

УДК 551.345:536:539.3(571.56)

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ТРАССЫ ВОДОВОДА НИЖНИЙ БЕСТЯХ – ВОДОХРАНИЛИЩЕ МУНДУЛАХ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Варламов С.П., Скрябин П.Н.

*ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН», Якутск,
e-mail: svarlamov@mpi.ysn.ru*

Представлены результаты инженерно-геокриологических исследований, выполненных в полосе проложения водовода Нижний Бестях – водохранилище Мундулах в Центральной Якутии. Освещены геокриологические условия района работ, методика геотемпературного мониторинга верхних горизонтов криолитозоны. Объектами исследований являются грунты слоя годовых теплооборотов. Полевые работы включают повторные ландшафтные обследования нарушенных участков, проведения наблюдений в холодный и теплый сезоны года за высотой и плотностью снежного покрова, свойствами, протаиванием и температурой грунтов. Исследована динамика индикаторов изменений термического режима грунтов: мощность сезоннопротаивающего слоя и температуры в слое годовых теплооборотов. Выявлено значительное повышение среднегодовой температуры грунтов и увеличение глубины сезонного протаивания при вырубке леса и нарушения напочвенного покрова. Мощность сезоннопротаивающего слоя на трассе водовода увеличивается ежегодно, местами достигая верхней кровли подземных льдов, где начинается деградация многолетнемерзлых пород. Приведены данные о развитии опасных криогенных процессов. Результаты исследований использованы при проектировании и строительстве водовода. Экспериментальные данные являются основой прогноза изменения термического режима грунтов нарушенных ландшафтов и разработки рекомендаций по рациональному природопользованию.

Ключевые слова: водовод, мерзлые грунты, температура, сезоннопротаивающий слой, мониторинг, динамика, нарушенные ландшафты

ENGINEERING-GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS ALONG THE WATER PIPELINE ROUTE FROM MUNDULAKH RESERVOIR TO NIZHNY BESTYAKH, CENTRAL YAKUTIA

Varlamov S.P., Skryabin P.N.

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: svarlamov@mpi.ysn.ru

This article presents the results of engineering-geocryological investigations performed along the route of the Mundulakh Reservoir – Nizhny Bestyakh water pipeline in Central Yakutia. The geocryological conditions in the study area, as well as the methods of permafrost thermal monitoring are described. The research focuses on the upper permafrost within the depth of annual temperature fluctuations. Field observations involve repeated surveys of the disturbed landscapes, including measurements of snow depth, snow density, soil properties, thaw depth, and ground temperature in the cold and warm seasons. The study aims to explore active layer thickness and near-surface permafrost temperatures, the variables which indicate changes to the ground thermal regime. The study has shown significant increases in mean annual ground temperatures and seasonal thaw depths following deforestation and surface disturbance. The active-layer thickness along the pipeline route has been increasing from year to year, locally reaching the top of ground ice bodies and triggering permafrost degradation. The development of permafrost-related hazards is reported. The results obtained have been used in the design and construction of the water pipeline. The experimental data provide a basis for predicting possible changes to the ground thermal regime in disturbed landscapes, as well as for developing recommendations for rational nature management.

Keywords: water pipeline, permafrost, temperature, thaw depth, monitoring, dynamics, terrain disturbance

Рациональное и безопасное использование природных криогенных ресурсов является современной актуальной задачей в холодных регионах России. В Центральной Якутии строительство и эксплуатация линейных сооружений (трубопроводы, железные, автомобильные дороги и т.д.) осложняется большим разнообразием инженерно-геокриологических условий и тенденциями развития неблагоприятных криогенных процессов. Устойчивость мерзлотных ландшафтов при техногенных воздействиях определяют ведущие природные факторы: температура грунтов, льдистость,

растительность и криогенные процессы. Строительство линейных сооружений неизбежно сопровождается нарушением условий теплообмена грунтов с атмосферой: удаляется растительный и напочвенный покровы, изменяется мощность и плотность снега, состав и свойства грунтов сезонного протаивания-промерзания. В результате интенсивного изменения температурного и влажностного режима грунтов начинают развиваться негативные криогенные процессы. Эти процессы приводят к изменению мерзлотно-ландшафтных условий территории и угрожают устойчивости сооружений.

