УДК 551.345:
622.765

Д.М. Шестернев

ФИЗИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ ВЫВЕТРИВАНИЕ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД В КРИОЛИТОЗОНЕ

Дана характеристика энергетической обеспеченности, процессов химического и физического выветривания горных пород в криолитозоне. Рассмотрены основные механизмы физического и химического выветривания горных пород. Выполнена оценка скорости физического и химического выветривания пород криолитозоны при колебании температур пород в диапазоне отрицательных значений. Доказано, что скорость химического выветривания горных пород в криолитозоне существенно ниже, скорости физического выветривания. На основе структурирования криолитозоны по кинетике и механике процессов криогенеза, предложено рассматривать ее как криогенную кору выветривания.

Ключевые слова: криолитозона, выветривание физическое и химическое, скорость выветривания, кинетика, механика, криогенная кора выветривания.

Введение

Исследование кинетики и механики трансформации вещественного состава и строения пород литосферы, включая и тот ее объем, который характеризуется нулевыми или отрицательными температурами, и который называют криолитозоной, является одной из основных задач горных наук. Начало ее рассмотрения, по-видимому, можно отнести к появлению в 1763 г. трактата М.В. Ломоносова «О слоях земных». В силу различных причин, изложенное в нем физическое направление преобразования горных пород криолитозоны не нашло должного развития. В результате, в течение более чем двух столетий криолитозону было принято считать областью химического покоя [9].

Изучение криогенных процессов в криолитозоне, выполненные в 60—70-е гг. прошлого столетия, позволили наряду с известными типами гипергенных процессов выделить еще один — криогенез, под которым принято понимать совокупность физических, химических и минералогических преобразований горных пород в слое, равном мощности дисперсных образований в криолитозоне [10]. Фундаментальные и прикладные исследования

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 3. С. 350–360.
© 2017. Д.М. Шестернев.

выветривания горных пород криолитозоны, выполненные в последние десятилетия, позволили сформулировать базовые положения криогеохимии и криминералогенеза [7, 15, 16, 17].

Теоретические основы криогенного выветривания

В ходе естественной эволюции климата, а также в результате инженерного освоения территорий изменяется криолитологическое строение массивов горных пород криолитозоны. Определяющее влияние на динамику этого процесса оказывают раз-

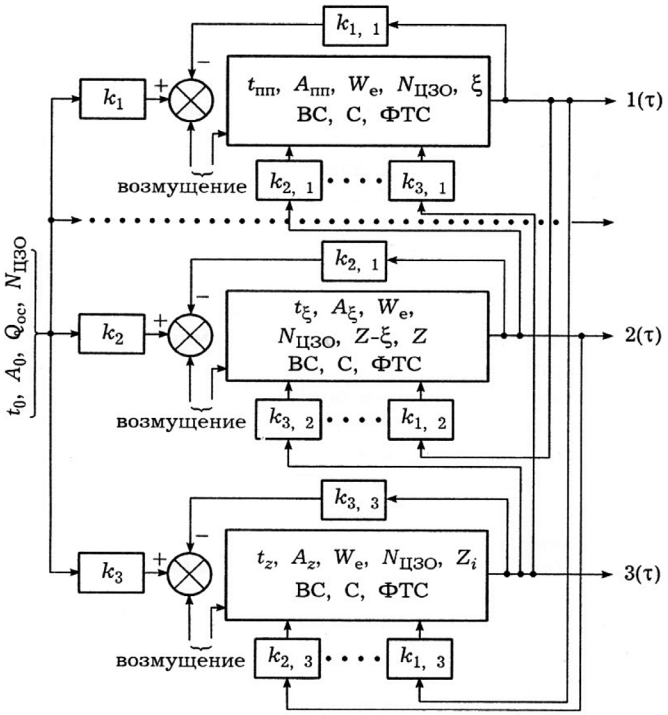

Рис. 1. Общая модель криогеного выветривания массива горных пород криолитозоны: t_0, A_0, $t_{пп}$, $A_{пп}$, $t_ξ$, $A_ξ$, t_Z, A_Z – среднегодовые температуры и амплитуды температур воздуха, на: поверхности пород, подошве сезонно-талого слоя (СТС), подошве годовых колебаний температур (ГКТ); $Q_{ОС}$, $N_{ЦЗО}$, W_e, ξ, Z – ξ, Z – количество осадков, циклов замерзания и оттаивания пород (ЦЗО), естественная влажность горных пород, мощность: СТС пород, зоны с отрицательными среднегодовыми температурами в слое их годовых колебаний, глубина годовых колебаний температур: Z_i, *ВС*, *С*, *ФТС* – мощность слоя многолетних колебаний температур, вещественный состав, строение и физико-технические свойства пород; k_1, k_2, k_3 – вход параметров в геокриосистему

