

УДК 627.141.1+551.435.174

ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ ГРУНТОВ, ВОВЛЕКАЕМЫХ В СЕЛЕВОЙ ПРОЦЕСС НА ЧУКОТКЕ

© 2023 г. В. А. Лобкина^{1,*}, Н. Н. Ухова², Ю. В. Генсировский¹, А. А. Музыченко¹

Представлено академиком РАН А.И. Ханчуком 25.11.2022 г.

Поступило 25.11.2022 г.

После доработки 04.07.2023 г.

Принято к публикации 12.07.2023 г.

В ходе лабораторных исследований получены данные по минеральному и гранулометрическому составу, некоторые физические и физико-химические параметры грунтов, которые позволили выявить особенности грунтов в селевых массивах на Чукотке. Сделана попытка оценить влияние этих особенностей на формирование селевой суспензии, которая является транспортирующей средой селя. Считается, что по структурно-реологической модели движения на рассматриваемой территории формируются преимущественно несвязные селевые потоки, в которых основная масса воды находится в свободном состоянии. Однако лабораторные исследования показали наличие в образцах селевого заполнителя из отложений селей значительного количества тонкодисперсных частиц, которые находятся в агрегированном состоянии и при обводнении насыщают водный поток глинистой взвесью, что позволяет классифицировать эти потоки как связные. Связность селевой массы приобретает потоками в процессе движения за счет разрушения агрегатов, что приводит к изменению физических характеристик селя.

Ключевые слова: Арктика, глина, отложения, селя, Чукотка

DOI: 10.31857/S2686739723601461, **EDN:** KYQZKA

ВВЕДЕНИЕ

Исследования на территории Российской Арктики получили новый этап развития за счет активного освоения ее ресурсного потенциала. Рост добычи полезных ископаемых ведет к увеличению производственно-транспортной инфраструктуры, что связано с вовлечением в хозяйственную деятельность новых и расширением площадей уже находящихся в эксплуатации месторождений. Освоение ранее не испытывающих антропогенную нагрузку горных арктических территорий создает риск воздействия на объекты инфраструктуры и на население региона опасных экзогенных геодинамических процессов, одним из которых являются сели [1].

На активность селей в Арктической зоне влияет сухой климат с выпадением небольшого количества жидких осадков, а также повсеместное распространение многолетнемерзлых пород (ММП), которые ограничивают вовлечение в селя горных пород из потенциальных селевых массивов (ПСМ). Однако мониторинговые наблюдения, выполняемые в рамках Международной программы по циркумполярному мониторингу деятельного слоя (CALM) и Международного проекта по термическому состоянию мерзлоты (GTN-P), показывают опускание кровли ММП и увеличение мощности сезонно-талого слоя [2–4]. Оттаивание мерзлоты приводит к появлению в селевых бассейнах дополнительного источника воды. Накопление влаги в грунтах ПСМ и в оползневых массивах снижает их несущую способность, что приводит к селевым и оползневым явлениям, а также к изменению их физических характеристик.

В работе рассмотрены сели, формирующиеся в центральных и восточных районах Чукотки. По селевому районированию эта территория отнесена к холодной селевой зоне, Восточному ре-

¹Дальневосточный геологический институт
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Владивосток, Россия

²Институт земной коры Сибирского отделения
Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: valentina-lobkina@yandex.ru

гиону, Колымско-Чукотской области [5]. В настоящее время считается, что по структурно-геологической модели движения в этой области формируются преимущественно несвязные потоки — наносоводные и водоснежные сели [6].

Цель работы — изучить минералогический и гранулометрический состав селевых отложений. На основе полученных данных показать, что реальное содержание тонкодисперсных (пылеватых и глинистых) частиц в грунтах ПСМ Чукотки, достаточно для формирования селевой суспензии, которая служит транспортирующей средой селя. Наличие суспензии указывает на связность потока, так как именно доля участия пылеватых и глинистых частиц в твердой составляющей определяет качественные различия в характере движения селя [6, 7].

