

УДК 551.328

## ДЕЗИНТЕГРАЦИЯ МЕРЗЛЫХ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ВОДНОЙ СРЕДЫ

**Рукович А.В., Рочев В.Ф.**

*Технический институт (филиал) СВФУ, Нерюнгри, e-mail: raul1975@mail.ru*

В Южной Якутии в настоящее время разрабатываются месторождения полезных ископаемых со сложными горно-геологическими условиями, к которым относятся глубокозалегающие россыпи, находящиеся в зоне вечной мерзлоты. Особенностью этих месторождений является наличие труднопромывистых глинистых песков с большим содержанием мелкого, пылеватого и тонкодисперсного золота. Интенсификация открытого способа разработки россыпных месторождений в районах распространения многолетнемерзлых отложений с целью уменьшения потерь ценного компонента в отходах, увеличения выхода концентрата в процессе обогащения может быть обеспечена только при наличии достоверной теории. На основании данной теории существует необходимость рассмотрения поведения глинистых пород в химической среде. Исследования показали, что в некоторых случаях, применение водных растворов солей приводит к увеличению интенсивности дезинтеграции мерзлого глинистого грунта на 20% по сравнению с использованием идеальной чистой водной среды. Данный раствор предложено использовать для предварительной обработки отвалов мерзлых глинистых пород способом орошения при открытом раздельном способе разработки.

**Ключевые слова:** Южная Якутия, мерзлые породы, дезинтеграция, льдистость, исследования, глинистые породы, разрушение, теория

## DISINTEGRATION OF FROZEN CLAY ROCKS UNDER THE INFLUENCE OF CHEMICAL FIELDS AND THE AQUATIC ENVIRONMENT

**Rukovich A.V., Rochev V.F.**

*Technical institute (branch) of NIFU, Neryungri, e-mail: raul1975@mail.ru*

In South Yakutia are currently being developed by the mineral deposits with complex mining and geological conditions, which include deep placer located in the permafrost zone. A feature of these deposits is the presence of труднообрабатываемых clayey Sands with a high content of fine silty and fine gold. The intensification of the open method of placer developments in the areas of distribution of permafrost sediments to reduce losses of valuable component in the waste, increasing the yield of the concentrate in the beneficiation process can be ensured only if there is a credible theory. Based on this theory, there is a need to consider the behaviour of pelitic rocks in the chemical environment. Studies have shown that in some cases, the use of aqueous solutions of salts leads to an increase in the intensity of the disintegration of the frozen clay soil on 20% in comparison with the use of perfectly clean water environment. This solution is proposed to use for pre-treatment of the dumps frozen clay rocks by means of irrigation with open separate method of development.

**Keywords:** Southern Yakutia, permafrost, disintegration, ice content, research, shale, fracture, theory

В южных районах Республики Саха на данный момент существуют месторождения с непростыми горно-геологическими характеристиками, в частности россыпи, залегающие на большой глубине и находящиеся в криолитозоне. Данные месторождения состоят из глинистых песков и в большом объеме содержат тонкодисперсное золото. Поэтому изучение разрушения мерзлых суглинков с целью полного извлечения полезного компонента становится одной из важнейших задач.

Кроме того, разработка теоретического фундамента усиления процесса дезинтеграции мерзлых глинистых песков на основе применения явления, объясняющего процесс денудации этих грунтов в водной среде, является актуальной. Ответ на эту проблему позволит улучшить гидравлический способ разработки мерзлых осадочных пород, увеличить извлечение полезного компонента при обогащении.

При нивации на денудацию многолетнемерзлых суглинках и супесях в водной среде нами учитывались результаты исследования по изменению естественного электрического поля, подтверждающие наличие с процессом теплоотдачи от воды мерзлой горной породе процессов водной фильтрации в поверхностный слой образца суглинка и эффекта электроосмоса.

Исходя из вышесказанного, предполагаем, что скорость денудации многолетнемерзлых суглинков при контакте с соляным раствором должна увеличиваться в сравнении с дистиллированной водой за счет процесса электроосмоса. Для этого нужно обеспечить соответствующий знак ионов в водном растворе. Движение жидкости внутрь образца суглинка в этом случае будет происходить за счет подвижности ионов под действием градиента электрического потенциала естественного электрического поля.