непериодные энергоциклы. Отклонения от среднемноголетних значений климатических параметров на входе в массив криолитозоны являются источниками ее «возмущения» (рис. 1).

Структура теплового состояния криолитозоны в пространстве и во времени зависит от периодов (длительности) климатических ритмов (энергоциклов) и их взаимодействия. Вследствие этого энергетические импульсы с различными периодами существуют во всем объеме криолитозоны, а глубина их распространения, при прочих равных условиях, зависит от периода климатического ритма и теплофизических характеристик пород, интенсивность – от кинетики верхних и нижних граничных условий существования криолитозоны, а также от наличия внутренних теплоисточников. Каждый элементарный объем криолитозоны, получая дополнительную энергию, должен реализовать ее, стремясь к равновесному термодинамическому состоянию. В течение этого процесса он и сам становится источником повышения внутренней энергии массива криолитозоны. Таким образом, криолитозона практически постоянно находится в неравновесном состоянии, где с различной интенсивностью и взаимообусловленностью протекают процессы криогенеза, имеющие физическую и химическую природу.

Движущей силой физического выветривания горных пород криолитозоны являются циклические колебания температур по разрезу криолитозоны, в результате которых возникают потенциалы напряжений в кристаллической решетке минералов, в горных породах и их массивах.

Полная энергия колебательного цикла замерзания-оттаивания $G_{\text{цзо}}$ в слое годовых колебаний температур характеризуется уравнением механики колебательных процессов [11]:

$$G_{цзо} = C_{эфф} 2\pi^2 A_t^2 N^2, \qquad (1)$$

где $C_{\text{эфф}}$ – эффективная теплоемкость породы; A_{t} и N – соответственно амплитуда и количество циклов изменения температур в диапазоне положительных или отрицательных их значений.

Ниже границы годовых колебаний температур, где соотношение концентраций незамерзшей воды и льда в теплофизическом отношении практически равно нулю, уравнение (1) можно записать в следующем виде [13]:

$$G_{цзо} = C_{уд} 2\pi^2 A_t^2 N^2, \qquad (2)$$

где $C_{\text{уд}}$ – удельная теплоемкость породы.

Учитывая особенности изменения термодинамического состояния криолитозоны во времени и пространстве, ее криогеоэнергетическое состояние можно представить следующим образом. На начальном этапе формирования криолитозоны процессы криогенеза наиболее активно протекают в тех областях массивов горных пород, где развиты поля структурных неоднородностей. Как правило, эти поля имеют докриогенную историю формирования и развития и характеризуются наличием физических и химических неоднородностей, которые в термодинамических условиях криолитозоны являются первоисточниками активизации физического и химического выветривания, обуславливающих преобразования вещественного ее состава и строения.

Результаты исследований и их анализ

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что в слое годовых колебаний температур (слой экзокриогенеза) и в слое эндокриогенеза (слой ограниченный нижней границей криолитозоны) происходит приращение внутренней энергии за счет различных видов работы по разрушению минералов и горных пород механизмами физического выветривания – термокриогенным, термомеханическим, термокриогидратационным, термогидратационным и термоградиентным (рис. 2). В зонах эпи- и мезокриогенеза, где концентрацию льда и незамерзшей воды можно принять постоянными, преобладающими механизмами физического выветривания минералов и пород являются термофизический, термомеханический и термогидратационный.

Результатом физического выветривания горных пород в криолитозоне является их деструкция (частичное разрушение структурных связей в кристаллических решетках минералов и между минералами без потери их массы) и дезинтеграция (переход горных пород из монолитного состояния в дисперсное, характеризующееся формированием механических и водно-коллоидных структурных связей). Конечным продуктом физического выветривания горных пород являются первично-пылеватые частицы [12, 14].

