

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Манухин И.В., Николаева С.К. Влияние минерального состава, поверхностных пленок и температуры промораживания на дисперсность модельных песков при циклическом промерзании-оттаивании // Арктика и Антарктика. 2024. № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.4.72183 EDN: LDDQVF URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=72183

Влияние минерального состава, поверхностных пленок и температуры промораживания на дисперсность модельных песков при циклическом промерзании-оттаивании

Манухин Илья Владимирович

инженер 2 категории; МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии

119324, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1, оф. ЦВ-01

✉ il.hrommann@gmail.com



Николаева Светлана Казимировна

кандидат геолого-минералогических наук

доцент; Геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

119324, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1, оф. ЦВ-01

✉ nikolaeva.sk@gmail.com



[Статья из рубрики "Инженерная геология холодных равнинных и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2024.4.72183

EDN:

LDDQVF

Дата направления статьи в редакцию:

02-11-2024

Дата публикации:

23-11-2024

Аннотация: Песчаные грунты, формирующие дневную поверхность, слагающие массивы

насыпных оснований и сооружений, в условиях сезонного оттаивания или сезонного промерзания подвергаются циклическому (многократному) термическому воздействию, связанному, в том числе, с фазовыми переходами воды. Статья посвящена анализу влияния циклического промерзания-оттаивания на дисперсность песчаных грунтов. Описываются результаты лабораторного эксперимента по циклическому промерзанию-оттаиванию (120 циклов) водонасыщенных модельных песчаных грунтов разного минерального состава, с природными поверхностными пленками на зернах и без них, проведенного для изучения влияния минерального состава, температуры промораживания и наличия поверхностных пленок на изменение дисперсности. Объектами исследования стали кварцевый, полевошпатовый и карбонатный модельные пески. Для изучения влияния поверхностных пленок у части образца кварцевого песка природные пленки были удалены при помощи химической обработки. Гранулометрический анализ песчаных образцов выполнялся ситовым методом. Анализировались данные по изменению содержания отдельных фракций, а также различных показателей, привлекались опубликованные данные других исследователей. В отличие от мономинеральных и монодисперсных песков проведение анализа изменения гранулометрического состава для полидисперсных разностей выявило сложности в описании этих изменений, отсутствие комплексного показателя. По результатам исследования установлено, что в зависимости от минерального состава отмечается уменьшение интенсивности криогенного дробления в ряду: карбонатный песок, полевошпатовый песок, кварцевый песок (без пленок на зернах), что объясняется наибольшей устойчивостью кварца в зоне гипергенеза по сравнению с другими минералами. На устойчивость зерен кварца к криогенному выветриванию значительное влияние оказывают поверхностные пленки. При увеличении их удельной поверхности интенсивность дробления зерен в условиях эксперимента возросла вследствие повышения физико-химической активности поверхности зерен за счет вещества пленок. Для описания эффекта дробления предложен новый показатель – коэффициент криогенного измельчения, отражающий прирост содержания продуктов разрушения частиц грунта за единичный цикл промерзания-оттаивания. На его основе с использованием полученных данных и метода аналогии предложена методика прогноза изменения гранулометрического состава в результате процессов циклического промерзания-оттаивания, представлен пример такого прогноза.

Ключевые слова:

песчаные грунты, минеральный состав зерен, гранулометрический состав, аутигенные пленки, циклическое промерзание-оттаивание, дробление частиц, прогноз изменения дисперсности, насыпные сооружения, песчаные сооружения, физико-химическая активность

Введение

В связи с освоением арктических территорий все чаще встает вопрос о возведении сооружений, в том числе линейных, на насыпных грунтах, которые представлены дисперсными несвязанными грунтами – песками. Данные грунты, находясь в зоне избыточного увлажнения [1] и многочисленных фазовых переходов воды [2], могут претерпевать значительные изменения, которые необходимо учитывать для безопасной и долговечной эксплуатации инженерных сооружений.

Циклическое промерзание-оттаивание (далее – ЦПО) в природных условиях оказывает

на грунты очень сложное и многостороннее влияние, которое может привести к изменению строения, состояния и свойств грунтов. В песчаных грунтах воздействие ЦПО чаще всего сводится к дроблению частиц песчаной и более крупных размерностей и изменению пористости в результате формирования криогенных текстур.

Цель исследования состояла в выявлении закономерностей изменения дисперсности мономинеральных песчаных грунтов при ЦПО в зависимости от их минерального состава, наличия аутигенных пленок и температуры промораживания.

Объектом исследования стали образцы мономинеральных песчаных грунтов, подверженные циклическому (многократному) промерзанию–оттаиванию.

Предметом данного исследования являются знания о влиянии ЦПО на дисперсность песчаных грунтов.

Дробление песчаных частиц при ЦПО широко известно, и было описано многими исследователями еще в прошлом веке. Так, был выяснен основной механизм разрушения песчаных зерен, заключающийся в их раскалывании при промерзании тонких пленок воды в дефектах минеральных частиц [3,4,5]. Черняховский А. Г. считал, что расклинивающее действие льда может приводить лишь к грубому раздроблению породы по плоскостям напластования и способствовать накоплению только крупнообломочного элювия (по [6]). Некоторые исследователи полагали, что разрушение грунтов при промораживании может происходить только по напластованию за счет замерзания воды в порах (см. [6]). В литературе большое внимание уделяется разрушению частиц грунтов по механизму гидратации в результате возникновения расклинивающего давления тонких пленок адсорбированной воды, в основном так разрушаются сланцы, алевролиты и глинисто-карbonатные породы [7]. Песчаные частицы по такому механизму почти не разрушаются [8,9].

Вода в тальных дисперсных грунтах может находиться в порах между отдельными частицами грунтов, а также в дефектах минеральных зерен. В энергетическом плане, в дисперсных грунтах она может быть свободной, с удельной энергией связи равной нулю, осмотической и капиллярной (с низкой удельной энергией связи до 0,53 кДж/моль для капилляров диаметром до 10-7мм [10], адсорбированной с самой высокой энергией связи до 120 кДж/моль [11]. Широко известно, что связанная (адсорбированная) вода обладает аномальными свойствами по сравнению со свободной водой, а именно повышенной плотностью, повышенной вязкостью, пониженной растворяющей способностью, пониженнной диэлектрической проницаемостью и, что самое важное в рамках данной работы, пониженной температурой замерзания [12].

Дробление песчаных частиц при циклическом промерзании–оттаивании происходит в результате увеличения объема воды при промерзании на 9%, в результате чего возникает давление, которое при достижении определенной величины может привести к разрыву частицы по поверхности дефекта, заполненного водой. Величина этого давления теоретически составляет 13,4 МПа/°С [4]. По другим расчетным данным давление, оказываемое водой при промерзании, может достигать 610 атм (61,8 МПа) при -5°C, 1130 атм (114,5 МПа) при - 10°C и 2115 атм (214,3 МПа) при -20°C [13]; в опытных исследованиях по промораживанию капель воды на свободной поверхности развивающееся давление промерзания не превышало 0,02 МПа [14]. Наблюдаемое в дисперсных грунтах давление при промерзании оказывается меньше теоретических

значений, описанных выше, и составляет от 1-2 МПа и до 25 МПа, в зависимости от засоленности и степени влагонасыщения в диапазоне температур промораживания от -1°C до -10°C в условиях градиентного температурного поля (с возможностью перемещения поровой воды) [15, 16]. Однако высокие давления, сравнимые с теоретическими величинами, вероятно, могут возникать в тонких дефектах песчаных зерен.