В нашем случае нарушение целостности образцов мерзлых суглинков и супесей в растворах солей происходит, в первую очередь, за счет действия двух механизмов: фильтрации и электроосмотического течения.

Фильтрация водного раствора солей в образец происходит за счет градиента давления на концах пор и трещин. Это происходит при совместном действии капиллярных сил, которые зависят от величины энергии поверхностного натяжения жидкости и радиуса пор, и вакуумного эффекта, связанного с фазовым уменьшением объема при таянии льда. Это усиливает подток раствора солей в образовавшиеся пустоты.

При замораживании суглинков и супесей между центральной областью образца и его поверхностью образуется разность потенциалов. В результате под действием естественного электрического поля возникает движение ионов солей, что объясняется присутствием электроосмотического течения.

В качестве воздействующего фактора для экспериментальных исследований нами были выбраны водные растворы солей хлорида натрия (NaCl) и хлорида цинка ( $ZnCl_2$ ). Полярность ионов данных солей возле поверхности минеральных частиц в двойном электрическом слое соответствует полярности естественного электрического поля в образце мерзлых суглинков и супесей. Кроме того, использование данных солей может позволить оценить влияние радиуса ионов на скорость процесса электроосмоса.

Электроосмотическое перемещение жидкости в грунтах определяется неравномерным распределением ионов в сечении пор. Силы, вызывающие движение воды, действуют только в рыхлосвязанном слое [6, 7]. Поэтому остальная объемная часть воды в порах движется как одно целое, потому что за пределами этого слоя сил нет. В образце источником движения будет служить поверхность частиц. В процессе фильтрации поверхность частиц, наоборот, препятствует скольжению жидкости и тормозит ее движение. Движение же свободной воды происходит по слою связанной воды [4].

К уменьшению толщины гидратных оболочек вокруг минеральных частиц как раз приводит применение вместо воды раствора электролита. При этом уменьшается и толщина слоя рыхлосвязанной воды в порах. В свою очередь будет увеличиваться коэффициент фильтрации, так как ионы электролита более эффективно нейтрализуют заряд поверхности минеральных частиц

по сравнению с молекулами воды. В результате происходит увеличение эффективного сечения пор [2, 3, 5].

При экспериментальных исследованиях с применением водного раствора хлорида цинка сила разрушения образцов фактически оставалась постоянной при различных концентрациях соли.

Объясняется это тем, что ион  $Zn^{2+}$  имеет больший радиус, чем ионы  $H^+$  и  $Na^+$ . В результате их замещения происходит увеличение толщины прочносвязанной части двойного электрического слоя и одновременно уменьшение толщины рыхлосвязанной части. Большая валентность иона  $Zn^{2+}$  по сравнению с ионом  $Na^+$  приводит к тому, что в случае раствора  $ZnCl_2$  рыхлосвязанный слой будет сохраняться даже при высокой концентрации соли.

Процесс разрушения мерзлых песчано-глинистых образцов в водном растворе  $ZnCl_2$ , сопровождающийся изменением объема образца, также обусловлен строением и энергетикой кристаллической решетки. Во льду атомы водорода непрерывно перемещаются в пространстве между каждой парой атомов кислорода. Данное смещение происходит в результате вращения молекул и флуктуаций колебаний. Для совершения атомом водорода скачка из одного положения в другое ему необходимо преодолеть упругое силовое поле узла кристаллической решетки. Скачок атомов водорода и изменение молекул отражаются на поляризации локального участка. Разрушение мерзлой породы происходит интенсивнее на локальных участках и распространяется в направлении минимальных сил связей и максимальных напряжений. Водный раствор  $ZnCl_2$  не может увеличить разрыв всех этих связей и нарушить структуру образца в сравнении с поверхностными водами. При малых концентрациях  $ZnCl_2$  происходит замещение молекул воды ионами. Увеличение концентрации приводит к упорядоченности гидратов (рис. 1).

Обменные процессы в данном случае обусловлены переходом катионов в породу.