МЕТОДОЛОГИЯ

Работа выполнена по результатам полевых работ, проводившихся в 2019, 2020 и 2022 г., в двух разных районах Чукотки (рис. 1). Район А расположен в тихоокеанско-прибрежной части Чукотки (хребет Искатень) (см. рис. 1 а), район Б в горной континентальной (см. рис. 1 б), в пределах Анюйского нагорья (Анюйский хребет). Территории этих районов различаются по физико-географической и климатической зональности [1, 8, 9].

Во время полевых работ выполнялись описание селевых бассейнов, оценка характеристик селей. Перед началом полевых работ, с использованием спутниковых снимков территорий, была составлена карта фактического материала, на которую вынесены дешифрируемые конуса выноса селей. При полевых работах данная карта была уточнена и дополнена (см. рис. 1 а, б). Суммарно на указанных территориях было описано 155 (105 и 50 соответственно) селевых бассейнов. С учетом данных натурных наблюдений, был сделан вывод о том, что распространение селей гораздо шире, чем это принято считать. Поэтому на карте селевой опасности, приведенной в Национальном атласе РФ [5], было выполнено наложение границ селевых районов, определенных авторами (см. рис. 1). В результате наложения площадь селеопасных территорий увеличилась на 220%. С учетом представленного районирования, большому количеству горнодобывающих предприятий Чукотки при эксплуатации месторождений рекомендуется выполнять полный комплекс инженерных изысканий, необходимый для районов развития и активизации селевых процессов. Увеличение площади проведено с учетом геологических, геоморфологических, климатических и ландшафтных факторов, изученных с использованием дистанционных и полевых методов исследования [1].

Рассматриваемые районы являются удаленными, что делает невозможным массовый отбор и транспортировку большого количества образцов, к тому же специфика отбора образцов из селевых отложений заключается в том, что они должны отбираться из “свежих” селей. Обычно селевые бассейны приурочены к постоянным водотокам, и сразу после остановки селя отложения начинают промываться, как водой из водотока, так и атмосферными осадками. С учетом труднодоступности района, во время полевых работ было отобрано пять образцов селевого заполнителя (см. рис. 1) из отложений селевых потоков, сошедших в период, предшествующий проведению работ. Отбор производился по методике (РД.52.30.238—89, 1990). Описание и определение минералогического и гранулометрического состава, микроструктуры и физических показателей образцов выполнены в Центре коллективного пользования “Геодинамика и геохронология” ИЗК СО РАН (г. Иркутск, Россия).

Образцы на рис. 1 а отобраны в бассейне р. Эрвыкыннотвеем (хр. Искатень), состоят из смеси песчаного пылеватого материала, дресвы и щебня размером 0.5—3.5 см, преимущественно темно-серого цвета, слабоокатанные (образцы I, II). Содержат слипшиеся песчано-глинистые комочки, которые легко ломаются руками, на изломе видны макропоры с примесью темного гумусированного материала. Вторая группа образцов (см. рис. 1 б, образцы III—V) отобрана на притоках р. Орловка (Анюйский хр.) на высотах 1020, 880, 281 м. Отложения склонового селя (образец III) состоят из комочков светло-охристого цвета, разного размера от 0.3 до 1.8—2.3 см, “облепленных суглинистой болтушкой”, сильно пылеватых. Некоторые отдельные фрагменты, из слипшихся песчано-глинистых отложений, присутствующих в пробе, легко ломаются руками и растрескиваются до песчаной пыли. В пробе также есть разноразмерные твердые неокатанные обломки пород от 0.8 до 3.5 см светло-серого и серого с розовым оттенком, если отмыть их водой. Образцы IV и V — смесь песчаного пылеватого материала, дресвы и щебня (0.5—3.0 см), содержат плоские плитчатые, слабоокатанные, преимущественно темно-серые фрагменты от 0.2 до 1.0—1.6 см разных оттенков серого и охристого цвета, на крупных фрагментах налет охристой пыли.

Все образцы относятся к группе дресвянистых грунтов с песчаным заполнителем и щебнем, поэтому гранулометрический анализ выполнялся комбинированным методом: после рассева для фракции <0.5 мм применялся метод пипетки с двумя способами подготовки образца к анализу — агрегатным и дисперсным с полным разрушением агрегатов ([10, 11], ГОСТ 12536-2014, 2015).