Тепловое состояние грунтов является одной из основных характеристик геокриологических условий, определяющих устойчивость инженерных объектов.

В связи с реализацией программы водоснабжения заречных районов Республики Саха (Якутия) Институт мерзлотоведения СО РАН в 1993 г. выполнил инженерно-геокриологические исследования на трассе проектируемого водовода Нижний Бестях – водохранилище Мундулах. Было изучено распространение, строение многолетнемерзлых пород, температурный режим прибрежной зоны водохранилища. Составлен прогноз теплового режима ложа водохранилища и оценены характер и темпы переработки его берегов. С 1994 г. организован геотемпературный мониторинг грунтов с целью установления эволюции и тенденции развития инженерно-геокриологического состояния грунтов вдоль трассы водовода.

Материалы и методы исследования

Прилегающая к водоводу территория характеризуется сложными геокриологическими условиями: распространением многолетнемерзлых пород, надмерзлотных вод, подземных льдов и развитием криогенных процессов [1–4 и др.].

Трасса прокладки водовода в рассматриваемом районе пересекает естественные и нарушенные ландшафты трех типов местности: пойменного, песчано-грядового, межжальского.

В пойменном типе местности геотемпературные наблюдения организованы на злаково-разнотравном лугу у прибортовой части межгрядового понижения на средней пойме (Скв-168/89). Напочвенный покров представлен дерново-растительным слоем мощностью до 0,12 м. Сезоннопротаивающий слой до глубины 1,5 м сложен мелкозернистым песком влажностью 18–21%. Многолетнемерзлые среднезернистые пески до глубины 12,1 м характеризуются постоянной влажностью равной 25%.

В песчано-грядовом типе местности наблюдения в естественных условиях организованы в лишайниково-толокнянковом сосняке (Скв-13/93). Напочвенный покров мощностью 0,06 м представлен слабо-разложившимися мхами и лишайниками с пылеватыми песками, влажностью до 12%. Сезоннопротаивающий слой мощностью до 2,1 м сложен мелкозернистым песком и характеризуется малой влажностью (2–3%) верхнего 1-метрового слоя, у по-

дошвы сезонного протаивания влажность их увеличивается до 15–18%. Подстилаемые многолетнемерзлые пылеватые пески с массивной криотекстурой до глубины 11 м отличаются повышенной влажностью (19–21%).

Техногенный участок (свежая гарь) расположен на склоне песчаной гряды западной экспозиции. Природный пожар 1987 г. в последующем стал причиной вывала молодого соснового древостоя (Скв-13/87). Верхний слой почвы мощностью до 8 см содержит обгоревшие растительные остатки с влажностью 3–5%. Сезоннопротаивающий слой до глубины 1,75 м сложен слабоувлажненным (5–13%) мелкозернистым песком. Многолетнемерзлые грунты слоя годовых теплооборотов отличаются постоянной влажностью (19–20%) и представлены переслаиванием мелкозернистого песка и супеси.

В межжальском типе местности контрольный участок оборудован в лиственничном лесу (Скв-10/93). Напочвенный покров толщиной до 0,1 м представляют зеленые мхи с включением слабо-разложившейся лесной подстилки, влажность которых изменяется в широких пределах (7–47%). Сезоннопротаивающий слой мощностью 1,4–1,6 м сложен супесью и суглинком с влажностью 10–15%. Подстилающие многолетнемерзлые суглинисто-супесчаные грунты до глубины 5 м характеризуются устойчиво повышенной влажностью 49–53%. В интервале глубин 3–12 м вскрыты повторно-жильные льды.

Второй техногенный участок оборудован на просеке водовода (Скв-12/93). В процессе сооружения трубопровода был вырублен лес и уничтожена лесная подстилка. Влажность верхнего нарушенного слоя грунтов мощностью 0,05–0,1 м изменяется в небольших пределах (4–9%). Сезоннопротаивающий супесчаный слой отличается большими изменениями влажности (15–35%). С глубины 2,1 м до 14,0 м залегают повторно-жильные льды, которые до 15,8 м подстилаются супесями с прослойками тонкозернистого песка, ниже до 19 м – мелкозернистыми песками.