Песчаные частицы грунтов в большинстве своем представлены обломками кристаллов минералов, чаще всего первичных силикатов, иногда обломками горных пород. Такие частицы зачастую имеют определенные дефекты строения, такие как микротрешины, сколы, выколы и др. Вода при взаимодействии с поверхностью таких обломков может попадать в эти дефекты и удерживаться там силами поверхностного натяжения, силой тяжести и за счет прочих взаимодействий. Вследствие низкой энергии взаимосвязи воды с поверхностью таких минералов, вода в них должна промерзать при температурах близких к промерзанию в свободном состоянии, однако, при отсутствии свободного пространства для расширения, этого не происходит, и вода находится в переохлажденном состоянии, до тех пор, пока давление, оказываемое промерзающей водой, не превысит прочность ограничивающего контура.

При проведении исследований дробления частиц песчаной фракции в дисперсных глинистых грунтах оказалось, что песчаные частицы могут подвергаться дроблению даже в матриксе из глинистых частиц [17, 18]. Такой процесс в природных условиях встречается очень часто в покровных отложениях областей развития сезонно мерзлых и талых грунтов, лучше всего такой эффект виден в покровных отложениях водораздельных массивов, где минимально влияние процессов переноса; там количество песчаных частиц по разрезу с глубиной увеличивается, а содержание пылеватых частиц уменьшается закономерно в пределах зоны сезонного промерзания/протаивания [19].

В связи с изложенным выше материалом становится понятным, что при циклическом промерзании-оттаивании песков должно происходить увеличение их дисперсности (удельной поверхности) и изменение их гранулометрического состава, от которого существенно зависят свойства песчаных грунтов.

Объекты и методика исследования

Для эксперимента по циклическому промораживанию-оттаиванию были взяты образцы природного и модельных песков (в том числе и очищенные от поверхностных пленок), описание которых представлено ниже.

Использовался отобранный в Подмосковье песок флювиогляциального генезиса (fIIms), коричневый, ожелезненный, в составе которого 95% кварца, 4% полевых шпатов, 1% амфиболов, исходя из чего он рассматривается как существенно кварцевый (образец К1). Из этого песка путем сухого просеивания (без предварительного диспергирования) через сита с диаметром отверстий 0,5 мм и 0,25 мм выделялась наиболее представительная часть – среднепесчаная фракция природной дисперсности (образец КФ1).

Для исследования влияния природных пленок на возможность дробления песчаных зерен при ЦПО из описанных выше образцов были подготовлены их разности, лишенные пленок (образцы К2 и КФ2). Очищение от пленок производилось путем многократного нагревания пробы до 40-50° в течение 20-30 минут в 5% растворе соляной кислоты с

дальнейшей промывкой водой (декантацией) до чистой надосадочной жидкости (с отрицательной реакцией на ион хлора), после чего последняя сливалась, а из оставшегося осадка отмучивались частицы мельче 0,05 мм [20]. При обработке 5% раствором соляной кислоты, большая часть вещества пленок, за исключением оксида алюминия, который почти не реагирует с соляной кислотой, образует хорошо растворимые соединения, которые выносятся при декантации и отмучивании.

Для изучения влияния минерального состава зерен песка на их устойчивость при ЦПО были взяты (кроме кварцевого) полевошпатовый и карбонатный (кальцит) мелкие пески (образцы ПШ и Кб), полученные путем дробления минералов.

Циклическое промораживание-оттаивание для всех образцов проводилось на протяжении 120 циклов по схеме: 4 часа в морозильной камере и от 4 до 12 часов при комнатной температуре ($\sim 25^{\circ}\text{C}$). В природных условиях грунты могут претерпевать от 1-2 циклов промерзания-оттаивания в год вплоть до 100 и более в определенных условиях (в очень холодном климате, тонком снежном покрове, инсоляции и малой глубине залегания (до 10 см) [21], при этом в среднем грунты деятельного слоя подвергаются 4-5 циклам в год [2,21,22]. Таким образом, полученные нами данные за 120 циклов ЦПО будут описывать трансформацию гранулометрического состава песчаных образцов по истечении 24-30 лет, что сопоставимо со сроками проведения капитального ремонта земляного полотна дорожных сооружений (ГОСТ Р 58861-2020).

Каждый образец был помещен в металлический бюкс, доведен до плотного сложения и полного водонасыщения, после чего был обмотан стретч-пленкой для предотвращения испарения и сублимации воды (в талом и мерзлом состояниях соответственно), таким образом, ЦПО происходило в условно закрытой системе. Образцы кварцевого состава синхронно промораживались при температурах -20°C и -10°C , а образцы ПШ и КП только при -20°C . Значения температур выбраны для обеспечения замерзания связанной воды (при ее наличии) в отсутствии гидрофильтрных глинистых минералов в образцах.

Определение гранулометрического состава песчаных образцов, исходных и после завершения эксперимента, проводилось ситовым методом в соответствии с (ГОСТ 12536 – 2014) с двукратной повторностью (табл. 1), названия грунтов даны в соответствии с (ГОСТ 25100-2020). По полученным результатам были рассчитаны: коэффициент неоднородности по А. Хазену $C_u=(d_{60}/d_{10})$; коэффициент сортированности по П.И. Фадееву $Koef=(d_{90}/d_{10})$; коэффициент отсортированности по П.Д. Траску $Kot=(d_{75}/d_{25})$; коэффициент неоднородности по В.Д. Мелентьеву $\Pi=d_{50}(d_{90}/d_{10})$; параметр максимальной неоднородности (по И.В. Дудлеру) $Pm=d_{50}(d_{95}/d_5)$, где d_x – диаметр частиц, меньше которого в образце содержится $x\%$ частиц [23].

Дополнительно были рассчитаны показатели относительной устойчивости $N_{kr} = (a-b)/(a*n)$, где a – количество гранулометрической мономинеральной фракции в образце до воздействия на нее криогенных факторов; b – количество той же фракции после воздействия; n – число циклов промерзания и оттаивания; a для некоторых образцов – показатель интенсивности изменчивости дисперсности Кизм [24]. Кроме того, авторами предложен новый показатель – коэффициент криогенного измельчения ККИ, описание которого дано в следующем разделе.

Широко известный коэффициент криогенной контрастности (ККК) в данной работе не рассматривается, так как он предназначен для определения криогенного генезиса отложений [25,26].

Морфология частиц отдельных фракций, выделенных в ходе гранулометрического анализа, изучалась при помощи оптического цифрового микроскопа Levenhuk DTX 500.

Результаты

Теоретически дробление частиц при ЦПО грунтов происходит во всех песчаных фракциях, при этом продукты дробления могут иметь различный размер, что во многом затрудняет интерпретацию полученных данных гранулометрического состава, так как потеря массы одной фракции может компенсироваться дроблением более крупных частиц (см. табл. 1). Причем интерпретация оказывается весьма сложной особенно для би- и полидисперсных грунтов, поэтому для простоты и наглядности описания результатов удобно использовать коэффициенты, традиционно применяемые для характеристики гранулометрического состава песков.