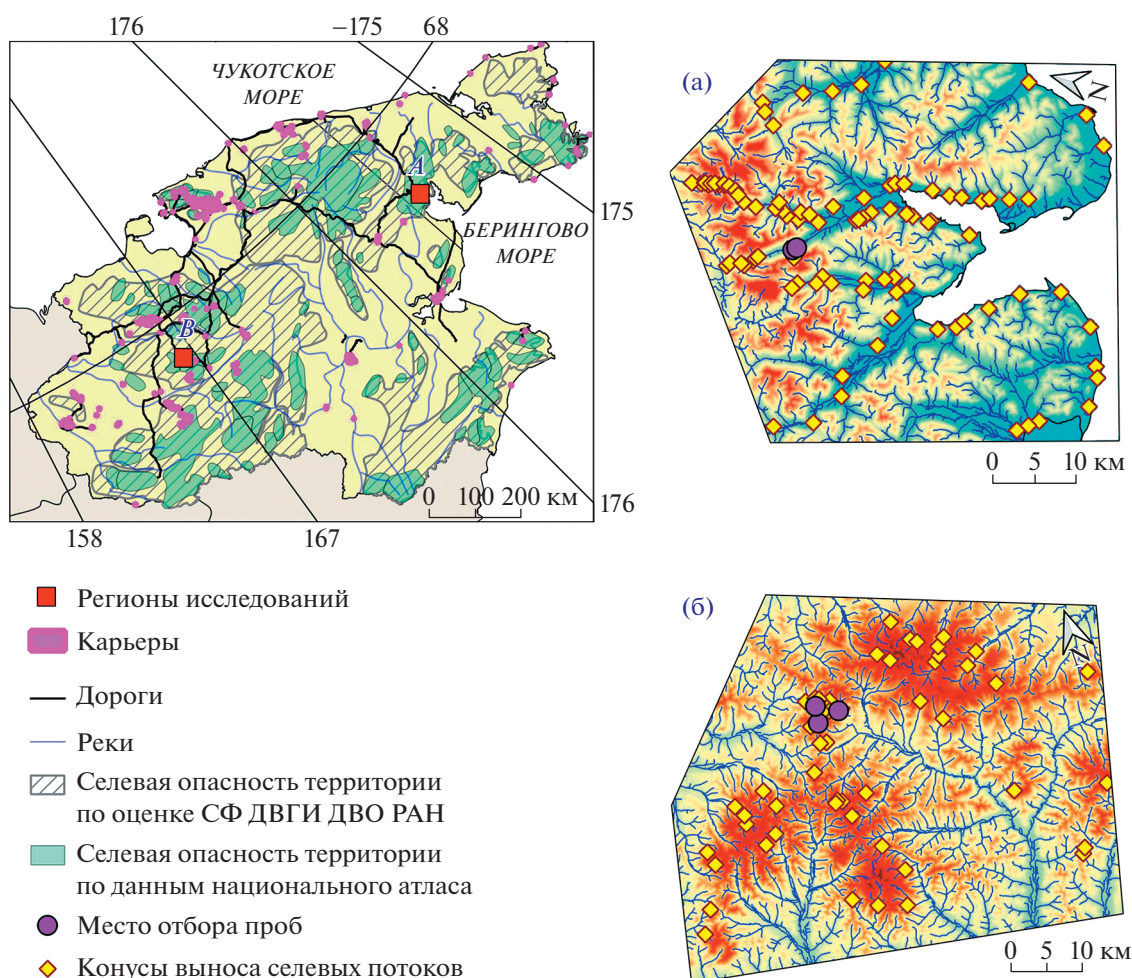


Рис. 1. Схема селевой опасности территории Чукотки с обозначенными регионами исследования: (а) Тихоокеанско-прибрежная часть Чукотки (хребет Искатень); (б) Горная континентальная часть Центральной Чукотки (Анийский хребет).