Важнейшей характеристикой, определяющей активность электролита  $ZnCl_2$  в водной среде, является ионная сила:

$$I = \frac{1}{2} \sum m_i z_i^2, \quad (1)$$

где  $I$  – ионная сила;  
 $m_i$  – концентрация каждого иона;  
 $z_i$  – валентность.

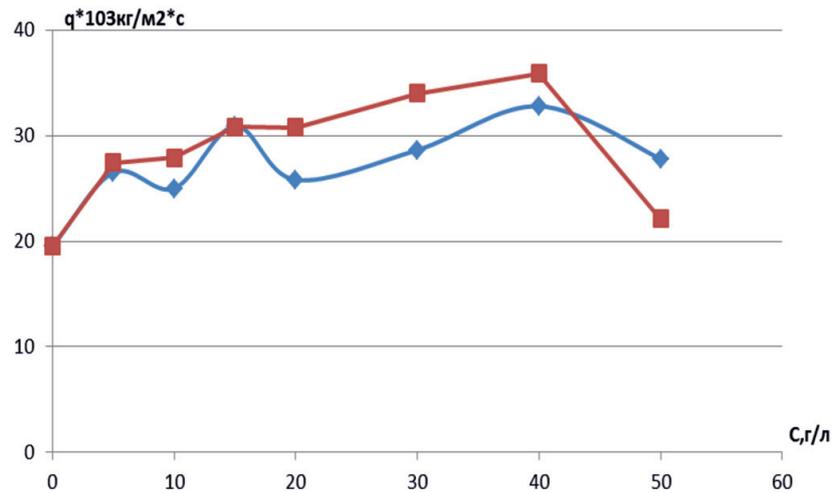


Рис. 1. Зависимость силы дезинтеграции мерзлых суглинков при различных концентрациях хлорида цинка в водном растворе

Ионная сила зависит от концентрации ионов и их валентности, а поведение электролита и активность раствора определяет физико-химическую природу раствора.

Также существует эффект адсорбционно-ослабления мерзлого образца, с проникновением водного раствора  $ZnCl_2$  в глубь образца в микротрещины по плоскостям скольжения. Влияние сил сцепления ведет к «залечиванию» зоны разрушения за счет выжимания адсорбционных пленок. Использование водного раствора хлорида цинка, также как дистиллированной воды, не увеличивается при дезинтеграции мерзлых суглинков. Это объясняется сохранением рыхлосвязанного слоя в двойном электрическом слое.

Поэтому неявно выраженное увеличение силы разрушения мерзлых суглинков и супесей в водных растворах  $ZnCl_2$  и наоборот увеличение дезинтеграции при применении водных растворов  $NaCl$  можно объяснить воздействием обменных катионов.

Если диффузный слой ионов оказывается подавленным и катионы и анионы равномерно распределены по сечению пор, то электроосмотическое движение воды в глинистых горных породах, поровый раствор которого представлен раствором электролита  $NaCl$  с концентрациями более 50 г/л, не происходит.

Увеличение коэффициента фильтрации при фильтрации водных растворов солей в суглинки и супеси в сравнении с обыкновенной водой отмечалось некоторыми учеными, что и было принято

нашим вниманием [2]. Исходя из этого, можно предположить, что сила дезинтеграции мерзлых суглинистых и супесчаных пород в водных растворах солей должна увеличиваться по сравнению с таковой в дистиллированной воде.

Скорость проникновения в образец растворов солей будет влиять на силу дезинтеграции мерзлых суглинистых и супесчаных пород, которая складывается из скорости фильтрации ( $V_\phi$ ) и скорости электроосмотического течения ( $V_3$ ):

$$V_o = V_\phi + V_3. \quad (2)$$

Закон Дарси подчиняет себе фильтрацию в полностью водонасыщенных грунтах при ламинарном режиме движения:

$$V_o = K_\phi * grad(p), \quad (3)$$

где  $V_\phi$  – скорость фильтрации;  $K_\phi$  – коэффициент фильтрации;  $grad(p)$  – градиент давления на пути фильтрации  $L$ .