В энергетическом отношении физическое выветривание горных пород в криолитозоне (криогипергенез) значительно уступает криогенезу (химическому и физико-химическому выветриванию). Однако криогипергенез способствует увеличению удельной поверхности горных пород, водо- и воздухопроницаемости и т.п., что в итоге обеспечивает увеличение интенсивности протекания химического выветривания.

Рис. 2. Термокриолитологический разрез массива криолитозоны полного профиля

Химическое выветривание горных пород в криолитозоне характеризуется действием ионно-обменных механизмов между минералами и незамерзшей водой, существующей на контакте с минералами и на поверхности кристаллов льда различного генезиса и формы (порового, трещинно-пластового, трещинно-жильного и т.п.). Незамерзшая вода, как и вода в объемной фазе, взаимодействуя с горными породами, способствует их растворению, гидратации, гидролизу, карбонатизации и окислению [2, 8, 10, 15].

В криолитозоне вода находится в трех фазовых состояниях: твердом – лед, жидком – незамерзшая (физико-химически связанная) и в газообразной форме. Это предопределяет здесь развитие диффузионного механизма растворения и переноса вещества по пленкам незамерзшей воды и в парообразной форме. Поскольку средняя скорость потока влаги в осадочных сцементированных и кристаллических горных породах криолитозоны близка к нулю, то под действием гравитационных полей и пленочного перемещения влаги господствующее значение в переносе вещества имеет диффузионный механизм [6, 14].

Скорость диффузионного растворения, в сравнении с прямым растворением пород, чрезвычайно мала и описывается первым законом Фика:

$$dm = -D\frac{dC}{dZ}Sd\tau, \qquad (3)$$

где dm – количество растворенного вещества; dC/dZ – градиент концентрации вещества; D – коэффициент диффузии, S – площадь; через которую происходит перенос вещества; $d\tau$ – продолжительность диффузии.

Численное значение коэффициента диффузии можно определить, используя следующее выражение [4]:

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r},$$

здесь η – коэффициент вязкости, пуаз; r – радиус атома вещества, м; k – постоянная Больцмана, Дж/град. Площадь, через которую в мерзлых породах осуществляется диффузия, вычисляется по формуле $S = \pi(R^2 - r^2)$, здесь R – средний радиус пор, r – средний радиус порового льда. Учитывая это, формула (3) для криолитозоны может быть представлена в следующем виде [14]:

$$dm = -\frac{kT}{6\eta r}\frac{dC}{dZ}(R^2 - r^2)d\tau. \qquad (4)$$

Таким образом, диффузия в горных породах криолитозоны – процесс спонтанного выравнивания концентрации вещества в поровых растворах. Интенсивность этого процесса зависит от толщины слоя связанной незамерзшей воды, скорости водообмена за счет термодиффузии.

Термодиффузионный перенос влаги в парообразном состоянии определяется градиентом температуры и становится существенным при его значениях, равных 5–6 °С на 1 см [2]. Но такие градиенты возможны только в 10–30-сантиметровом

верхнем слое пород с суточными колебаниями температур. Следовательно, его роль в химическом выветривании чрезвычайно мала и ограничена, в лучшем случае, этим слоем. Более сложный механизм химического выветривания отмечается в результате пленочной термодиффузии.

Фазовые переходы в свободной воде происходят при температуре 0 °С (273 К). В незамерзшей структурированной воде, состоящей из адсорбционного и диффузионного слоя, этот процесс протекает при более низких температурах. Понижение фазовых переходов в незамерзшей воде связано с тем, что энергия взаимодействия молекул воды с активными центрами поверхности минералов и ионами поровых растворов больше, в сравнении с энергией взаимодействия между молекулами. Например, толщина пленок в каолинитовых и монтмориллонитовых глинах при температуре -87 °С (186 К) составляет соответственно 0,7 и 0,3, при температуре 0 °С (273 К) – 3,0 и 1,5 нм. Причем снижение толщины пленки незамерзшей воды до 50 % наблюдается в интервале понижения температур от 0 до -10 °С. Уменьшение толщины пленки незамерзшей воды при понижении температуры приводит к повышению жесткости ее структуры и по своим свойствам она больше напоминает твердое тело, чем жидкость. В результате растворяющая ее способность значительно уменьшается в сравнении со свободной водой [1, 5, 8].