Для песчаного заполнителя из селевых отложений определялись: плотность минеральной части грунта (плотность частиц грунта, масса грунта в единице объема без учета его природной влажности и пористости (ГОСТ 30416–2020, 2021)), плотность при рыхлом и плотном сложении (метод цилиндра, [10]), углы естественного откоса на воздухе и под водой, коэффициент фильтрации (ГОСТ 30416-2020, 2021) и седиментационный объем. Получены данные по составу водорастворимых солей, общему содержанию карбонатов, содержанию подвижных форм оксида алюминия и кремния по методикам [11, 12]. Минералогический состав образцов был определен методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.0. Условия съемки: излучение – $\text{CuK}\alpha$, Ni – фильтр, $V = 30$ кВ, $I = 20$ мА, шаг сканирования – 0.05° . Для идентификации глинистых минералов осуществлялась подготовка ориентированного материала образцов осаждением

глинистой фракции на стеклянной подложке, прогреванием при температуре 550°C в течение 3 ч и насыщением этиленгликолем. Рентгенограммы идентифицированы с помощью программы поиска фаз. Полуколичественное соотношение компонентов рассчитано по корундовым числам методом RIR. Полученные соотношения фаз носят приближенный характер [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 приведены данные гранулометрического анализа отобранных образцов. Данные по рассею не позволяют выделить значимые различия между образцами, в них присутствуют все фракции, отмечается значительное количество материала с размерностью <1 мм, из материала этой размерности формируется селевая суспензия [6, 7].

Таблица 1. Результаты гранулометрического анализа грунтов (рассев)

Номер образца	Точка отбора	Содержание фракций, %							
		>10 мм	10–7 мм	7–5 мм	5–3 мм	3–2 мм	2–1 мм	1–0.5 мм	<0.5 мм
I	N67 02 50.67; E166 32 17.79	31.7	7.4	7.6	10.8	7.2	8.5	7.1	19.7
II	N67 04 07.74; E166 32 42.52	4.9	4.6	7.2	15.8	19.9	24.9	8.9	13.8
III	N67 03 17.94; E166 36 44.35	27.2	12.6	11.0	16.2	10.9	10.4	3.7	8.0
IV	N66 30 24.14; E179 20 54.01	49.33	6.5	4.4	6.2	5.1	8.5	6.2	13.8
V	N66 30 09.30; E179 20 38.12	10.8	6.1	6.2	14.0	10.0	13.5	8.3	31.1

В этом исследовании основное внимание уделено материалу с размерностью <0.5 мм (см. табл. 1), так как мы предположили, что в этой фракции могут находиться агрегированные частицы, в состав которых входят глинистые минералы. Гранулометрический анализ этой фракции методом пипетки показал, что при агрегатном способе пробоподготовки образцы селевого заполнителя представлены песчаным материалом, в котором преобладают крупно-среднепесчаная и мелко-тонкопесчаная фракции, пылеватые частицы присутствуют в значительно меньшем количестве, а глинистые в незначительном. Однако, при дисперсном способе подготовки образцов к анализу, с полным разрушением агрегатов при кипя-

чении с пирофосфатом натрия, реальное содержание глинистых частиц увеличивается от 0.1 до 9.4–11.4% (рис. 2).

Полученные данные говорят о нахождении глинистых частиц в составе агрегатов. Освобождение глинистой фракции происходит за счет уменьшения крупно-среднепесчаных и мелко-тонкопесчаных фракций (образец I, III, IV). Для образца II идет обогащение как пылеватых, так и глинистых фракций за счет уменьшения количества крупно-среднепесчаных и мелко-тонкопесчаных фракций. В образце V процент глинистых частиц увеличивается за счет уменьшения содержания крупно-среднепесчаной и мелкопылеватой фракций (см. рис. 2).