Объектами исследований являются грунты слоя годовых теплооборотов до глубины 10–15 м. Основными критериями тепловой реакции криолитозоны на антропогенные воздействия являются мощность сезоннопротаивающего слоя (ξ) и среднегодовая температура на подошве слоя годовых теплооборотов (t_0). Работы проводятся в со-

ответствии с требованиями метода природных аналогий на основе организации длительных натуральных исследований [5].

Наблюдательная сеть геотемпературного мониторинга охватывает естественные и нарушенные ландшафты. Натурные наблюдения проводятся 4 раза в холодный и тёплый периоды года. Полевые работы предусматривают повторное обследование нарушенных ландшафтов, проведение наблюдений за факторами, определяющими термический режим грунтов (высота и плотность снега, строение, свойства, протаивание и температура грунтов, теплопроводность напочвенных покровов, криогенные процессы).

Результаты исследования и их обсуждение

На средней пойме в межгрядном понижении с ивовыми кустами (Скв-168/89) межгодовые изменчивости среднегодовых температур грунтов на подошве слоя годовых теплооборотов изменяются в широких пределах от $-1,1$ до $-3,5$ °С, мощность сезоннопротаивающего слоя, находящегося в сильноувлажненном состоянии, варьирует в широких пределах (1,43–2,15 м). В формировании термического режима грунтов определяющее влияние оказывают снежный покров и пойменный режим реки. Минимальные температуры грунтов наблюда-

лись в периоды с аномально малоснежными покровами (1996, 1997 гг.), когда максимальная высота снега за сезон составляла всего 30–35 см. Максимальные температуры отмечались в многоснежные и аномально многоснежные годы (1999–2001 гг.) при максимальной мощности снежного покрова равной 39–51 см.

После сильных наводнений 2006 и 2011 гг. намыв песка толщиной до 0,3 м на поверхности поймы способствовал понижению температуры грунтов на 1,6–2,0 °С (рис. 1).

Здесь опасными экзогенно-геологическими процессами являются весенние ледоходы р. Лены, где отмечаются срезание льдами кустарниково-древесной растительности, намыв песков половодьем, размыв берегов пойм и др.

В песчано-грядовом типе местности на толокнянковом сосняке (Скв-13/93) среднегодовые температуры грунтов на глубине 10 м за период наблюдений изменялись в пределах $-0,7...-2,1$ °С (рис. 1), мощности сезоннопротаивающего слоя составляли 1,85–2,10 м. Основными факторами, определяющими формирования термического режима песчаных грунтов, являются метеорологические параметры холодного периода (приземная температура воздуха, динамика снежного покрова), влажностный режим сезоннопротаивающего слоя и их слабая теплопроводность.

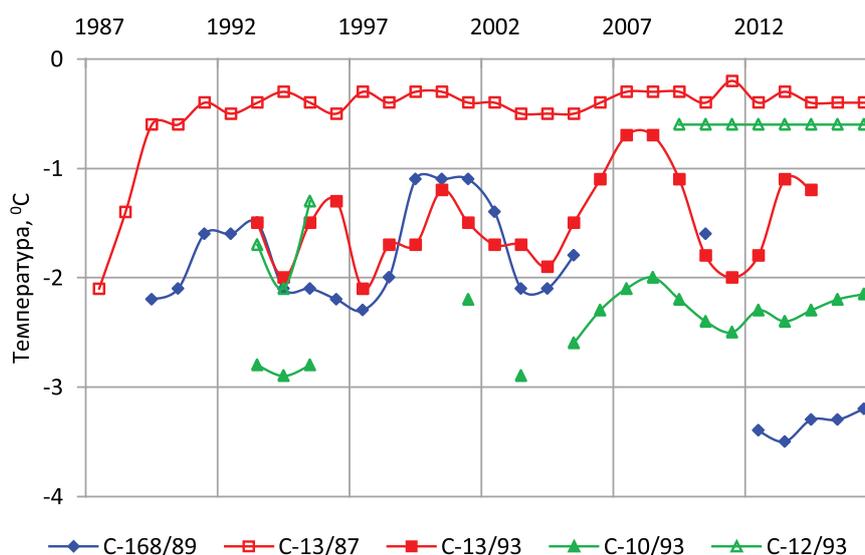


Рис. 1. Динамика среднегодовой температуры грунтов: С-168/89 – на разнотравном лугу средней поймы, С-13/93 – в сосновом лесу и С-13/87 – на гаре с вырубкой в песчано-грядовом типе местности, С-10/93 – в лиственничном лесу и С-12/93 – при вырубке леса и нарушении напочвенного покрова в межгрядовом типе местности на трассе водовода