Таблица 1. Гранулометрический состав исследованных образцов песков до и после циклического промораживания-оттаивания при температурах замерзания -10 и -20°

Образец	К1		КФ1		К2		КФ2		ПШ	Кб
Фракция, мм	-20	-10	-20	-10	-20	-10	-20	-10	-20	-20
2-1	0/1	0/1	0/0	0/0	0/1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
1-0,5	5/6	5/6	0/0	0/0	6/6	6/7	0/1	0/0	0/0	0/0
0,5-0,25	65/54	65/53	77/66	77/73	66/67	66/66	84/85	84/79	47/45	38/32
0,25-0,1	29/33	29/33	21/28	21/18	25/25	25/19	16/12	16/13	40/53	62/66
0,1-0,05	1/2	1/2	0/1	0/6	3/0	3/8	0/2	0/2	12/0	0/1
<0,05	0/4	0/5	2/5	2/3	0/1	0/0	0/0	0/6	1/2	0/1

Примечание: дано содержание частиц по фракциям до/после ЦПО.

Из полученных данных гранулометрического состава следует, что наибольшие изменения в результате многократного промерзания-оттаивания происходят в наиболее представительных средней и мелкой фракциях песчаных образцов, за счет дробления которых повышается количество частиц более мелкого размера – тонкопесчаных и пылеватых.

В таблице 2 представлены значения средних диаметров частиц (d_{50}) в исследуемых песках до и после ЦПО, откуда следует: 1) средние диаметры незначительно уменьшаются или не изменяются, что свидетельствует о разной степени дробления частиц; 2) наличие поверхностных пленок увеличивает интенсивность дробления зерен на примере кварцевых песков; 3) влияние температуры промораживания (при выбранных ее значениях) на величину d_{50} не существенно. По уменьшению интенсивности криогенного дробления исследованные образцы по минеральному составу выстраиваются в следующий ряд: карбонатный песок, полевошпатовый песок, кварцевый песок (без пленок), что объясняется наибольшей устойчивостью кварца в зоне гипергенеза по сравнению с другими минералами.

Таблица 2. Изменение среднего диаметра частиц исследованных песков в результате

120 циклов промерзания-оттаивания

Название образца	Температура промораживания, °C	Средний диаметр d_{50} , мм	
		исходный	после ЦПО

Кварцевый песок, К1	-20	0,32	0,29
	-10	0,32	0,29
Кварцевый песок, КФ1	-20	0,32	0,31
	-10	0,32	0,32
Кварцевый песок, К2	-20	0,33	0,33
	-10	0,33	0,33
Кварцевый песок, КФ2	-20	0,34	0,34
	-10	0,34	0,34
Полевошпатовый песок, ПШ	-20	0,24	0,23
Карбонатный песок, К6	-20	0,21	0,19

Примечание: образцы К2, КФ2 без природных поверхностных пленок.

По результатам эксперимента были рассчитаны различные показатели степени гранулометрической неоднородности песков (табл. 3). Приведенные коэффициенты были в разное время предложены известными исследователями песчаных грунтов (как и соответствующие классификации); различаясь в деталях, все они следуют общему принципу: чем больше получаемое значение – тем более песок неоднороден по дисперсности.

По наиболее известному показателю неоднородности Си видно, что почти все кварцевые пески (К и КФ образцы) изначально являлись весьма однородными ($\text{Си} < 3$), но в результате криогенного дробления их степень неоднородности увеличилась, за исключением образца К2, промороженного при температуре -20°C , в котором не наблюдалось дробление преобладающих фракций, а отличия в гранулометрическом составе проявились за счет неоднородности пробы песка. Полевошпатовый песок в своем исходном состоянии по Си являлся неоднородным, а после ЦПО по всем показателям стал более однородным, в результате роста содержания мелкопесчаной фракции, которая в итоге стала преобладающей. В карбонатном песке практически по всем показателям степень неоднородности почти не изменилась вследствие того, что обломки, сформировавшиеся в результате дробления, оказались преимущественно размера преобладающей фракции (см. табл. 1).

Таблица 3. Изменение значений различных показателей неоднородности исследованных песков в результате циклического промерзания-оттаивания

Образец	Температура промораживания, $^{\circ}\text{C}$	$\text{Си} = (d_{60}/d_{10})$	$\text{Коф} = (d_{90}/d_{10})$	$\text{Кот} = (d_{75}/d_{25})$	$\Pi = d_{50}(d_{90}/d_{10})$	$\Pi_m = d_{50}(d_{95}/d_5)$
К1	-20	2,00/2,45	2,70/3,60	1,56/1,81	0,82/1,02	1,14/1,72
	-10	2,00/2,32	2,70/3,33	1,56/1,76	0,82/0,94	1,14/1,47
КФ1	-20	1,84/2,32	2,24/2,94	1,39/1,59	0,71/0,86	0,99/2,50
	-10	1,84/2,99	2,24/3,64	1,39/1,51	0,71/1,15	0,99/2,18
К2	-20	2,15/1,96	2,90/2,68	1,57/1,53	0,90/0,84	1,37/1,24
	-10	2,15/2,51	2,90/3,35	1,57/1,60	0,90/1,06	1,37/1,80
КФ2	-20	1,60/1,64	1,89/1,93	1,30/1,29	0,63/0,65	0,83/0,99
	-10	1,60/2,16	1,89/2,56	1,30/1,36	0,63/0,85	0,83/2,33
ПШ	-20	3,10/1,94	4,32/2,70	2,12/1,69	1,04/0,64	1,52/0,83
К6	-20	1,79/1,80	2,58/2,65	1,65/1,67	0,58/0,56	0,73/0,72

...	...	-,-, -, +, --	-,-, -, +, --	-,-, -, +, --	-,-, -, +, --	-,-, -, +, --	-,-, -, +, --
-----	-----	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

Примечания: 1) в каждой ячейке приведены значения коэффициентов до/после ЦПО; 2) зеленым цветом отмечены образцы песков, в которых степень неоднородности (по определенному показателю) повышается, а красным, в которых понижается; отсутствие цвета означает, что изменений нет или они минимальны (в пределах точности).

Представляется важным сопоставить полученные нами данные с результатами предыдущих исследований. Так, В. Н. Конищев в 1981 г. в монографии «Формирование состава дисперсных пород в криолитосфере» привел перечень опубликованных экспериментов по циклическому промерзанию-оттаиванию мономинеральных монофракционных песков, для которых был рассчитан показатель относительной устойчивости H_{kp} ; чем ниже его значение, тем выше устойчивость фракции.

Этот показатель предназначен для описания криогенного измельчения в мономинеральных монодисперсных песках, в исследуемых образцах под его определение строго не подходит ни один образец, так как даже самые однородные и мономинеральные из них, образцы К2 и К22, содержат до 23% частиц фракций отличных от доминирующей 0,5-0,25 мм. Хотя наши образцы и проведенный эксперимент не полностью соответствуют условиям, описанным в литературе [3], полученные результаты могут быть использованы для оценочного сравнения.