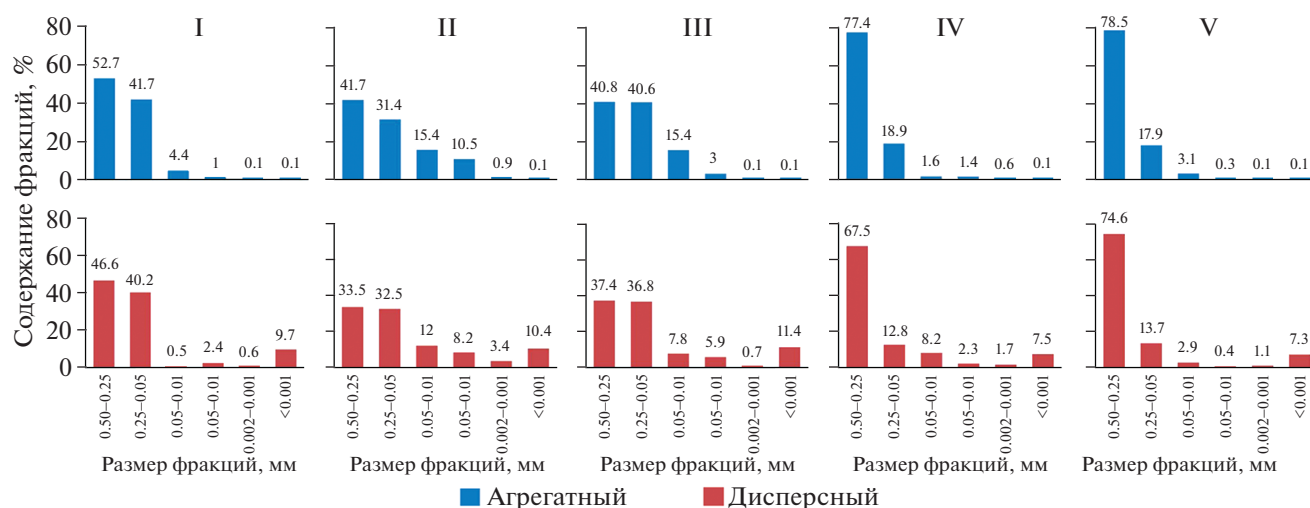


Рис. 2. Результаты гранулометрического анализа фракции селевого заполнителя размерностью <0.5 мм — метод пипетки с двумя способами подготовки образца к анализу.

Таблица 2. Физические характеристики песчаного заполнителя селевых отложений*

Номер образца	$\rho_{\min}$	$\rho_{\max}$	$\Delta\rho$	φ^1	φ^2	$\Delta\varphi$	Ct	V	ρ_s
I	1.24	1.41	0.17	36°	24°	12	31.6	3.6	2.82
II	1.31	1.44	0.13	37.5°	26°	11.5	27.7	2.9	2.86
III	1.32	1.49	0.17	33°	26°	7	n/a	2.9	2.74
IV	1.45	1.59	0.14	34.5°	24°	10.5	44.3	2.9	2.84
V	1.36	1.55	0.19	34.5°	23°	11.5	n/a	2.8	2.84

* $\rho_{\min}, \rho_{\max}$ — плотность песка рыхлого и плотного сложения, г/см³; $\Delta\rho$ — степень увеличения плотности при уплотнении; φ^1, φ^2 — углы естественного откоса на воздухе и под водой, °; $\Delta\varphi$ — степень уменьшения угла под водой; Ct — коэффициент фильтрации, м/сут; V — седиментационный объем, см³; ρ_s — плотность минеральной части, г/см³.

Минералогический анализ глинисто-песчаного заполнителя селевых отложений показал преобладание кварца (40–45%), полевых шпатов (25–50%), глинистых минералов (13–30%) в составе породообразующих минералов и присутствие небольшого количества кальцита и амфибола. Среди глинистых минералов в образцах выявлены смектит, гидрослюда, хлорит, каолинит и смешанослойные образования хлорит-смектит и гидрослюда-смектит.

Для образцов селевых отложений был определен ряд физических параметров (табл. 2). Значения плотности минеральной части (ρ_s) исследованных образцов оказались почти одинаковыми 2.74–2.86 г/см³. Высокие значения плотности минеральной части, вероятно, связаны со значительным количеством солей железа в песчано-глинистом заполнителе. Степень увеличения плотности отложений при уплотнении изменяется незначительно 0.13–0.19 г/см³. Образцы имеют высокий и неоднородный коэффициент фильтрации (27.7–44.3 м/сут), степень уменьшения угла откоса под водой ($\Delta\varphi$) резко снижается на 10.5–12.0°. Образец I имеет значение седиментационного объема (V) — 3.6 см³, образцы II–V характеризуются низкими значениями — 2.8–2.9 см³.