С помощью возникающего на границе раздела «твердое тело – жидкость двойного электрического слоя» объясняется механизм электроосмотического движения жидкости. Согласно теории д.э.с. электроосмотическое течение под действием приложенного электрического поля описывается выражением:

$$V_3 = K_3 * grad(\varphi) = \zeta * \epsilon * \Delta U / 4\pi * \eta * \Delta L, \quad (4)$$

где  $V_3$  – скорость электроосмотического течения;  $K_3$  – коэффициент электроосмо-

са;  $\text{grad}(\varphi)$  – градиент электрического потенциала;  $\Delta U$  – электрическое напряжение;  $\Delta L$  – расстояние между точками;  $\eta$  – вязкость раствора;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость раствора;  $\zeta$  – электрокинетический потенциал.

Электрокинетические свойства грунта, геометрия порового пространства и свойства порового раствора описываются с помощью коэффициента электроосмоса ( $K_3$ ). Значение  $K_3$  для широкого диапазона грунтов от глин до среднезернистых песков изменяется в узких пределах (от  $1 \cdot 10^{-5}$  до  $8 \cdot 10^{-5}$   $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ), тогда как  $K_\phi$  при этом изменяется в миллионы раз.

В ходе экспериментальных исследований были получены зависимости силы дезинтеграции мерзлых суглинков при различных концентрациях хлорида натрия в водном растворе при температурах образцов  $-17^\circ\text{C}$  и  $-3^\circ\text{C}$  и постоянной температуре растворов во всех экспериментах  $+10^\circ\text{C}$ .

Скорость дезинтеграции образцов в растворах NaCl в зависимости от концентрации возрастает, имеет максимум при концентрации соли 30–40 г/л и затем убывает (рис. 2).

Скорость движения воды при фильтрации в глинах значительно меньше, чем при электроосмосе [1, 8].

Как показали экспериментальные исследования, состав обменных катионов в минералах и катионный состав взаимодействующего с ними раствора электролита оказывают большое влияние на физико-химические обменные процессы в грунтах. Кроме того, необходимо отметить, что более мелкие ионы удерживаются менее прочно по сравнению с более крупными, т.е. энергия поглощения катионов возрастает в соответствии с их валентностью, и среди обменных катионов одной валентности энергия поглощения возрастает вместе с увеличением их радиуса. Но существует и исключение, которое составляют ион  $\text{K}^+$  и ион  $\text{H}^+$ , энергия обмена которых выше энергии обмена других ионов.

Уменьшение  $\zeta$ -потенциала происходит с ростом концентрации электролита и при концентрации электролита 0,5–1 н электрокинетический потенциал становится равным нулю.

Величина  $\zeta$ -потенциала определяется толщиной рыхлосвязанного слоя воды где электрокинетический потенциал представляет разность потенциалов между прочносвязанным и рыхлосвязанным слоями воды около поверхности твердого тела. Уменьшению  $\zeta$ -потенциала способствуют повышение концентрации электролита в растворе, а также повышение температуры.

