

РОЧЕВ В.Ф. (Технический институт (филиал) Северо-Восточного Федерального университета имени М.К. Аммосова, г. Нюрнгри)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОТЕНЦИАЛОВ СОБСТВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ МЕРЗЛЫХ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ПОРОД В ВОДНОЙ СРЕДЕ

С целью изучения механизма разрушения мерзлых песчано-глинистых пород исследовались естественные электрические поля (ЕП), которые возникают в замораживаемых влажных горных породах, что определяется наличием разности потенциалов на границе мерзлой и талой породы. В результате проведенных экспериментов установлено, что разрушение образцов мерзлых песчано-глинистых пород в водной среде сопровождается возникновением и изменением в образце естественных электрических полей. По нашему мнению, возникновение электрического поля связано с фильтрационными потенциалами, возникающими в результате проникновения воды по порам и трещинам в образец горной породы. Измерение потенциалов собственной поляризации выполнялось способом градиента потенциала и потенциалов с использованием двух электродов, вмороженных в образец. В результате было доказано, что метод измерения разности электрических потенциалов собственной поляризации между двумя точками образца горной породы обладает тем достоинством, что косвенно не только характеризует изменение температуры в образце, но дополнительно дает информацию об электрокинетике процесса, динамике изменения электрического сопротивления горной породы между электродами и поляриности разных объемов образца горной породы. Кроме того, этот метод позволяет исследовать динамику процесса оттаивания мерзлой горной породы, а также подтверждает фильтрационное разрушение мерзлых горных пород в водной среде.

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

Эксперимент, о котором говорится в данной статье, мы проводили, надеясь добиться большей ясности в вопросе механизма разрушения мерзлых песчано-глинистых пород в водной среде. О механизме процесса разрушения мерзлых песчано-глинистых пород высказывается множество различных гипотез.

Авторы работ [1, 2, 7–12] рассмотрели несколько идей, пытаясь найти объяснение механизма процесса разрушения поверхности песчано-глинистых мерзлых пород в водной среде:

1. Возникновение термонапряжений в горной породе из-за градиента температуры на поверхности образца. Однако тогда интенсивность разрушения должна быть тем больше, чем больше разность температур между водой как теплоносителем и мерзлым образцом. Этого не наблюдается в экспериментах, описанных в работе [3].

2. Гидратация, связанная с проникновением воды внутрь образца по слоям не замерзшей физически связанной воды на границе между льдом и поверхностью мине-

ральных частиц, что способствует росту гидратных оболочек и приводит к уменьшению связей между частицами. Эта гипотеза вступает в противоречие с фактом неподвижности физически прочносвязанной воды, адсорбированной поверхностью минеральных частиц [3].

3. Термонапряжения, причиной которых являются аномальные свойства мерзлых глинистых пород. Так, Е.П. Шушерина, В.Н. Зайцев [4] установили, что при нагревании глинистых горных пород коэффициент линейного расширения при температуре $0 < T < -4$ °С делается отрицательным.

Авторы [1] высказали гипотезу, что аномальная зависимость коэффициента линейного расширения мерзлых глинистых пород от температуры будет приводить к образованию трещин в мерзлом образце, поверхность которого контактирует с водой. Это будет сопровождаться проникновением в трещины воды с большой скоростью с возникновением кавитации, так как при образовании трещины в ней образуется вакуум. В результате будут разрушаться стенки трещины с отделением от поверхности частиц



материала. Но в случае исследования песчано-глинистых пород с низким содержанием глинистой фракции аномалии коэффициента линейного расширения слабо выражены и, таким образом, решающего влияния на процесс разрушения поверхности образца не оказывают.

В работе [3] приводятся данные в пользу гипотезы «фильтрационного» разрушения мерзлых песчано-глинистых горных пород при их контакте с водой, связанного с фильтрацией воды в поверхностный слой горной породы по трещинам и порам. Проникновение воды в горную породу обусловлено действием как капиллярных сил, возникающих при контакте воды с гидрофильной поверхностью стенок микротрещин, так и с действием вакуумного эффекта, возникающего при уменьшении объема льда при таянии в поровом пространстве горной породы.