Анализ данных по общему содержанию карбонатов и результатов солянокислой и водной вытяжек показывает следующее:

1. Грунты имеют слабокислую среду, близкую к нейтральной (pH 6.8–7.0).
2. Количество водорастворимых солей мало (0.14–0.27%), преобладают сульфат ионы.
3. Общее содержание карбонатов составляет 4.57–16.30%, преобладает карбонатная форма железа FeCO₃ (13.60–27.37%), содержание CaCO₃ (1.99–3.99%) и MgCO₃ (0.46–3.82%) значительно меньше.

4. В образцах присутствует подвижная форма Al₂O₃ (0.41–2.08%), нерастворимый минеральный остаток составляет 51–75%.

Образец III имеет наименьшее содержание карбонатов и подвижных форм Al₂O₃. По данным солянокислой вытяжки этот образец выделяется наименьшим содержанием солей железа и наибольшим — нерастворимого минерального остатка. Этот образец отобранный из отложений склонового селя, в наименьшей степени промыт водой. Можно считать, что именно он в большей степени характеризует грунты непосредственно в зоне зарождения селей (селевых очагах).

ОБСУЖДЕНИЯ И ВЫВОДЫ

Впервые для территории Чукотки были рассмотрены особенности грунтов селевых массивов. Процесс формирования ПСМ идет за счет разрушения горных пород. На Чукотке ведущим фактором дезинтеграции является физическое морозное выветривание, сопровождающееся механическим разрушением горных пород [14]. Процессы химического выветривания протекают не так активно, значительная роль принадлежит воде во всех ее видах и формах. Результатом взаимодействия воды с массивом горных пород являются их растворение, окисление, образование растворов солей железа, кальция, магния, гидратированных форм железа, алюминия и органических кислот при окислении гумусированных слоев. Последующее высыхание, циклы промораживания—оттаивания грунтов приводят к формированию в них структурных связей, карбонатизации отложений, образованию “цемента”, состоящего из подвижных форм алюминия и кремния, гидроокислов железа и карбонатов. Пески с аналогичными структурными свойствами, сформировавшимися в результате постдиагенетических преобразований, были описаны для юга Восточной Сибири [11, 15].

В изученных нами образцах в качестве заполнителя присутствует песчано-пылеватый материал. Особые его свойства проявляются в высокой водопроницаемости и значительном уменьшении угла откоса под водой. Частицы крупностью <0.5 мм агрегированы и содержат скрытую глинистую компоненту. В составе глинистых минералов присутствуют смектит, гидрослюда и смешанно-слоистые минералы, имеющие возможность, в силу своих структурных особенностей, поглощать значительное количество воды, активно участвовать в ионнообменных процессах и влиять на процессы набухания, усадки, проявление липкости. При этом меняется структура водного раствора, увеличивается доля взвеси и мути, раствор в этом случае получает форму суспензии, когда твердые частицы перемешаны с молекулами воды, селевой поток переходит в связное состояние.