В таблице 4 приведены опубликованные данные по экспериментальному ЦПО мономинеральных монодисперсных песков и рассчитанный для них показатель относительной устойчивости. Здесь сразу видно наличие следующих закономерностей: увеличение устойчивости к криогенному измельчению при уменьшении дисперсности и ее уменьшение при понижении температуры промерзания [3]. Полученные нами данные в общих чертах вписываются в ранее выявленные закономерности, однако, значения относительной устойчивости минералов отличаются от ранее опубликованных в разы. Привлекают внимание строки 1-2 и 4 данной таблицы, в них приведены результаты для кварцевых песков, не обладающих значительным количеством аутогенных пленок: для образцов в строках 1 и 2 – за счет получения песков путем дробления из крупного мономинерального кристаллического образца; 4 – за счет химического удаления пленок. При этом последний песчаный образец показал значительно меньшие масштабы дробления, вероятнее всего, за счет меньшего количества дефектов зерен, по сравнению с искусственно растертыми минералами.

Таблица 4. Сравнительная таблица результатов расчета показателя относительной устойчивости минералов по новым и опубликованным данным (по [3, 6, 8]).

Исследуемый образец грунта	Амплитуда температуры при ЦПО, °C	Кол-во циклов	Периодичность ЦПО, ч	Показатель относительной устойчивости для фракции (мм) H_{kp} , 10-2 %/цикл				Источник
				2-1	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	
Кварц из пегматитовой жилы, Житомир	-10/+20	50	-12/+12	-	32	13	27	Конищев, 1981
Кварцевый	-10/+15+20	1000	-10-	-	8	9	-	Минервин,

образец	-10 + 20 + 20	1000	-10 12/+10+12					1980
мономинеральный песок								
КФ1 Кварцевый песок средней крупности	-10/+25	120	-4/+4+12	-	3,3	2,5	-	новые данные
КФ2 Кварцевый песок средней крупности, без пленок	-10/+25	120	-4/+4+12	-	3,3	2,5	-	новые данные
Кварцевый песок, люберецкий	-20/+20	25	-12/+12	-	61	-	-	Конищев, 1981
Кварцевый песок, люберецкий	-20/+20	100	-10- 12/+10+12	-	63	28	-	Рогов, 2000
Кварц, волынский	-20/+20	220	-	-	23,2	13,6		
Кварц, волынский	-20/+20	100	-	-	39	26	19	
Кварц, колымский	-20/+20	100	-	-	26	13	9	
КФ1 Кварцевый песок средней крупности	-20/+25	120	-4/+4+12	-	9,2	-5,8	-	новые данные
КФ2 Кварцевый песок средней крупности, очищенный от пленок	-20/+25	120	-4/+4+12	-	0	3,3	-	новые данные
Микроклиновый мономинеральный песок	-10/+15+20	1000	-10- 12/+10+12	-	-	9,3	-	Минервин, 1980
Полевые шпаты	-7-9/+5+10	98	-	21	-	-	-	Конищев, 1981
Полевые шпаты		700	-	10	-	-	-	
Кальцит	-10/+15+20	1000	-10- 12/+10+12	-	-	9,4	-	Минервин, 1980
Известняк	-10/+20	50	-12/+12	-	31	19	14	Конищев, 1981

Примечание: все образцы находились в водонасыщенном состоянии.

При рассмотрении дробления кварцевых песков при температуре промораживания - 20°C (строки 5-11, в которых образцы по сути представлены 4 природными песками, разделенными на фракции, и природным песком, разделенным на фракции и очищенным от пленок) мы видим, что относительная устойчивость минералов по данным опубликованных экспериментов оказывается относительно близкой друг к другу, при этом для образца КФ1 она оказывается в разы меньше, а для КФ2 показатель вообще равен нулю, что подтверждает отрицательное влияние природных пленок на устойчивость зерен к криогенному дроблению.

Устойчивость полевых шпатов, оказывается в среднем несколько выше, чем у карбонатов, что сходится с приведенными ранее данными [3].

В ходе анализа полученных разнородных данных пришло решение найти показатель (коэффициент), который описывал бы трансформацию всего гранулометрического

(фракционного) состава грунтов в результате циклического промерзания-оттаивания. Для этого была проведена математическая интерпретация хода криогенного дробления (рис. 1), из нее видно, что в результате ЦПО происходит уменьшение содержания фракции C_i на величину f_i и перераспределение раздробленного материала по более мелким фракциям в пропорции x_{ij} .

$$\Sigma_1 \left[\begin{array}{l} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ \vdots \\ C_n \end{array} \right] \xrightarrow{\text{ЦПО}} \Sigma_2 \left[\begin{array}{l} c_1 = C_1 - f_1 \\ c_2 = C_2 - f_2 + x_{12}f_1 \\ c_3 = C_3 - f_3 + x_{13}f_1 + x_{23}f_2 \\ c_4 = C_4 - f_4 + x_{14}f_1 + x_{24}f_2 + x_{34}f_3 \\ \vdots \\ c_n = C_n - f_n + x_{1n}f_1 + x_{2n}f_2 \dots + x_{(n-1)n}f_{(n-1)} \end{array} \right]$$

$$\sum_{i=1}^n C_i = 100\%; \quad \sum_{i=1}^n c_i = 100\%; \quad \Sigma_1 = \Sigma_2 = 100\%; \quad 0 \leq f_i \leq C_i; \quad 0 \leq x_{ij} \leq 1; \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1;$$

Рис. 1. Схема трансформации гранулометрического состава грунта в результате циклического промерзания-оттаивания, где C_i – содержание i -ой фракции грунта до ЦПО (C_1, C_2, \dots, C_n – содержания всего ряда стандартных фракций от самой крупной до мелкой), %; c_i – содержание i -ой фракции грунта после ЦПО, %; f_i – относительная потеря массы во фракции i , за счет криогенного дробления, %; x_{ij} – коэффициент, показывающий какая доля f_i , была раздроблена до фракции j , д.ед.

Достаточно очевидно, что для получения эффекта влияния циклического промерзания-оттаивания на гранулометрический состав исходного грунта нам необходимо узнать сумму величин f_i , для этого нам необходимо получить модуль разницы C_i и c_i для каждой фракции, после чего просуммировать все полученные модули и сумму поделить на 2. Формула расчета предлагаемого авторами коэффициента криогенного измельчения ККИ представлена в выражении (1), где T – количество циклов промерзания-оттаивания.

$$K_{\text{ККИ}} = (0,5 * \sum_{i=1}^n |C_i - c_i|) / T \quad . (1)$$

Из определения (1) этого коэффициента следует, что из-за использования модуля разности, он будет давать характеристику изменения нейтральную по знаку, то есть увеличение и уменьшение дисперсности на одинаковую величину будут давать одинаковое значение, хотя описывать будут абсолютно разные процессы. Он показывает относительное содержание обломков частиц, образовавшихся в результате одного цикла промерзания-оттаивания в опыте.

По сути, данный коэффициент уточняет общий показатель интенсивности изменчивости дисперсности Кизм., который использовался в монографии «Микростроение мерзлых пород» (1988). От нашего коэффициента он отличается тем, что был создан для оценки интенсивности изменчивости гранулометрического состава в общем виде, а не только в рамках оценки дробления, к тому же он «удваивал» результаты изменения гранулометрического состава за счет учета образованных обломков из более крупной фракции и их же накопления в более мелких фракциях.