Нами был использован метод измерения электрических потенциалов естественного электрического поля (ЕЭП), образующегося при замораживании влажных песчано-глинистых пород с целью конкретизации гипотезы разрушения мерзлых горных пород в водной среде.

Метод измерения разности потенциалов естественного электрического поля основан на перераспределении электрических зарядов в объеме образца горной породы при протекании адсорбционных, электрокинетических, межфазных и фильтрационных процессов.

Методика экспериментов состояла в том, что образцы супеси изготавливались из смеси песка и каолиновой глины с содержанием глинистой фракции 2,06 %. Добавлением в смесь воды получали образцы влажностью 30 %, которые затем прессовались в кубическую форму с размером ребра 70 мм и замораживались до температуры $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, так как при данной температуре замерзает вся свободная и рыхлосвязанная вода в поровом пространстве образца. Влажность $W = 30\%$ соответствовала верхнему пределу пластичности, когда все поры в образце заполнены водой.

Измерение потенциалов собственной поляризации выполнялось способом гради-

ента потенциала и потенциалов с использованием двух электродов, вмороженных в образец [5]. Электроды, между которыми измерялась разность потенциалов, располагались в образце по следующей схеме: один электрод помещался в центре образца, а второй электрод, принимаемый за «нулевой» и относительно которого измерялась разность потенциалов, размещался на расстоянии 10 мм от поверхности. Таким образом, расстояние между электродами составляло 25 мм (рис. 1, 2).

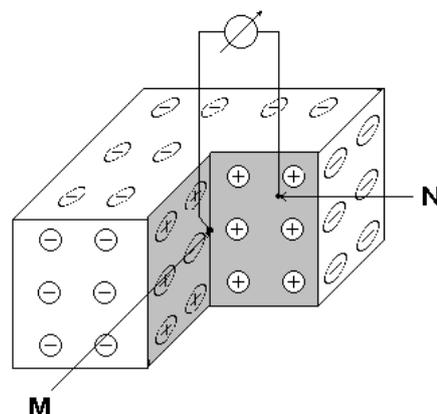


Рис. 1. Схема измерения естественного электрического поля способом градиента потенциала

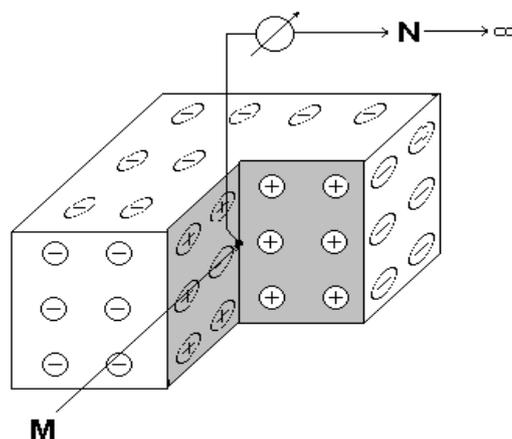


Рис. 2. Схема измерения естественного электрического поля способом потенциала

Разность потенциалов ΔU_{MN} измерялась между электродами M и N путем непрерывной регистрации в течение всего эксперимента до момента обнажения электрода,



расположенного ближе к поверхности, в результате разрушения граней образца. Регистрация проводилась аналоговым четырехканальным регистрирующим блоком на бумажную ленту.

В результате проведенных экспериментов установлено, что при замораживании влажной песчано-глинистой породы в ней образуется естественное электрическое поле, которое связано с возникновением межфазного потенциала между льдом и контактирующей с ним незамерзшей физически связанной с заряженной поверхностью минеральных частиц водой.

Необходимо отметить, что разрушения граней образца на воздухе не происходит, и образец сохраняет целостность формы.

На схеме (см. рис. 1, 2) видно, что в центре образца мерзлой супеси формируется положительный электрический потенциал по отношению к поверхности.

С целью проверки факта протонной проводимости в кристаллах льда нами был проведен опыт с измерением изменения разности потенциалов ЕЭП с момента перемещения образца льда из холодильника при температуре $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ в воду с температурой $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до момента его полного оттаивания.

В данном эксперименте замерялась межфазная разность потенциалов между электродом, расположенным в центре образца льда, и электродом, расположенным в воде возле поверхности образца. В результате было получено, что электрод, замороженный в лед, имеет положительный потенциал по отношению к электроду, находящемуся в воде. Разность потенциалов между электродами в течение опыта составила 135–150 мВ.