На техногенном участке в течение 2 лет после природного пожара отмечается резкое повышение t_0 на $1,5^\circ\text{C}$. Начиная с 4-го года на бывшей гари при постепенном самовосстановлении березово-кустарниковой растительности наблюдается стабилизация температуры грунтов и ее значения не выходят за пределы $-0,3 - 0,4^\circ\text{C}$ (рис. 1). Мощность сезоннопротаивающего слоя в зависимости от летних температур воздуха изменялась в пределах 2,4–2,8 м. В этом типе местности развитие опасных криогенных процессов не отмечается.

В межлассном типе местности в районе водохранилища Мундулах геотемпературный мониторинг в естественных условиях (Скв-10/93) проводится с 1993 г. в мохово-брусничном лиственничнике [6]. Максимальная высота снежного покрова варьировала в пределах 31–36 см. Среднегодовая температура грунтов на подошве годовых теплооборотов изменяется от $-2,0$ до $-2,9^\circ\text{C}$.

В 1992 г. для прокладки водовода была вырублена просека в лиственничном лесу с последующим нарушением напочвенного покрова. На этом техногенном участке (Скв-12/93) проведены многолетние экспериментальные наблюдения [6]. К сожалению

летом 1995 г. в процессе эксплуатации водовода скважина была выведена из строя. В сентябре 2008 г. была пробурена новая скважина на расстоянии 100 м от первой. Вырубка затеняющего леса и уничтожение теплоизолирующего мохового покрова привели к резкому повышению температуры грунтов. Через 23 года в конце теплого периода повышение температуры грунтов на глубине 2 м составило $3,6^\circ$, на глубине 5 м – $1,5^\circ\text{C}$ (рис. 1 и 2). Следовательно, подошва сваи опоры находится в высокотемпературных слабоустойчивых мерзлых грунтах, температура которых составляет всего $-0,6^\circ\text{C}$.

На просеке по сравнению с естественными условиями среднегодовая температура грунтов на глубине 5 м повысилась на $1,4^\circ\text{C}$, а мощность сезоннопротаивающего слоя увеличилась на 1,1 м и достигла 3,0 м. Такие изменения теплового состояния грунтов при залегании повторно-жильных льдов на глубинах 1,6–2,4 м обусловили деградацию мерзлой толщи, просадку поверхности на 0,5–1,0 м и развитию начальной формы термокарста (рис. 3). Формирование полигональной формы рельефа на просеке представляет серьезную опасность устойчивости грунтового основания водовода.

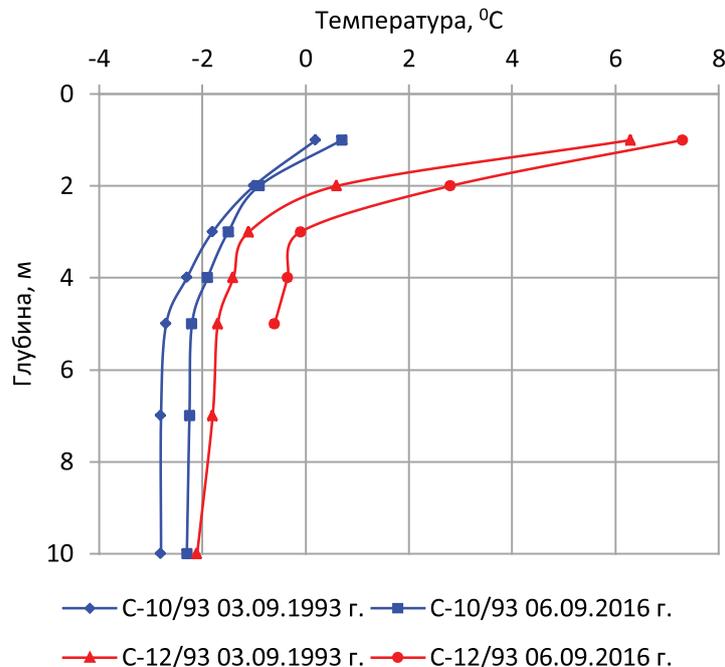


Рис. 2. Изменение температуры грунтов в лиственничном лесу (Скв-10/93) и на просеке (Скв-12/93) трассы водовода Нижний Бестях – Мундулах