По сути, предлагаемый нами коэффициент криогенного измельчения ККИ показывает количество (%) формируемых обломков за 1 цикл промерзания-оттаивания. Зная его значение, примерное количество циклов промерзания в год и срок службы земляного сооружения, можно спрогнозировать, оценить изменение гранулометрического состава грунтов.

Данные расчетов ККИ (табл. 5) подтверждают ранее опубликованные выводы.

Понижение температуры промораживания в среднем приводит к более высокой интенсивности дробления (получены более высокие значения коэффициента ККИ), при этом пропорции, в которых она изменяется, весьма часто не совпадают с предполагаемым ростом теоретических величин давления при кристаллизации воды 100 – 200 МПа (-10 – -20°C) [13].

*Влияние поверхностных пленок на зернах кварца проявилось достаточно отчетливо, особенно в сравнении с опубликованными данными. Так, пески с очищенными от пленок зернами показывают преимущественно значение ККИ=0,025%, в то время как пески с пленками показывают значения от 0,039 до 0,630% в образцах со схожей дисперсностью, причем наиболее часто встречающиеся значения составляют порядка 26*10-2. Минимальное же значение в данном диапазоне (3,9*10-2) принадлежит люберецкому песку, прошедшему 1000 циклов промерзания-оттаивания, причем его гранулометрический состав претерпел большую часть изменений (~90%) после 150 циклов, а далее он почти не изменился, в результате чего и итоговое значение оказалось «заниженным».*

Причина пониженной криогенной измельчаемости кварца, очищенного от пленок, связана с их водоудерживающей способностью. Взятый для исследований кварцевый песок при макроописании имел коричневый цвет, что обычно свидетельствует о существенно железистом составе поверхностных пленок (или «рубашек»), представленном сложным комплексом, состоящим из гидроксидов Fe, Mn и Al, прочно связанных с поверхностью зерен [19,27,28].

Таблица 5. Результаты расчетов показателя криогенного измельчения ККИ по полученным новым и опубликованным данным (по [3,6,8,24]).

Исследуемый образец грунта	Амплитуда температуры при ЦПО, °С	Кол-во циклов	Периодичность ЦПО, ч	Значения показателя криогенного измельчения ККИ, %/цикл				Источник
				2-1	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	
Кварц из пегматитовой жилы, Житомир	-10/+20	50	-12/+12	-	0,32	0,13	0,27	Конищев, 1981
Кварцевый мономинеральный песок	-10/+15+20	1000	-10-12/+10+12	-	-	0,089	-	Минервин, 1980
K1 Кварцевый песок средней крупности	-10/+25	120	-4/+4+12		0,092			новые данные
KФ1 Кварцевый песок средней крупности	-10/+25	120	-4/+4+12	-	0,058		-	то же
K2 Кварцевый песок средней крупности, без пленок	-10/+25	120	-4/+4+12		0,025			то же
KФ2 Кварцевый	-10/+25	120	-4/+4+12					то же

песок средней крупности, без пленок				-	0,058	-		
Кварцевый песок, люберецкий	-20/+20	25	-12/+12	-	0,61	-	-	Конищев, 1981
Кварцевый песок, люберецкий	-20/+20	100	-10-12/+10+12	-	0,63	0,28	-	
Кварц волынский	-20/+20	220	-	-	0,232	0,136		Рогов, 2000
Кварц волынский	-20/+20	100	-	-	0,39	0,26	0,19	
Кварц колымский	-20/+20	100	-	-	0,26	0,13	0,09	
Песок люберецкий средней крупности	-	1000	-	-	0,039	-		Микростроение, 1988
K1 Кварцевый песок средней крупности	-20/+25	120	-4/+4+12	-	0,092	-		новые данные
KФ1 Кварцевый песок средней крупности	-20/+25	120	-4/+4+12	-	0,092	-		то же
K2 Кварцевый песок средней крупности, без пленок	-20/+25	120	-4/+4+12	-	0,025	-		то же
KФ2 Кварцевый песок средней крупности, очищенный от пленок	-20/+25	120	-4/+4+12	-	0,025	-		то же
Микроклиновый мономинеральный песок	-10/+15+20	1000	-10-12/+10+12	-	-	0,093	-	Минервин, 1980
Полевые шпаты	-7-9/+5+10	98	-	0,21	-	-	-	Конищев, 1981
Полевые шпаты		700	-	0,10	-	-	-	
Полевой шпат (ПШ)	-20/+25	120	-4/+4+12	-	0,117	-		новые данные
Кальцит	-10/+15+20	1000	-10-12/+10+12	-	-	0,094	-	Минервин, 1980
Известняк	-10/+20	50	-12/+12	-	0,31	0,19	0,14	Конищев, 1981
Кальцит (Кб)	-20/+25	120	-4/+4+12	-	0,05	-		новые данные

Примечания: 1) исходное состояние образцов – водонасыщенное; 2) для грунтов с би- и полидисперсным гранулометрическим составом результирующий коэффициент помещался в пару клеток, ответственных за преобладающие фракции.

Помимо этого, поверхность частиц кварца в природных условиях в присутствии воды оказывается покрыта тонким слоем аморфного кремнезема или слоем нарушенных кристаллов толщиной до 100 Å. Этот слой имеет более высокие значения удельной поверхности (от 300 до 900 м²/г) и адсорбирующей способности, он образуется в результате частичного поверхностного растворения кварца в воде или осаждения из

воды растворенного кремнезема [29, 30]. Процесс растворения кварца в воде очень сложный, так как здесь происходит растворение собственно кварца, а также и аморфного кремнезема, при этом параллельно из раствора зачастую осаждается аморфный кремнезем на активную поверхность кварца, замедляя его дальнейшее растворение. Растворимость кремнезема в воде понижается за счет присутствия в воде ионов металлов, включая Fe и Al в результате их хемосорбции на поверхности кремнезема [29].

Пленки на зернах песков К1 и КФ1 представлены преимущественно гидроксидами Fe, Al и аморфным кремнеземом, первые 2 компонента нами были удалены с помощью 5% раствора HCl. Использованной обработки не хватило на полное удаление пленок, однако отчетливо видно, что количество окрашенных частиц значительно сократилось (рис. 2). В результате этого поверхность песчаных зерен в образцах К2 и КФ2 (после очищения от пленок) потеряла большую часть гидроксидов Al и Fe, а остался на ней преимущественно аморфный кремнезем, в образцах же К1 и КФ1 на поверхности аморфного кремнезема адсорбированы гидроксиды Al и Fe, причем в первую очередь они адсорбируются на «пористой» поверхности аморфного кремнезема, вследствие более высокой теплоты адсорбции, по сравнению с плоской поверхностью [30]. Таким образом, у нас зерна в обоих случаях покрыты тонкими пленками высокодисперсного и тонкопористого аморфного кремнезема, но в случае образцов К1 и КФ1 на стенках пор в аморфном кремнеземе адсорбированы гидроксиды Al и Fe, которые вследствие своего расположения делают массу аморфного вещества еще более тонкопористой повышая водоудерживающую способность.