Гидратация является предвестником глубоких химических и физических преобразований горных пород. Уменьшение внешней нагрузки на нижележащие слои массивов пород, в результате денудации или проведения вскрышных работ, приводит к раскрытию ультрамикротрещин различной природы, включая термомеханическую и термофизическую. Высокая гидрофильность породообразующих минералов, увеличение степени их гидратации при низких температурах и рост удельной активной поверхности приводят к тому, что в трещинах шириною более 10–7 см практически мгновенно адсорбируется гигроскопическая влага, оказывая расклинивающее действие на стенки трещин. Тепловые импульсы, уменьшая или увеличивая толщину пленки воды, усиливают этот эффект. В результате наблюдается деструкция (частичное разрушение структурных связей без потери массы пород) и дезинтеграция пород (переход из монолитного в дисперсное состояние пород, с появлением новых типов структурных связей) и частичному переходу одних минералов в другие. Например, гематит перестраивается в лимонит. Кроме этого существенно увеличивается удельная активная поверх-

ность горных пород, увеличивается их влагопроницаемость. Несомненно, что все это приводит к дальнейшей активизации процессов химического выветривания пород в криолитозоне.

Известно, что гидролиз представляет собой реакцию обменного разложения между водой и минералами. Значительное количество из них расщепляется на более низкомолекулярные соединения с присоединением H и OH по месту разрыва структурных связей минералов. С увеличением pH воды активность замещения катионов при гидролизе увеличивается. Однако в криолитозоне кислотность вод достигает значительных величин только в верхнем слое сезонного оттаивания и промерзания, ниже – воды преимущественно слабощелочные, что не может не сказаться на активности гидролиза. Несомненно, что без наличия объемной фазы воды в криолитозоне реакции катионного обмена между связанной водой и минералами протекают, но скорость их существенно меньше при прочих равных условиях, в сравнении с областями, где многолетнемерзлые породы отсутствуют. Аналогичная скорость отмечается и в процессе выветривания минералов в присутствии угольной кислоты – карбонатизации. Как в первом (гидролиз), так и во втором случае (карбонатизация) разрушение полевых шпатов приводит к формированию альбита и глинистых минералов, в кислой среде – каолинитов, в щелочной – монтмориллонитов. Этих глинистых минералов этих типов в криогенной коре выветривания значительно меньше по сравнению с областями за ее пределами, что также является свидетельством весьма медленного протекания химического выветривания в криолитозоне в результате развития гидролиза и карбонатизации.

Окисление горных пород наиболее распространенный процесс, способствующий их химическому выветриванию. В процессе окисления они в связи с привносом железа в форме гидроокислов часто приобретают желтые, бурые и красноватые тона.

Как правило, глубина окисления криолитозоны совпадает с глубиной проникновения свободного кислорода. Эта глубина зависит от многих факторов, которые определяют воздухопроводность и температуру массивов горных пород. Особенностью криолитозоны является то, что ее массивы, вследствие консервации воздухопроводящих путей льдом, за редким исключением, отличаются низкой воздухопроводимостью и тепломассообменом и, следовательно, низкой активностью протекания реакций окисления. Однако эта закономерность нарушается при окислении массивов пород сульфидных месторождений.

На этапе перехода сульфидов в сульфаты реакции окисления экзотермические, приводящие к выделению значительного количества тепла и формированию вод кислотного типа. В дальнейшем при переходе сульфатов в карбонаты реакции носят эндотермический характер. Это может произойти только при поступлении дополнительного тепла, участвующего в гипергенных процессах пород криолитозоны. В частности, такое тепло могло поступать в массивы горных пород Удокана, в термохроны – межледниковые периоды, когда криолитозона Удокана становилась массивно-островной, а мощность сокращалась до первых десятков метров.

Заключение

Краткая характеристика основных механизмов химического выветривания, приведенная выше, показывает, что скорость химического выветривания пород криолитозоны, существенно ниже химического выветривания пород, существующих при положительных температурах.