Этим было подтверждено, что во льду формируется положительный потенциал по отношению к окружающей его воде.

Образование на поверхности образца отрицательного электрического потенциала по отношению к центральной части образца можно объяснить следующим.

При замораживании влагонасыщенного образца на его поверхности формируется ледяная оболочка, сжимающая образец. При дальнейшем промораживании внутренних областей образца за счет образования

льда в поровом пространстве и увеличения его объема на 9 % по сравнению с объемом воды, находящейся в поровом пространстве, будет происходить растрескивание образца с образованием множества микроскопических трещин. В наружных слоях образца появится избыточная открытая поверхность минеральных частиц, которая имеет отрицательный электрический заряд. Следовательно, поверхность образца должна быть более электроотрицательной по отношению к менее растрескавшейся центральной части образца.

Изменение ЕЭП во времени $\Delta U_{MN}(t)$ с момента помещения образца мерзлой супеси в воду с температурой $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до момента разрушения поверхностного слоя образца и обнажения электрода N , расположенного возле поверхности, приведено на рис. 3 (график 1).

При помещении образца мерзлой песчано-глинистой породы в ванну с водой визуально наблюдается отделение частичек и агрегатов породы от поверхности образца и их осыпание на дно ванны.

На образец в воде действуют различные физические факторы, а именно: тепловое воздействие воды, приводящее к нагреву горной породы, и последующий фазовый переход льда в воду; увеличение удельной электропроводимости горной породы; фильтрация воды по трещинам и порам в образец из-за градиента давления, создаваемого капиллярным и вакуумным механизмами.

При анализе полученной зависимости можно сделать вывод, что метод измерения разности потенциалов ЕЭП дает возможность исследовать и уточнить процесс оттайки образца мерзлой горной породы и позволяет выявить некоторые особенности этого процесса, которые нами объясняются следующим:

1. В интервале времени $0-t_1$ происходит фильтрация воды в поверхностный слой образца горной породы по микротрещинам, которые образовались в процессе замораживания образца.

Увеличение ΔU_{MN} по сравнению с образцом, помещенным в воздушную среду, в



начальный момент времени можно объяснить фильтрацией воды в поверхностный слой образца за счет капиллярных сил, свя-

занных с энергией поверхностного натяжения воды на границе ее контакта с гидрофильной поверхностью минеральных частиц, составляющих стенки трещин [3].

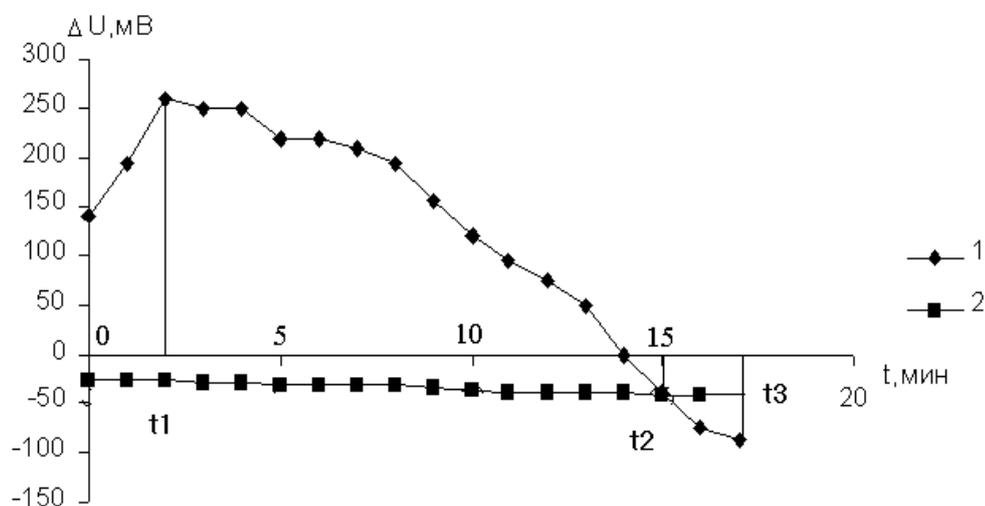


Рис. 3. Изменение разности потенциалов естественного поля в мерзлом 1 и талом 2 песчано-глинистых образцах в водной среде

Механизм возрастания потенциалов в образцах мерзлых песчано-глинистых пород при их контакте с водой можно представить следующим образом.