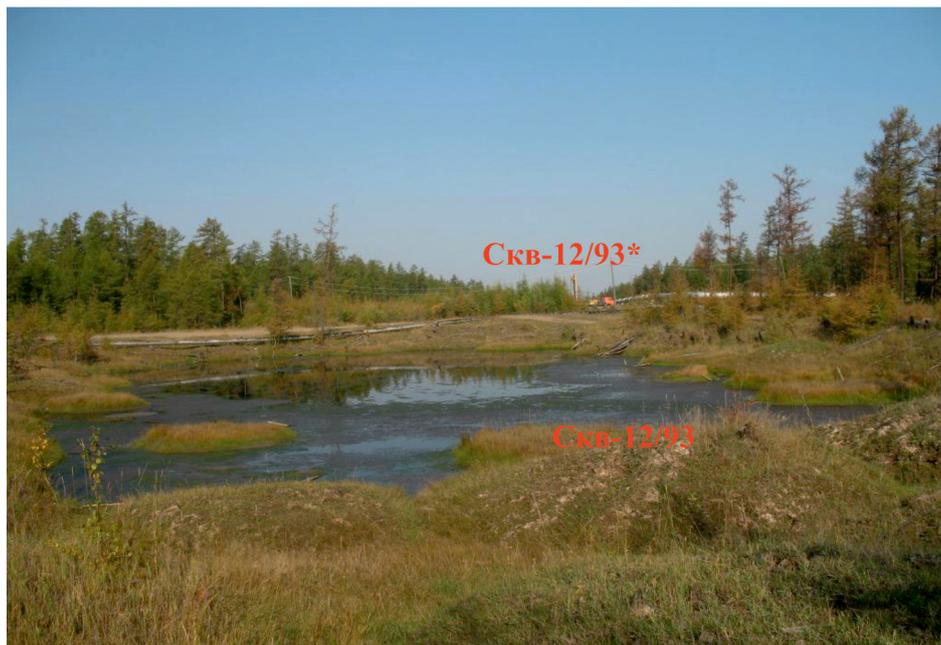


Рис. 3. Развитие начальной формы термокарста Вид Скв-12/93 (восстановленной, где стоит буровая установка) от старой Скв-12/93 (вышедшей из строя). Август 2009 г.*

Участок водохранилище Мундулах расположен в 1,2 км восточнее с. Майя, в окрестностях одноименного аласа. Зрелая термокарстовая котловина глубиной 10–15 м вытянута в северо-восточном направлении, имеет длину 1,5 и ширину 0,6 км. Полевые работы лаборатории криолитологии в 1993 г. установили повсеместное развитие супесчано-суглинистых отложений ледового комплекса с повторно-жильными льдами. Влажность мерзлых отложений колеблется в пределах 37–53 %, объемная льдистость изменяется от 0,45 до 0,78.

Температурный режим мерзлых грунтов в пределах котловины определяется в основном экспозицией склонов и наличием растительного покрова. На склонах южной экспозиции отмечаются самые высокие температуры, которые составляют $-1,7^{\circ}\text{C}$ на луговом межаласье и верхней части склона борта и $-0,8^{\circ}\text{C}$ в нижней периферийной части дна аласа. Самая низкая температура грунтов характерна для склона северо-восточной экспозиции, где она достигает $-3,0^{\circ}\text{C}$. На межаласьях, где произрастает лиственничный лес, температура грунтов на глубине годовых нулевых амплитуд составляет около $-3,0^{\circ}\text{C}$.

Буровые работы лаборатории геокриологического прогноза в 1993 г. выявили наличие мерзлых пород мощностью 5–6 м в центре аласа, на глубине 7 м вскрыли талые, водо-

насыщенные грунты. Проект Института «Гипроводхоз» предусматривал затопление половины площади аласа, поэтому на середине его было рекомендовано сооружение дамбы длиной 570 м. Прогнозная оценка, выполненная Н.И. Шендером и А.С. Тетельбаумом, показала, что при заполнении водохранилища мерзлые породы, залегающие на днище котловины, полностью протаивают за 8–12 лет. Верхняя граница многолетнемерзлых пород через 40 лет будет фиксироваться на расстоянии 55 м от береговой линии, примерно на глубине 8 м от поверхности дна аласа.