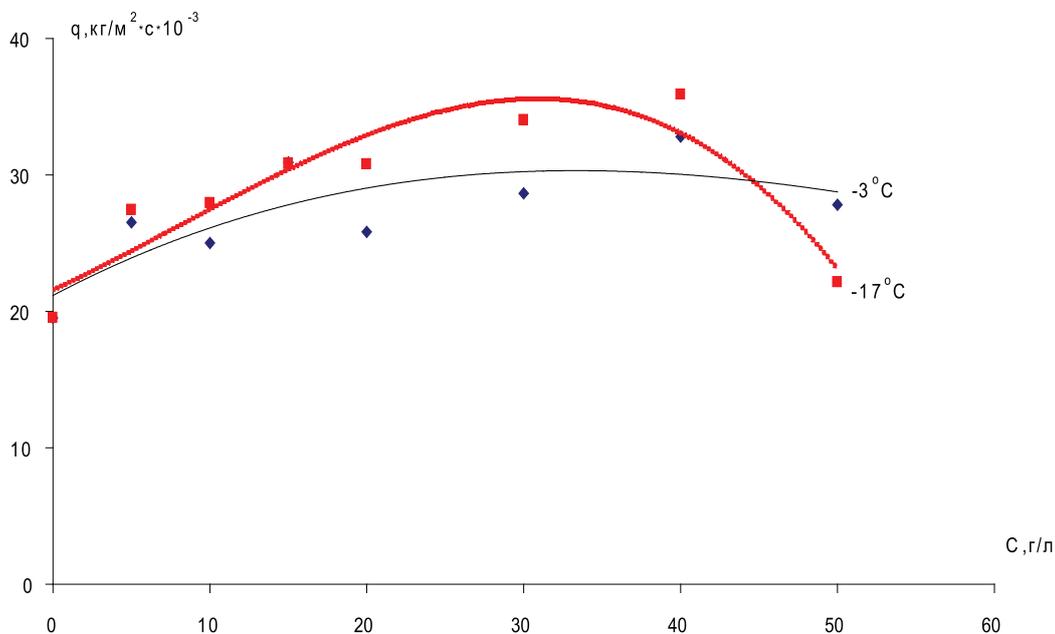


Рис. 2. Зависимость силы дезинтеграции мерзлых суглинков при различных концентрациях хлорида натрия в водном растворе

Радиус ионов, составляющих слой, приблизительно равен толщине прочносвязанной части двойного электрического слоя. При этом заряд и концентрация ионов, входящих в рыхлосвязанную часть двойного слоя, определяется толщиной рыхлосвязанного слоя при данной температуре. Толщина же рыхлосвязанной части двойного слоя достигает в разбавленных растворах нескольких тысяч ангстрем, а в концентрированных растворах уменьшается до десятков и единиц ангстрем.

В условиях максимального развития рыхлосвязанного слоя наблюдается наибольшая величина  $\zeta$ -потенциала, что можно увидеть лишь при некоторой оптимальной концентрации электролита в очень разбавленных растворах. Например отрицательный  $\zeta$ -потенциал бывает у глинистых минералов, в частности каолин, который может достигать – 40 мВ.

В результате экспериментальных исследований можно констатировать факт, что коэффициент фильтрации у воды будет меньше, чем у водного раствора хлорида натрия, и разница будет зависеть от содержания в породе глинистой фракции.

Поэтому влияние водных растворов хлорида натрия с большими концентрациями приведет к увеличению интенсивности разрушения мерзлых песчано-глинистых

пород на 20% по сравнению с использованием дистиллированной воды.

### Список литературы

1. Гидрогеология / Под ред. В.М. Шестакова и М.С. Орлова. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 317 с.
2. Коновалов А.А. К теории прочности мерзлого грунта / Научный журнал «Криосфера Земли». – 2009 – Т. XIII, № 1. – С. 31–39.
3. Машенко А.В. Специальные разделы механики грунтов и механики скальных грунтов: учеб. пособие / А.В. Машенко, А.Б. Пономарев, Е.Н. Сычкина. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 176 с.
4. Методические рекомендации по применению опытной технологии гидравлической разработки высокоглинистых мерзлых песков россыпных месторождений / Е.Д. Саввин, А.Е. Слепцов, Г.Л. Полхов и др. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. – 29 с.
5. Пространственные особенности и новые тенденции в изменениях термического состояния почвогрунтов и глубины их сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты / Шерстюков // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 2. – С. 5–12.
6. Рочев В.Ф. Оценка влияния внешнего электрического поля на процесс разрушения мерзлых дисперсных пород в водной среде // Потенциал современной науки. – 2015. – № 7. – С. 34–37. [http://nf-innovate.com/index\\_sub8.html?id=119](http://nf-innovate.com/index_sub8.html?id=119).
7. Рочев В.Ф. Оценка изменения естественного электрического поля в процессе разрушения мерзлых глинистых пород в водной среде // Потенциал современной науки. – 2015. – № 8. – С. 34–37.
8. Шергин Д.В. Исследование и разработка технологии создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах: автореферат дис. ... канд. тех. наук: 25.00.15 / Шергин Денис Владимирович; [Место защиты: Ин-т машиноведения им. А.А. Благоврава РАН]. – М., 2014. – 28 с.