На поверхности контакта минеральных частиц, слагающих стенки поры, с водой формируется двойной электрический слой. Формирование поляризованно-ориентированных слоев жидкости обусловлено электростатическим полем поверхности минеральных частиц.

Внутренняя часть двойного электрического слоя, прилегающая к поверхности минералов, называется прочносвязанным (адсорбционным) слоем, а внешняя часть – рыхлосвязанным (диффузионным) слоем. Толщина прочносвязанной воды составляет 5–10 нм или в среднем 25 молекулярных слоев воды (размер молекулы воды около 0,3 нм), а рыхлосвязанной – 800–1000 нм. Таким образом, основная часть объема связанной воды приходится на рыхлосвязанную [6].

В центре образца из-за фильтрации воды в поры будет фиксироваться значи-

тельный положительный потенциал по отношению к внешнему электроду, расположенному ближе к поверхности, по сравнению с опытом, когда мерзлый образец помещался в воздушную среду.

2. В интервале времени t_1-t_2 происходит постепенный нагрев образца горной породы за счет теплоотдачи воды, что приведет к таянию льда в порах, вначале с образованием рыхлосвязанной воды, а затем свободной. Воздействие температурного фактора сказывается прежде всего на изменении условий связывания воды. Поэтому рост температуры должен существенно увеличивать активное поровое пространство песчано-глинистых пород и их проницаемость.

Таяние льда увеличивает площадь поперечного сечения токопроводящих поровых каналов, что приводит к увеличению удельной электропроводности горной породы между электродами.

Полученная нами в эксперименте зависимость электрического сопротивления горной породы между электродами от времени оттаивания мерзлой горной породы в водной среде (рис. 4) подтверждает формулу (2).



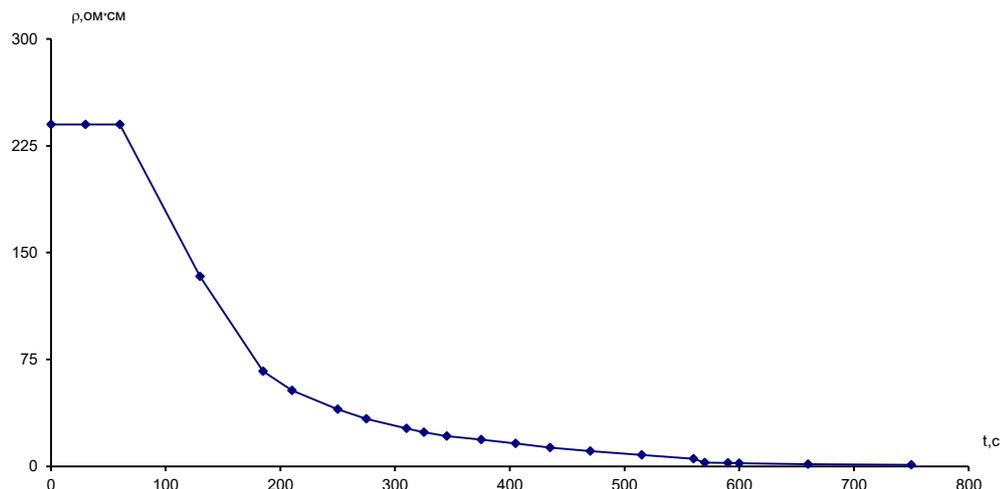


Рис. 4. Зависимость изменения удельного электрического сопротивления мерзлых песчано-глинистых пород от времени ее нахождения в водной среде

Электрическое сопротивление мерзлой горной породы в процессе оттаивания уменьшается обратно пропорционально площади сечения токопроводящих каналов, что объясняет характер полученной зависимости $\Delta U_{MN}(t)$ на рис. 2 на отрезке времени t_1-t_2 .

Момент времени t_2 , когда потенциалы электродов сравнялись, говорит о том, что горная порода между электродами протаяла настолько, что произошло перераспределение зарядов между электродами с выравниванием их потенциалов.

