ясным, что образование наноразмерного слоя на поверхности сдвига в горных породах фактически представляет собой покрытие, которое «размазывается» под действием силы трения.

В обычных условиях ширина одиночного слоя наноразмерного покрытия в пластичной плоскости сдвига, соответствующая химическому осаждению геоматериала, в основном составляет первые микроны.

При этом, плоскость (зона) сдвига горной породы представляет собой зону пластической деформации, в которой скольжение преобладает над пластической реологией. Однако, на самом деле эта фрикционно-вязкая переходная зона проходит через специфический процесс, включающий множественные вязко-вязкостные (пластичная деформация) и множественные хрупко-вязкие (хрупкая деформация) воздействия, что приводит к улучшению диффузионной ползучести и течения горной массы, следуя за вращением субзерен и рекристаллизацией границ зерен, при одновременном формировании в этой области наночастиц.

Это теоретическое объяснение резкого улучшения фрикционной вязкости и реологии ползучести горной массы оползней было подтверждено на основе микроскопических наблюдений. Так, наблюдая с помощью электронного микроскопа процессы, происходящие на плоскостях сдвига горных пород, можно утверждать, что пластическое течение существенным образом определяется движением самоизмельчающихся зерен в нанометровых интервалах, за счет того, что слой образуемых наноразмерных частиц обладает гораздо большей активностью и меньшим сопротивлением.

Заключение. К тому же, из-за своей относительно большой плотности и значительной площади поверхности слой наноразмерных частиц вызывает физико-химическую активацию, что оказывает существенное воздействие на перемещение горной массы оползня, т.к. в слое наноразмерных частиц сила трения составляет лишь $1/20$ от предшествующей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев А.Е., Гладуш А.Д. Наноинженерия топливно-энергетического комплекса. Т 2. Наноассоциаты пород и наноминералы. М., РУДН. 2019. 411 с.
2. Воробьев А.Е., Ибрагимов Р., Салим Трабелсси. Особенности современной наноминералогии // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы IV Международной науч.-практ. конф. Международнск, 8-10 апреля 2015 г. - Кемерово, 2015. С. 26-27.
3. Воробьев А.Е., Ибылдаев М.Х. Наноструктуры и наночастицы // Механика и технологии (Казахстан) № 2. 2015. С. 95-102.
4. Воробьев А.Е., Кочофа Г.А., Малюков В.П., Лысенкова З.В., Капитонова И.Л., Мартин Зарума Торрес, Чекушина Е.В., Ибрагимов Р. Каукенова А.С., Синченко А.В., Нарожный И.М., Трабелсси Салим. Нанотехнологии образования наномеров // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. - №1. - 2015. - С. 123-128.

5. Санакулов К.С., Воробьев А.Е., Норов Ю.Д. Начало промышленного применения нанотехнологий в недропользовании. Ташкент. Фан. 2017. 496 с.
6. Abduljawwad et al. Nano-clays as potential pseudo-antibodies for COVID-19 // Nanoscale research letters. 2020. 15:173.
7. Alekseyev V.A. Nanoparticles and nanofluids in “water–rock” interactions. Geokhimia. 2019. pp. 343–355. DOI: 10.31857/S0016-7525644343-355.
8. Seyyed Mojtaba Mousavi, Seyyed Alireza Hashemi, Sarvenaz Salahi, Mojgan Hosseini, Ali Mohammad Amani and Aziz Babapoor. Development of clay nanoparticles toward bio and medical applications. 2018. Pp. 167-191. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.77341>.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00444, <https://rscf.ru/project/23-27-00444/>, 2023 г.