Водоохранилище заполнялось полностью в течение 1995–1996 гг. В результате теплового влияния водной толщи водохранилища под днищем котловины и дамбой протаяли мерзлые грунты и вторая сухая половина аласа в 2006 г. тоже стала заполняться водой, с лета 2008 г. днище котловины аласа представляет единый водоем водохранилища.

Выводы

На основе выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Выявлено понижение среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м на $1,6\text{--}2,0^{\circ}\text{C}$ в средней пойме при намыве песка. Лесной природный пожар в песчано-грядовом типе местности приводит к повышению t_0 на $1,6\text{--}1,9^{\circ}\text{C}$. Вырубка леса

и уничтожение напочвенного покрова в межлассном типе местности повышает t_0 на $1,5^\circ\text{C}$, увеличивает ξ на $1,1$ м.

2. Техногенные воздействия в межлассном типе местности при близком залегании повторно-жильных льдов обусловили деградацию мерзлой толщи, развитие начальной формы термокарста, угрожающей устойчивости водовода.

3. Инженерно-геокриологическое состояние трассы водовода оценивается как относительно устойчивое в песчано-грядовом и слабо устойчивое в межлассном типах местности.

Список литературы

1. Бойцов А.В. Особенности режима надмерзлотных вод сезонного слоя в условиях расчлененного рельефа // Мониторинг подземных вод криолитозоны. – Якутск: Ин-т мерзотоведения СО РАН, 2002. – С. 124–140.
2. Босиков Н.П. Мерзлотные ландшафты зоны освоения Лено-Алданского междуречья / Н.П. Босиков, И.С. Васильев, А.Н. Федоров. – Якутск: Ин-т мерзотоведения СО АН СССР, 1985. – 124 с.
3. Иванов М.С. Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. – Новосибирск: Наука, 1984. – 125 с.
4. Гаврильев П.П. Мерзлотно-экологические особенности таежных агроландшафтов Центральной Якутии /

П.П. Гаврильев, И.С. Угаров, П.В. Ефремов. – Якутск: Изд-во Института мерзотоведения СО РАН, 2001. – 196 с.

5. Скрябин П.Н. Термический режим нарушенных ландшафтов Центральной Якутии / П.Н. Скрябин, С.П. Варламов // Криосфера Земли. – 2013. – Т. XVII. – № 3. – С. 44–49.

6. Скрябин П.Н. Оценка теплового состояния нарушенных ландшафтов при восстановлении растительности / П.Н. Скрябин, С.П. Варламов // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 2. – С. 73–76.

References

1. Bojcov A.V. Osobennosti rezhima nadmerzlotnyh vod sezonnotalogo sloja v uslovijah raschlenennogo reliefa // Monitoring podzemnyh vod kriolitozony. Yakutsk: In-t merzlotovedenija SO RAN, 2002. pp. 124–140.
2. Bosikov N.P. Merzlotnye landshafty zony osvoenija Leno-Aldanskogo mezhdurechja / N.P. Bosikov, I.S. Vasilev, A.N. Fedorov. Yakutsk: In-t merzlotovedenija SO AN SSSR, 1985. 124 p.
3. Ivanov M.S. Kriogennoe stroenie chetvertichnyh otlozhenij Leno-Aldanskoj vpadiny. Novosibirsk: Nauka, 1984. 125 p.
4. Gavriljev P.P. Merzlotno-jekologicheskie osobennosti taezhnyh agrolandshaftov Centralnoj Jakutii / P.P. Gavriljev, I.S. Ugarov, P.V. Efremov. Yakutsk: Izd-vo Instituta merzlotovedenija SO RAN, 2001. 196 p.
5. Skrjabin P.N. Termicheskij rezhim narushennyh landshaftov Centralnoj Jakutii / P.N. Skrjabin, S.P. Varlamov // Kriosfera Zemli. 2013. T. XVII. no. 3. pp. 44–49.
6. Skrjabin P.N. Ocenka teplovogo sostojanija narushennyh landshaftov pri vosstanovlenii rastitelnosti / P.N. Skrjabin, S.P. Varlamov // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. 2013. no. 2. pp. 73–76.