Дальнейшие строго поставленные в методическом плане экспериментальные исследования, позволят не только на качественном, но и количественном уровне изучить динамику и выявить закономерности химического выветривания пород, существующих в различных термодинамических условиях. Полученные результаты позволят более эффективно решать практические проблемы внедрения нетрадиционных физико-химических методов разработки месторождения полезных ископаемых в криолитозоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дерягин Б. В.*, *Чураев Н. В.*, *Овчаренко Ф. Д.* Вода в дисперсных системах. – М.: Химия, 1989. – 288 с.

2. *Ершов Э. Д.* Криогипергенез. – М.: изд-во МГУ, 1982. – 209 с.

3. *Ершов Э. Д.* Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. – М.: изд-во МГУ, 1979. – 201 с.

4. *Киреев В. А.* Краткий курс физической химии. – М.: Химия, 1969. – 640 с.

5. *Королев В. А.* Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы // Соросовский образовательный журнал. Науки о Земле. – № 9. – 1996. – С. 79–85.

6. *Луговой П. Н.* Значение диффузии в физико-химических преобразованиях перигляциальных процессах / Труды СВКНИИ. Вып. 38. – Магадан, 1971. – С. 146–151.

7. *Птицын А. Б.* Фундаментальные положения криогеохимии / Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы VII Международного симпозиума. Институт мерзлотоведения им. акад. В.П. Мель-

никова СО РАН. Чита, ноябрь 2007 г. / Под ред. Д.М. Шестернева и др. – Якутск: изд-во ИМЗ СО РАН, 2007. – С. 18–20.
8. *Савельев Б.А.* Физика, химия, и строение природных льдов и мерзлых горных пород. – М.: изд-во МГУ, 1971. – 506 с.
9. *Сауков А.А.* Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – М.: изд-во МГУ, 1963. – 348 с.
10. *Тютюнов И.А.* Процессы изменения и преобразования почв и горных пород при отрицательной температуре (Криогенез). – М.: изд-во АН СССР, 1960. – 144 с.
11. *Швецов П.Ф.* К термодинамическим основам физического выветривания скальных пород / Вопросы инженерного изучения процессов и кор выветривания. – М.: изд-во МГУ, 1971. – С. 26–31.
12. *Шестернев Д.М.* Криогипергенез крупнообломочных и скальных пород криолитозоны. – Якутск: изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 1997. – 120 с.
13. *Шестернев Д.М.* Криогипергенез и геотехнические свойства пород криолитолзоны. – Новосибирск: изд-во ИМЗ СО РАН, 2001. – 266 с.
14. *Шестернев Д.М.*, *Татауров С.Б.* Криогенез и ртутьсодержащие соединения в горнопромышленных отвалах. – Якутск: изд-во ИМЗ СО РАН, 2003. – 178 с.
15. *Юргенсон Г.А.* Криоминералогенез как фактор состояния толщ многолетнемерзлых горных пород / Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы VII Международного симпозиума. Институт мерзлотоведения им. акад. В.П. Мельникова СО РАН, Чита, ноябрь 2007 / Под ред. Д.М. Шестернева и др. – Якутск, изд-во ИМЗ СО РАН, 2007. – С. 177–184.
16. *Юргенсон Г.А.*, *Безродных Ю.П.* О зоне окисления Удоканского месторождения меди / Геокриологические условия Забайкальского Севера. – М.: Наука, 1966. – С. 53–54.
17. *Яхонтова Н.А.* Сульфаты из криогенной зоны криогенеза. Новые находки. Номенклатурные вопросы // Минералогический журнал. – 1988. – № 4 – С. 3–15. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Шестернев Д.М. – доктор технических наук, профессор,
зав. лабораторией, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения РАН.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 3, pp. 350–360.

UDC 551.345: 622.765

D.M. Shesternev

PHYSICAL AND CHEMICAL WEATHERING OF ROCK MASSES IN PERMAFROST ENVIRONMENTS

The energy supply, and the processes of chemical and physical erosion of rocks in the permafrost zone are characterized. The basic mechanisms of physical and chemical erosion of rocks are discussed. The estimate is given for the rate of physical and chemical erosion of rocks under temperature variation in the negative range. It is proved that the chemical erosion rate

of permafrost rocks is much lower than the physical erosion rate. Based on structuring of the permafrost zone relative to kinetics and mechanics of cryogenesis, it is suggested to assume this zone as the cryogenic weathered layer.