3. В интервале времени t_2-t_3 в центре полностью оттаявшего образца местная влажность будет меньше, чем влажность поверхностного слоя образца. Величина влажности будет определять величину свободной воды в поровом пространстве и толщину рыхлосвязанного слоя воды. При меньшей влажности толщина рыхлосвязанного слоя воды будет тоньше и, следовательно, его поляризация от отрицательно заряженной поверхности минеральных частиц будет больше, чем в местах образца с большей влажностью, т.е. на поверхности. Таким образом, в рассматриваемом интервале времени центр образца будет заряжен более отрицательно по сравнению с поверхностью образца.

4. В момент времени t_3 наблюдается разрушение граней образца и происходит обнажение электрода, расположенного ближе к поверхности, и эксперимент на этом прекращался.

На рис. 2 (график 2) приведено изменение ЕЭП во времени $\Delta U_{MN}(t)$ с момента помещения талого образца супеси в воду с температурой $+10^\circ\text{C}$ до момента полного размораживания поверхностного слоя образца и обнажения электрода, расположенного ближе к поверхности. В данном опыте образец мерзлой супеси из холодильника перемещался в воздушную среду температурой $+20^\circ\text{C}$ с целью получения оттаявшей структуры образца и затем помещался в воду.

На графике (см. рис. 2) видно, что характер зависимости $\Delta U_{MN}(t)$ совпадает с зависимостью, приведенной на графике 1, показывающей изменение разности потенциалов для мерзлого образца, помещенного в воду, на участке t_2-t_3 , когда образец полностью протаял в воде, следовательно, объяснение характера графика то же самое. Воздействуя на горную породу внешними электрическими полями, мы можем вызвать в ней различные физико-химические процессы, приводящие к интенсификации процесса разрушения мерзлой горной породы (рис. 5).



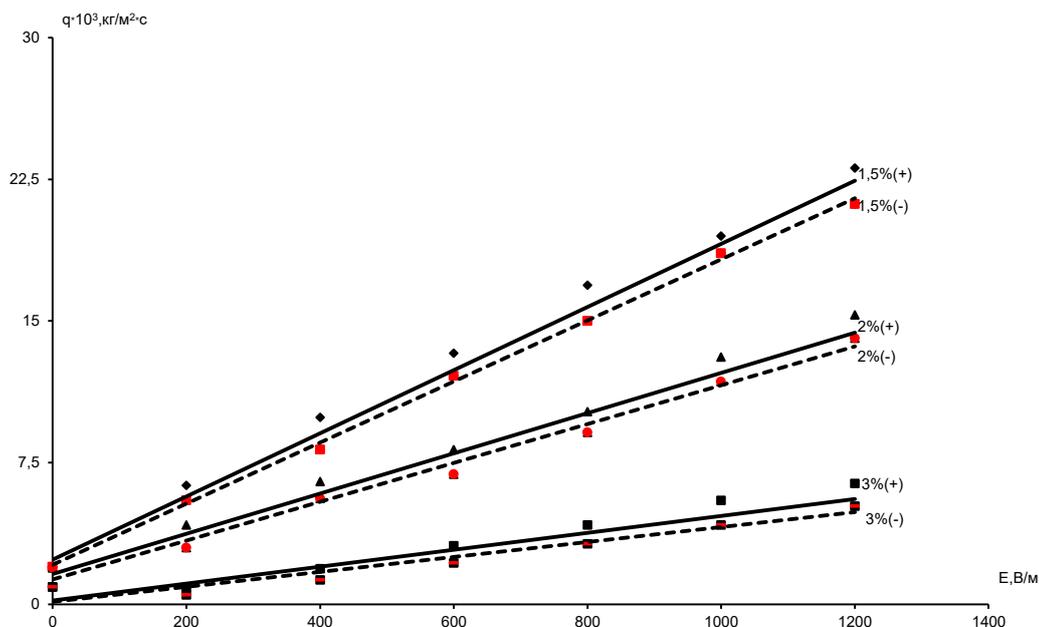


Рис. 5. Зависимость интенсивности разрушения мерзлых песчано-глинистых пород от напряженности электрического поля ($t_b = 10\text{ }^\circ\text{C}$, $t_0 = -17\text{ }^\circ\text{C}$, $i = 15\text{ }\%$).