Высвобождение глинистых частиц из агрегатов, по нашему мнению, происходит при турбулентном перемещении селевой массы, в ходе которого идет дробление части перемещаемых горных пород и их истирание. В этот процесс так же включаются породы на бортах и в русле, на которые оказывает воздействие движущийся селя. Это способствует разрушению агрегатов и появлению селевой суспензии, что подтверждается визуально при полевых работах. Крупноглыбовый материал, оставшийся в зоне транзита селя, зачастую сохраняет на своей поверхности накипные лишайники, отсутствует глинистый налет. Грунты в зоне аккумуляции, наоборот, покрыты налетом, который показывает, что транспортирующей средой была суспензия, которая после остановки селя оставила глинистые обмазки на поверхности глыб и валунов [1]. Насыщение транспортирующей среды глинистыми частицами, высвободившимися из агрегированного состояния, приводит к увеличению дальности пробега, за счет увеличения плотности и вязкости потока. Такое явление наблюдалось при катастрофическом селепроявлении в горах Восточного Саяна (п. Аршан, Республика Бурятия, 2014 г.) [16].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за выполнение минералогических и грунтоведческих анализов селевых отложений ведущему инженеру ЦКП ИЗК СО РАН М.Н. Рубцовой и инженеру лаборатории инженерной геологии и геэкологии М.В. Даниловой.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа сделана на оборудовании центра коллективного пользования “Геодинамика и геохронология” Института земной коры СО РАН (грант № 075-15-2021-682), г. Иркутск.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генсировский Ю.В., Лобкина В.А., Музыченко А.А. и др. Влияние климатических изменений на условия формирования селей в районах распространения многолетнемерзлых пород на примере Чукотки // Лед и Снег. 2023. Т. 63. № 2. С. 271–282. <https://doi.org/10.31857/S2076673423020060>
2. Streletskiy D., Anisimov O., Vasiliev A. Permafrost degradation. In Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters. Elsevier: New York, USA, 2015. P. 303–344.
3. Маслаков А.А., Белова Н.Г., Баранская А.В. и др. Пластовые льды на восточном побережье Чукотского полуострова при потеплении климата: некоторые итоги экспедиций 2014–2018 гг. // Арктика и Антарктика. 2018. № 74. С. 30–43.
4. Circumpolar Active Layer Monitoring. <https://www2.gwu.edu/~calm/data/north.htm>
5. Сели. Национальный атлас России. <https://nationalatlas.ru/tom2/133-135.html>
6. Перов В.Ф. Селеведение. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.
7. Виноградов Ю.Б. Основные свойства селевой массы. Селевые потоки, сб. 3. М.: Гидрометеиздат, 1978. С. 3–17.
8. Север Дальнего Востока. Шилов Н.А. (ред.). М.: Наука, 1970. 488 с.
9. Котов А.Н. Многолетнемерзлые породы, в книге “Природа и ресурсы Чукотки”. Магадан: Изд-во СВНЦ ДВО РАН, 2006. С. 31–40.
10. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. Л.: Недра, 1990. 328 с.
11. Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010. 287 с.
12. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород / Под ред. Е.М. Сергеева и др. М.: Изд-во МГУ, 1968. Т. 2. 369 с.
13. Ревенко А.Г. Физические и химические методы исследования горных пород и минералов в Аналитическом центре ИЗК СО РАН // Геодинамика и Тектонофизика. 2014. Т. 5 (1). С. 101–114.
14. Лапердин В.К., Имаев В.С., Верхозин И.И. и др. Опасные геологические процессы на юге Якутии и сопредельных территориях. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2011. 240 с.
15. Рященко Т.Г., Акулова В.В., Ербаева М.А. и др. Процессы лессообразования в Приангарье, Забайкалье, Западной Монголии и Северо-Западном Китае (сравнительный анализ) // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 105–113.
16. Акулов Н.И., Акулова В.В., Штельмах С.И. и др. Строение и состав селевых потоков Восточного Саяна // Литология и полезные ископаемые. 2018. № 1. С. 41–57.

PECULIARITIES OF THE PROPERTIES OF SOIL INVOLVED IN MUDFLOW PROCESS IN CHUKOTKA

V. A. Lobkina^{a, #}, N. N. Ukhova^b, Yu. V. Gensiorovskiy^a, and A. A. Muzychenko^a

^a*Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

^b*Institute of the Earth's Crust of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: valentina-lobkina@yandex.ru*

Presented by Academician of the RAS A.I. Khanchuk November 25, 2022

During laboratorial study we have get data about mineral and granulometric composition, some physical and physico-chemical parameters of mudflow deposit, which made it possible to identify soil features in mudflows in Chukotka. Made a try to estimate influence this influence of these features on the formation of mudflow suspension, which is the transport substance of mudflow. In terms of structural rheological movement model, mostly cohesionless mudflow suppose to be formed within reviewed territory, in which main mass of water is in free state. However, laboratory investigations have shown high contain of fine-grained particles in samples of mudflow deposit, which is in aggregated state. When flooded, these particles saturate water flow with clay suspension that allows classification this flows as cohesive. The cohesion of mudflow mass is acquired by flows in the process of movement at the expense of aggregates destruction that leads to changing physical characteristics of the mudflow.

Keywords: Arctic, clay separate, deposit, mudflow, Chukotka