Влияние поверхностных пленок на дробление песчаных зерен кварца при ЦПО, скорее всего, связано со способностью аморфного вещества пленок (оксидов и гидроксидов железа и алюминия, аморфного кремнезема и пр.) удерживать на своей поверхности тонкие пленки связанный воды. Вещество пленок имеет тенденцию концентрироваться у дефектов кристаллической решетки минералов (трещин или сколов), вследствие чего пленки связанный воды оказываются приурочены к этим же участкам и, судя по полученным данным, могут существенно промерзать в песке при температурах до -10°C. Таким образом, пески с большим количеством пленок на зернах дробятся при ЦПО сильнее, чем их аналоги с частично снятыми пленками. Также есть предположение, что пленки аморфного вещества на поверхности частиц могут играть роль «пробок» у устья дефектов, заставляя воду промерзать в них.

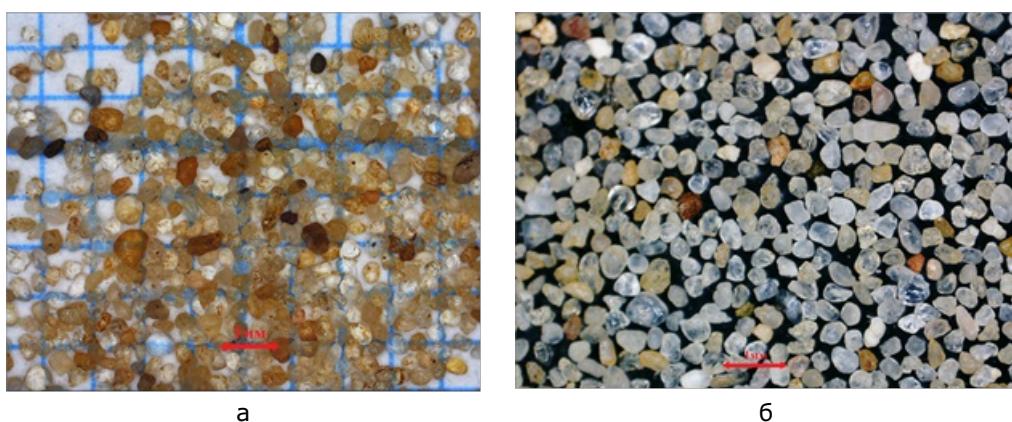


Рис. 2. Характер поверхности зерен песков К1 и КФ1 с природными пленками (а) и песков К2 и КФ2 с удаленными пленками (б)

Влияние поверхностных пленок в кварцевом песке также распространяется на характер

изменения дисперсности. Так, в кварце с природными поверхностными пленками образовывалось от 1 до 4% (преобладают 3-4%) пылеватых частиц (размерами менее 0,05 мм), в то время как в кварцевом песке, очищенном от пленок, образовывалось от 0 до 4%, а в основном 0-1% частиц пыли.

Практическим применением ККИ является использование его для оценки изменения гранулометрического состава песчаных грунтов в результате определенного количества циклов промерзания оттаивания. Зная среднегодовое количество переходов температуры грунтов через 0°C и предполагаемый срок службы грунтового основания или земляного полотна, можно получить количественное содержание новообразованных обломков частиц в грунте за этот период. Зная закономерности дробления и распределения его продуктов, можно получить распределение этих обломков по гранулометрическим фракциям. Достаточно хорошо известно, что интенсивность дробления зерен кварца обратна пропорциональна их размеру [3], также из представленных материалов достаточно хорошо видно, что при криогенном измельчении кварца чаще всего формируются обломки «соседней» более мелкой фракции (см. табл. 1), обломки последующих мелких фракций формируются как правило реже, причем чем более мелкая фракция, тем меньше вероятность формирования таких обломков. Такое правило работает до тонкопесчаной фракции включительно, крупнопылеватые частицы могут формироваться при дроблении частиц разных размеров со значительной вероятностью (табл. 6).

Таблица 6. Результаты анализа распределения обломков по фракциям
и его изменения при криогенном дроблении

Образец	К1				КФ1				
	Фракция, мм	-20°C	Δ	-10°C	Δ	-20°C	Δ	-10°C	Δ
2-1	0/1	+1*		0/1	+1*	0/0	-	0/0	-
1-0,5	5/6	+1*		5/6	+1*	0/0	-	0/0	-
0,5-0,25	65/54	-9*		65/53	-10*	77/66	-11	77/73	-4
0,25-0,1	29/33	+4(45)		29/33	+4(40)	21/28	+7(64)	21/18	-3
0,1-0,05	1/2	+1(11)		1/2	+1(10)	0/1	+1(9)	0/6	+6(86)
<0,05	0/4	+4(44)		0/5	+5(50)	2/5	+3(27)	2/3	+1(14)

Примечания: 1) дан средний гранулометрический состав образцов до/после ЦПО; 2) в столбцах Δ представлены результаты воздействия ЦПО: со знаком «-» – массовая доля образованных обломков (отколовшихся) из данной фракции; со знаком «+» – массовая доля обломков, отколотых от более крупных фракций (приведены процентные доли образованных обломков, попавших в данную фракцию); 3) знаком * отмечены изменения содержания фракций с учетом неоднородности образцов.

При выборе такой методики встает вопрос о подборе коэффициентов криогенного измельчения, используемых для расчетов. Исследователи получали различные данные для разных минералов, разной крупности при разном температурном режиме, при разной влажности грунтов и для опытов разной протяженности (количество циклов промерзания – оттаивания). Модельные условия подобранныго коэффициента должны быть максимально близки к моделируемым условиям в расчетной ситуации, при этом, как и во многих инженерных расчетах, стоит придерживаться принципа расчета наихудшего возможного варианта.

Для примера представим расчет изменения дисперсности песка средней крупности в земляном полотне дороги. Согласно п. 5.1 и 5.3 ГОСТ Р 58861–2020, капитальный ремонт земляного полотна выполняется раз в 24-30 лет, что можно принять за временной интервал для расчета. Температурный режим и среднее количество циклов промерзания-оттаивания в год следует определять по архивным данным близлежащей местности для грунтов схожей дисперсности. В данной ситуации ведется примерный расчет, мы возьмем 5 циклов в год и температуру промерзания -10°C , таким образом, получается в расчетный период должно произойти 120-150 циклов промерзания-оттаивания. Грунт, в рамках данного оценочного расчета, принимаем водонасыщенным, что будет отвечать принципу возможного худшего варианта. Также полагаем, что пески являются преимущественно кварцевыми и обладают значительным количеством пленок на поверхности зерен, так что из наших материалов (табл. 5) будет лучшего всего подходить строка 3 со значением ККИ 0,092%/цикл.

Гранулометрический состав песка и результаты проведенного прогноза его изменения после 120 циклов промерзания-оттаивания приведены в таблице 7.

Содержание новообразованных обломков x , для него должно быть $x=\text{ККИ} \cdot n$, где n – количество циклов промерзания-оттаивания, следовательно $x=0,092 \cdot 120$, отсюда $x=11\%$. Далее для прогнозирования гранулометрического состава нам необходимо понять, каким образом продукты разрушения распределяются по более мелким фракциям, для этого воспользуемся методом аналогии. Для взятого для примера песчаного грунта ближайшим аналогом является образец К1, закономерности дробления и распределения обломков по размеру которого приведены в таблице 6, они и будут использованы в нашем прогнозе.