В результате воздействия электрического тока на мерзлую песчано-глинистую породу, помещенную в водную среду, интенсивность разрушения зависит от напряженности электрического поля и процентного содержания глинистых частиц ($J_{г.п.}$) в горной породе.

Исследования показали, что чем меньше $J_{г.п.}$, тем выше скорость разрушения. Температура мерзлых песчано-глинистых пород начинает повышаться с момента включения тока, с большей интенсивностью вблизи электродов, где плотность тока максимальна. В процессе внутреннего нагрева породы в данной области появляется талик, расширение объема которого зависит от напряжения.

При одновременном воздействии на образец водной среды и электрического тока происходит следующее. С одной стороны на него действуют фильтрационные силы, скорость которых меняется во времени, а с другой происходит нагрев породы при протекании в ней электрического тока. В результате электрическая энергия переходит в тепловую. С ростом напряжения количества тепла выделяется больше, что приводит к интен-

сивному таянию льда и уменьшению удельного электрического сопротивления горной породы.

Полярность электрического тока при воздействии также влияет на интенсивность разрушения мерзлой песчано-глинистой горной породы в водной среде. При положительной полярности электрода в центре образца интенсивность разрушения больше, чем при отрицательной полярности. Это объясняется тем, что происходит наложение внешнего электрического поля на естественное электрическое поле с одинаковой полярностью.

Таким образом, метод измерения разности электрических потенциалов собственной поляризации между двумя точками образца горной породы обладает тем достоинством, что косвенно не только характеризует изменение температуры в образце, но дополнительно дает информацию об электрокинетике процесса, о динамике изменения электрического сопротивления горной породы между электродами и полярности разных объемов образца горной породы. Кроме того, этот метод позволяет исследовать динамику процесса оттаивания мерзлой горной породы, а также подтверждает фильтрационное



разрушение мерзлых горных пород в водной среде.

Библиографический список:

1. Вопросы устойчивости обнажений многолетнемерзлых пород / В.Ю. Изаксон, А.В. Самохин, Е.Е. Петров и др. – Новосибирск: ВО Наука Сибирская Издательская фирма, 1994. – 165 с.

2. Эффект автотирминирующего разрушения в водной среде поверхностного слоя мерзлых глинистых пород: Препринт. В.Ю. Изаксон, А.В. Самохин, В.Л. Яковлев и др. – Якутск: ЯНЦ СО АН СССР, 1990. – 40 с.

3. Мерзлотоведение (краткий курс) / Под ред. Кудрявцева В.А. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 240 с.

4. Шушерина Е.П., Зайцев В.Н. Температурные деформации многолетнемерзлых дисперсных пород и повторно-жильных льдов / Мерзлотные исследования. Вып. ХУ. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – С. 187-197.

5. Якубовский Ю.В. Электроразведка. – М.: Недра, 1973. – 304 с.

6. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1973. – 362 с.

7. Kotov P. I., Roman L. T., Tsarapov M. N. Express-methods for forecast thawing soils settlement // Book of Abstracts of EUCOP4 – 4th European Conference on Permafrost, 18-21 June 2014 - Évora, Portugal. – Vol. 1. – Evora, Portugal, 2014. – P. 399.

8. Kuznetsova E., Motenko R. Weathering of volcanic ash in the cryogenic zone of kamchatka, eastern russia // *Clay Minerals*. – 2014. – No. 49. – P. 195–212.

9. Fish A. M. Kinetic nature of the long-term strength of frozen soils // Proc. 2-nd Intern. Symp. on Ground Freezing. Trondheim, Norway, 1980. – P. 95-108.

10. Andersland O.Ladany B. An introduction to frozen ground engineering. N.Y.Chapman and Hall. 1994. 180 p.

11. Odgvist F.K. Mathematical theory of creep and creep rupture // Oxford. Mathem. Monograph. London: Oxf. Univ.press. – 1966.