Key words: permafrost zone, physical and chemical erosion, erosion rate, kinetics, mechanics, cryogenic weathered layer.

AUTHOR

Shesternev D.M., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Laboratory, Melnikov Permafrost Institute of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, 677010, Yakutsk, Russia.

REFERENCES

1. Deryagin B. V., Churaev N. V., Ovcharenko F. D. *Voda v dispersnykh sistemakh* (Water in dispersed systems), Moscow, Khimiya, 1989, 288 p.

2. Ershov E. D. *Kriogipergenez* (Cryohypergenesis), Moscow, izd-vo MGU, 1982, 209 p.

3. Ershov E. D. *Vlagoperenos i kriogennye tekstury v dispersnykh porodakh* (Moisture transfer and cryogenic textures in dispersed rocks), Moscow, izd-vo MGU, 1979, 201 p.

4. Kireev V. A. *Kratkiy kurs fizicheskoy khimii* (Short course on physical chemistry), Moscow, Khimiya, 1969, 640 p.

5. Korolev V. A. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal. Nauki o Zemle*, no 9. 1996, pp. 79–85.

6. Lugovoy P. N. *Trudy SVKNII*. Vyp. 38 (North-Eastern Integrated Research Institute Proceedings, issue 38), Magadan, 1971, pp. 146–151.

7. Ptitsyn A. B. *Problemy inzhenernogo merzlotovedeniya: materialy VII Mezhdunarodnogo simpoziuma*. Chita, noyabr' 2007 g. (Problems of Engineering Permafrostology: VII International Symposium Proceedings. Chita, November 2007), Yakutsk, izd-vo IMZ SO RAN, 2007, pp. 18–20.

8. Savel'ev B. A. *Fizika, khimiya, i stroenie prirodnykh l'dov i merzlykh gornykh porod* (Physics, chemistry and structure of natural ice and permafrost rocks), Moscow, izd-vo MGU, 1971, 506 p.

9. Saukov A. A. *Geokhimicheskie metody poiskov mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* (Geochemical methods of mineral exploration), Moscow, izd-vo MGU, 1963, 348 p.

10. Tyutyunov I. A. *Protsessy izmeneniya i preobrazovaniya pochv i gornykh porod pri otritsatel'noy temperature (Kriogenez)* (Processes of alteration and transformation of soils and rocks under negative temperatures (Cryogenesis)), Moscow, izd-vo AN SSSR, 1960, 144 p.

11. Shvetsov P. F. *Voprosy inzhenernogo izucheniya protsessov i kor vyvetrivaniya* (Issues of engineering studies into processes in weathered layer), Moscow, izd-vo MGU, 1971, pp. 26–31.

12. Shesternev D. M. *Kriogipergenez krupnooblomochnykh i skal'nykh porod kriolitozony* (Cryohypergenesis of psephitic rocks in the permafrost zone), Yakutsk, izd-vo Instituta merzlotovedeniya SO RAN, 1997, 120 p.

13. Shesternev D. M. *Kriogipergenez i geotekhnicheskie svoystva porod kriolitolzony* (Cryohypergenesis and technical properties of permafrost rocks), Novosibirsk, izd-vo IMZ SO RAN, 2001, 266 p.

14. Shesternev D. M., Tataurov S. B. *Kriogenez i rtut'soderzhashchie soedineniya v gornopromyshlennykh otvalakh* (Cryogenesis and mercury-bearing compounds in mine dumps), Yakutsk, izd-vo IMZ SO RAN, 2003, 178 p.

15. Yurgenson G. A. *Problemy inzhenernogo merzlotovedeniya: materialy VII Mezhdunarodnogo simpoziuma*. Chita, noyabr' 2007 g. (Problems of Engineering Permafrostology: VII International Symposium Proceedings. Chita, November 2007), Yakutsk, izd-vo IMZ SO RA, 2007, pp. 177–184.

16. Yurgenson G. A., Bezrodnykh Yu. P. *Geokriologicheskie usloviya Zabaykal'skogo Severa* (Geocryological conditions in the Northern Transbaikal areas), Moscow, Nauka, 1966, pp. 53–54.

17. Yakhontova N. A. *Mineralogicheskiy zhurnal*. 1988, no 4, pp. 3–15.