Таблица 7. Исходный гранулометрический состав и результаты оценки его изменения после 120 циклов промерзания-оттаивания для песка средней крупности

Исходный гранулометрический состав		ККИ 0,092% за цикл	Прогнозируемый гранулометрический состав
Фракции, мм	содержание фракций, %	вероятное изменение содержание	содержание фракций, %
>2	8	~0	8
2-1	4	~0	4
1-0,5	24	~0	24
0,5-0,25	50	-x	39
0,25-0,1	11	+0,4x	15
0,1-0,05	1	+0,1x	2
<0,05	2	+0,5x	8

Как видно из таблицы 8, дисперсность данных песков по результатам нашего прогноза должна измениться весьма значительно, что особенно хорошо видно по значениям коэффициента неоднородности по Хазену (C_u), поскольку однородный песок стал неоднородным. Для иллюстрации влияния такого изменения дисперсности нами были рассчитаны коэффициенты фильтрации для исходного и прогнозируемого гранулометрических составов песчаного грунта по опубликованным формулам [23,27]. Из полученных данных видно, что прогнозируемые изменения дисперсности должны

привести значительному уменьшению коэффициента фильтрации (более чем в 4 раза), поэтому мы считаем, что данными преобразованиями дисперсности не стоит пренебрегать.

Таблица 8. Изменение значений различных показателей дисперсности и расчетного коэффициента фильтрации песка средней крупности по результатам прогноза воздействия 120 циклов промерзания-оттаивания

Показатели	Исходный гранулометрический состав	Прогнозируемый гранулометрический состав
d10, мм	0,21	0,1
d50, мм	0,43	0,41
Cu= (d60/d10)	2,25 однородный	4,7 неоднородный
Коф= (d90/d10)	5,77 плохо отсортированный	12,01 неотсортированный
Π= d50(d90/d10)	2,46	4,89
Кф (по Хазену)	7,04	1,6
Кф (по Слихтеру)	6,92	1,57

Примечание: коэффициенты фильтрации рассчитывались по формуле Хазена [\[27\]](#) и Слихтера [\[23\]](#), для пористости грунта 35% при температуре воды 10°C.

Для большей достоверности результатов применения такого подхода необходима база данных коэффициентов криогенного измельчения, в которой будет учитываться влияние целого спектра факторов, таких как температурный режим, различная влажность грунтов, их минеральный состав (вплоть до разных модификаций для самых распространенных минералов, к примеру, кварца), плотность, величину физико-химической активности (отражает наличие поверхностных пленок). Также отдельным вопросом стоит исследование закономерностей изменения гранулометрического состава полидисперсных и полиминеральных песков.

Выводы

1 . В условиях проведенного эксперимента циклическое промерзание-оттаивание приводит к изменению гранулометрического состава модельных песчаных грунтов, общему увеличению дисперсности за счет дробления части зерен. В зависимости от минерального состава отмечается уменьшение интенсивности криогенного дробления в ряду: карбонатный песок, полевошпатовый песок, кварцевый песок (без пленок на зернах), что объясняется наибольшей устойчивостью кварца в зоне гипергенеза по сравнению с другими минералами.

2 . На устойчивость зерен кварца к криогенному выветриванию значительное влияние оказывают поверхностные пленки. Интенсивность дробления зерен в условиях эксперимента возросла вследствие повышения физико-химической активности поверхности зерен за счет вещества пленок.

3 . Для понимания характера изменения дисперсности в результате циклического промерзания-оттаивания использование широко известных показателей неоднородности

песков, среднего диаметра частиц оказалось мало информативным. В большей части случаев пески становятся более неоднородными за счет дробления зерен, но может наблюдаться и обратное в зависимости от исходного гранулометрического состава.

4 . Предложен новый показатель для описания трансформации дисперсности грунтов в результате циклического промерзания-оттаивания – коэффициент криогенного измельчения, отражающий прирост содержания продуктов разрушения частиц грунта за единичный цикл промерзания-оттаивания.

5 . Полученные более высокие значения коэффициента криогенного измельчения подтверждают ранее опубликованные выводы о том, что понижение температуры промораживания (при значениях -10°C , -20°C) в среднем приводит к более высокой интенсивности дробления частиц грунта.

6. Использование коэффициента криогенного измельчения позволяет провести прогноз изменения гранулометрического состава песчаного грунта под действием циклического промерзания-оттаивания за определенный срок эксплуатации земляного сооружения.

7. Изменением дисперсности песков в результате циклического промерзания-оттаивания не стоит пренебрегать, так как вследствие дробления песчаных зерен образуется более тонкий песчаный и крупнопылеватый материал, что в свою очередь, существенно меняет свойства грунтов.

Библиография

1. Трофимов В. Т. Зональность инженерно-геологических условий континентов Земли. М.: Изд-во МГУ, 2002. 348 с.
2. Teltayev Bagdat & Suppes E. A. Temperature in pavement and subgrade and its effect on moisture // Case Studies in Thermal Engineering. 2019. Vol. 13. P. 1-11.
3. Конищев В. Н. Формирование состава дисперсных пород в криолитосфере. Новосибирск: Изд-во Наука, 1981. 197 с.
4. Основы Геокриологии. Ч. 1: Физико-химические основы геокриологии // Под ред. Ершова Э. Д. М.: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.
5. Zhang Ze, MA Wei, Feng Wenjie, Xiao Donghui, Hou Xin. Reconstruction of soil particle composition during freeze-thaw cycling: A review // Pedosphere. 2016. Vol. 26. № 2. P. 167–179.
6. Рогов В.В. Особенности морфологии частиц скелета криогенного элювия // Криосфера Земли. 2000. Т. IV. № 3. С. 67–73.
7. Геокриология. Характеристики и использование вечной мерзлоты. В 2-х т. Т. I / под ред. Брушкова А. В.; пер. Сантаевой В. А. и Брушкова А. В. Москва, Берлин: Директ-Медиа, 2020. 437 с.
8. Минервин А. В. Моделирование условий формирования крупнопылеватых частиц лессовых пород // Инженерная геология. 1980. № 1. С. 51–60.
9. Konishchev V. N., Rogov V. V. Investigation of cryogenic weathering in Europe and northern asia // Permafrost and Periglacial Processes. 1993. Vol. 4. P. 49–64.
10. Лыков А.В. Теория сушки. Москва: изд-во «Энергия», 1968. 426 с. с илл.
11. Грунтоведение // Под ред. Трофимова В. Т. – 6-е изд., перераб. и дополн. (серия Классический университетский учебник) / В. Т. Трофимов, В. А. Королёв, Е. А. Вознесенский и др. М.: Изд-во МГУ и Наука, 2005. 1024 с.
12. Старостин Е. Г., Лебедев М. П. Свойства связанной воды в дисперсных породах. Часть I. Вязкость, диэлектрическая проницаемость, плотность, теплоемкость, поверхностное натяжение // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 3. С. 46–54.
13. Winkler E. M. Frost damage to stone and concrete: Geological considerations //