12. Zhu Y.Carbee D.L. Creep and strength behavior of frozen silt in uniaxial compression. USA CRREL. 1987, 67 p.

“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2017, No. 1, pp. 51-57

Title:	Experimental research of natural eigenpolarization electric potential generated during disintegration of frozen sandy-clayey rocks in aqueous media
Author 1	Name&Surname: Viktor F. Rochev Company: Technical Institute (branch) of the North-Eastern Federal University Address: 678960. Russia, The Sakha Republic (Yakutia), Neryungri, st. Kravchenko, 16 Work position: Associate Professor Contacts: viktor-rochev74@mail.ru
DOI:	10.17073/2500-0632-2017-1-51-57
Abstract:	For studying the mechanism of frozen sandy-clayey rock disintegration, natural electric fields (EP) arising in being frozen wet rocks due to electric potential difference at the boundary between frozen and thawed rocks, were investigated. The performed experiments showed that the frozen sandy-clayey rock disintegration in aqueous media is accompanied by generation and changing of natural electric fields in the specimen. In our opinion, the electric field generation is connected with filtration potentials arising as a result of water penetration through pores and fractures into the rock specimen. The eigenpolarization potential measurements were carried out by the potential gradient method using two electrodes frozen into the specimen. As a result, it was proved that the method of measuring the eigenpolarization electric potential difference between two points of a rock specimen has the advantage that it not only indirectly characterizes temperature change in the specimen, but additionally provides information on the process electrokinetics, the dynamics of changes in electrical resistance of the rock between the electrodes, and polarity of different volumes of the rock specimen. In addition, this method allows studying the dynamics of frozen rock thawing, and also confirms the filtration mechanism of frozen rock disintegration in aqueous media.
Keywords:	South Yakutia, frozen rocks, disintegration, ice content, research, clay rocks, rupture, theory



References:

1. Voprosy ustojchivosti obnazhenij mnogoletnemerzlyh porod [*Issues of the stability of outcrops of permafrost*] / V.Ju. Izakson, A.V. Samohin, E.E. Petrov et al. – Novosibirsk: Higher Education Science Siberian Publishing Company, 1994. – 165 p.
2. Jeffect avtotirminirujushhego razrushenija v vodnoj srede poverhnostnogo sloja merzlyh glinistyh porod: Preprint. [The effect of auto-tearing destruction in the water environment of the surface layer of frozen clay rocks: Preprint.] V.Yu. Izakson, A.V. Samokhin, V.L. Yakovlev et al. – Yakutsk: YAC of the SB AS USSR, 1990. – 40 p.
3. Permafrost studies (short course) / Ed. Kudryavtseva V.A. – Moscow: Izd-vo MGU, 1981. – 240 p.
4. Shusherina EP, Zaitsev V.N. Temperaturnye deformacii mnogoletnemerzlyh dispersnyh porod i povtorno-zhil'nyh l'dov [*Temperature deformations of permafrost and dispersed veins*] / Merzlotnye issledovanija [Permafrost studies.]. Issue. XY. – Moscow: Izd-vo MGU, 1976. – Pp. 187-197.
5. Yakubovsky Yu.V. Electrical Exploration. – Moscow: Nedra, 1973. – 304 p.
6. Tsytovich NA Mehanika merzlyh gruntov: Ucheb. posobie. [Mechanics of frozen soils: Proc. Allowance.] – Moscow: Higher School, 1973. – 362 p.
7. Kotov P. I., Roman L. T., Tsarapov M. N. Express-methods for forecast thawing soils settlement // Book of Abstracts of EUCOP4 – 4th European Conference on Permafrost, 18-21 June 2014 - Évora, Portugal. – Vol. 1. – Evora, Portugal, 2014. – P. 399.
8. Kuznetsova E., Motenko R. Weathering of volcanic ash in the cryogenic zone of kamchatka, eastern russia // Clay Minerals. – 2014. – No. 49. – P. 195–212.
9. Fish A. M. Kinetic nature of the long-term strength of frozen soils // Proc. 2-nd Intern. Symp. on Ground Freezing. Trondheim, Norway, 1980. – P. 95-108.
10. Andersland O.Ladany B. An intro-duction to frozen ground engineering. N.Y.Chapman and Hall. 1994. 180 p.
11. Odgvist F.K. Mathematical theory of creep and creep rupture // Oxford. Mathem. Monograph. London: Oxf. Univ.press. – 1966.
12. Zhu Y.Carbee D.L. Creep and strength behavior of frozen silt in uniaxial compression. USA CRREL. 1987, 67 p.