- Engineering Geology. 1968. Vol. 2. № 5. P. 315–323.
14. Connell D. C., Tombs J. M. C. The crystallization pressure of ice – a simple experiment // Journal of Glaciology. 1971. Vol. 10. № 59. P. 312–315.
15. Гречищев С.Е., Брушков А.В., Павлов А.В., Гречищева О.В. Экспериментальное изучение криогенного давления в промерзающих влагонасыщенных засоленных грунтах // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 1. С. 33–36.
16. Гречищева Э. С., Гречищев С. Е., Павлов А. В. Экспериментальное изучение влияния влагонасыщения на криогенное давление в засоленных грунтах // Десятая Международная конференция по мерзлотоведению (TICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Том 5. Расширенные тезисы на русском языке. Тюмень: Изд-во «Печатник», 2012. С. 81–82.
17. Минервин А. В. Генезис и инженерно-геологическая характеристика покровных отложений долины р. Оби / Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1959. 22 с.
18. Чжан Цзе, Пендин В. В. Преобразование моренных суглинков при многократном промерзании-оттаивании // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2010. № 2. С 58–63.
19. Манухин И. В., Николаева С. К., Махлаев В. Д., Чернов М. С., Лобастов В. М. Влияние гипергенных процессов на изменение состава, строения и свойств моренных суглинков донского оледенения // Инженерная геология. 2023. Т. 18. № 3. С. 6–21. URL: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2023-18-3-6-21>.
20. Балыкова С. Д., Самарин Е. Н., Петрова А. К. Влияние поверхностных пленок на физические и физико-механические свойства песчаных грунтов // Ломоносовские чтения 2024. Секция геологии. Подсекция инженерной и экологической геологии. Москва, 2024. С. 15–18.
21. Шмелев Д.Г. Роль криогенеза в формировании состава позднечетвертичных мерзлых отложений оазисов Антарктиды и северо-востока Якутии // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 1. С. 41–57.
22. Teltayev Bagdat. Temperature and moisture monitoring in pavement and subgrade in Kazakhstan // Smart Geotechnics for Smart Societies – 2023 – pp. 92–101.
23. Песчаные грунты России: в 2 томах. Том 1 / Трофимов В. Т. и др. / Под ред. Трофимова В. Т. М.: Изд-во Московского ун-та, 2021. 394 с.
24. Микростроение мерзлых пород / Под ред. Ершова Э.Д. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 183 с.: ил.
25. Конищев В. Н. Криолитогенный метод оценки палеотемпературных условий формирования ледового комплекса и субаэральных перигляциальных отложений // Криосфера Земли. 1997. Т. 1. № 2. С. 23–28.
26. Конищев В. Н. Лессовые породы: новые возможности изучения их генезиса // Инженерная геология. 2015. № 5. С. 22–37.
27. Рекомендации по комплексному изучению и оценке строительных свойств песчаных грунтов / Под. ред. Зиангирова Р. С. М.: Изд-во Стройиздат, 1984. 212 с.
28. Ларионова Н. А. Поверхностные пленки на песчаных зернах, их состав и условия образования // Инженерная геология. 2021. Т. 16. № 4. С. 6–17. URL: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-4-6-17>.
29. Айлер Р. Химия кремнезема: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. Ч. 1. 416 с.
30. Горшунова В. П., Хаустова М. М. Исследование сорбции аммиака силикагелями разной пористости // Вестник ВГТУ. 2010. Том 6, № 11, 19-21.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не

раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предметом исследования в данной работе является изучение процессов, влияющих на дисперсность модельных песков при циклическом промерзании и оттаивании. В связи с этим, объектом исследования стали образцы мономинеральных песчаных грунтов, подверженные циклическому (многократному) промерзанию-оттаиванию.

Методология исследования заключается в моделировании естественных условий промерзания песчаных грунтов. В условно закрытой системе образцы грунтов синхронно промораживались при температурах -20°C и -10°C, далее происходило их оттаивание. До и после проведения промораживания проводилось определение гранулометрического состава песчаных образцов ситовым методом (ГОСТ 12536 – 2014), названия грунтов даны по ГОСТ 25100-2020. По полученным результатам рассчитаны: коэффициент неоднородности по А. Хазену, коэффициент сортированности по П.И. Фадееву; коэффициент отсортированности по П.Д. Траску; коэффициент неоднородности по В.Д. Мелентьеву; параметр максимальной неоднородности (по И.В. Дудлеру). Морфология частиц отдельных фракций изучалась при помощи оптического цифрового микроскопа Levenhuk DTX 500.

Актуальность. Автор статьи отмечает, что в связи с освоением арктических территорий все чаще встает вопрос о возведении сооружений, в том числе линейных, на насыпных грунтах, которые представлены дисперсными несвязанными грунтами – песками. Поэтому актуальность исследований заключается в необходимости изучения процессов циклического промерзания и оттаивания грунтов в криолитозоне. В природных условиях регулярное промерзание и оттаивание оказывает на грунты очень сложное и многостороннее влияние, которое может привести к изменению их строения, состояния и свойств. В песчаных грунтах воздействие циклического промерзания-оттаивания чаще всего сводится к дроблению частиц песчаной и более крупных размерностей и изменению пористости в результате формирования криогенных текстур.

Научная новизна заключается в применении метода циклического промерзания-оттаивания мономинеральных монофракционных песков. Впервые автором предлагается учитывать коэффициент криогенного измельчения ККИ, который показывает количество (%) формируемых обломков за 1 цикл промерзания-оттаивания.

В рецензируемой статье приведены результаты глубокого исследования процессов дисперсности песков при циклическом промерзании и оттаивании, что, несомненно, является достоинством данной работы. Стиль статьи – научный, соответствует установленным требованиям журнала. Структура статьи включает в себя введение, результаты и обсуждение, заключение, библиографию. Содержание научной статьи полностью раскрывает ее тему, выводы доказательны и обоснованы. Текст написан грамотно, соответствует объему согласно требованиям журнала.

Библиография статьи обширна, включает в себя 30 литературных источников, в том числе 5 – на иностранном языке. В тексте имеются ссылки на используемые литературные источники.

Однако автору следует обратить внимание на оформление библиографического списка, привести его в соответствие с требованиями журнала.

Выводы в статье достаточной степени аргументированы, обоснованы, исчерпывающи. Автором установлено, что циклическое промерзание-оттаивание приводит к изменению гранулометрического состава модельных песчаных грунтов, общему увеличению дисперсности за счет дробления части зерен. На устойчивость зерен кварца к криогенному выветриванию значительное влияние оказывают поверхностные пленки.

По мнению рецензента, количество выводов в статье можно было уменьшить и сделать их более лаконичными.

Рецензируемая работа бесспорно имеет практическую значимость. Имеет место практическое применение ККИ для оценки изменения гранулометрического состава песчаных грунтов в результате определенного количества циклов промерзания оттаивания. Зная среднегодовое количество переходов температуры грунтов через 0°C и предполагаемый срок службы грунтового основания или земляного полотна, можно получить количественное содержание новообразованных обломков частиц в грунте за этот период.

Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на использованные литературные источники и выражении авторского мнения по изучаемой проблеме.

Рецензируемая статья несомненно будет интересна и полезна грунтоведам-практикам, студентам и аспирантам, обучающимся по направлению 1.6.7. «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение».

Рекомендуется к публикации в журнале «Арктика и Антарктика».