

УДК 551.345

Динамика термического режима грунтов на трассах линейных сооружений Центральной Якутии

П.Н. Скрябин

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия
vsp@mpi.ysn.ru

Аннотация. Рассматривается проблема тепловой реакции верхних горизонтов криолитозоны на антропогенные воздействия. Представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных при научно-геокриологическом сопровождении проектно-изыскательских и строительных работ на трассах линейных сооружений. 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 активного слоя и температуры в слое годовых теплооборотов в полосе проложения трубопроводов, железных и автомобильных дорог, линий электропередач. Выявлено значительное повышение среднегодовой температуры верхних горизонтов криолитозоны и увеличение глубины сезонного протаивания при вырубке леса и удалении напочвенного покрова, вырубке леса на гарях. Глубина сезонного протаивания грунтов на трассах линейных сооружений увеличивается ежегодно, местами достигая верхнюю кровлю подземных льдов, где начинается деградация многолетнемерзлых пород. Приведены данные о развитии опасных криогенных процессов. Количественно оценена изменчивость термического режима грунтов на разнорежимных вырубках (выборочная, постепенная, сплошная) и на гарях (свежие, старые) в зависимости от стадий восстановления растительности.

Результаты исследований использованы при проектировании и строительстве линейных сооружений. Экспериментальные данные являются основой прогноза изменения термического режима грунтов нарушенных ландшафтов и разработки рекомендаций по рациональному природопользованию.

Ключевые слова: мерзлые грунты, температура, глубина протаивания, мониторинг, динамика, нарушенные ландшафты.

Dynamics of the ground thermal regime along linear projects in Central Yakutia

P.N. Skryabin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
vsp@mpi.ysn.ru

Abstract. This article discusses the thermal response of upper permafrost to anthropogenic disturbances. It presents the results of experimental geocryological investigations conducted in support of geotechnical exploration and construction of linear engineering projects.

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.

СКРЯБИН Павел Николаевич – к.г.н., с.н.с.

The study aims to explore active layer thickness and near-surface permafrost temperatures, the variables which indicate changes to the ground thermal regime in the pipeline, railway, road and powerline corridors. The observation results demonstrate significant increases in mean annual temperature of the upper permafrost layers, as well as in seasonal thaw depth following tree removal, ground surface stripping and post-fire clearing. Soil thaw depths along the linear corridors show a distinct increase from year to year, in places reaching the top of ice wedges and causing permafrost degradation. The development of hazardous cryogenic processes is reported. Quantitative estimates have been obtained for the thermal dynamics of the ground on selective, gradual and clear cuts, as well as on old and recent burns in relation to plant succession stages.

The results of the study have been used in the design and construction of linear structures. Observational data can be further used in predicting the thermal dynamics of disturbed landscapes and in developing guidelines for rational land management.

Key words: permafrost, temperature, thaw depth, monitoring, dynamics, terrain disturbance.

Введение

Проектирование, строительство и эксплуатация инженерных объектов в Центральной Якутии осложняется широким распространением многолетнемерзлых пород. Устойчивость мерзлотных ландшафтов при сельскохозяйственном и промышленном освоении определяется ведущими природными факторами: 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 процессы. Эти процессы приводят к изменению мерзлотно-ландшафтных условий территории и угрожают устойчивости сооружений.

Тепловое состояние грунтов является одним из основных характеристик геокриологических условий определяющих устойчивость инженерных объектов. Успешное решение различных аспектов строительства и эксплуатации линейных сооружений предусматривает количественную оценку пространственно-временной изменчивости термического режима грунтовых оснований с помощью информационной системы многолетних экспериментальных наблюдений.

Материалы и методы исследования

Многолетние исследования проводятся с 1987 г. в полосе проложения железнодорожной линии Томмот – Якутск, водовода Нижний Бестях – Майя, федеральной автодороги Лена, газопровода Таас Тумус – Якутск, линии электропередачи Нерюнгри – Нижний Бестях.

Прилегающая к линейным сооружениям территория характеризуется сложными геокриологическими условиями: распространением многолетнемерзлых пород, наличием водоносных таликов, развитием подземных льдов [1, 2].

Геокриологические исследования в естественных и нарушенных ландшафтах выполняются в шести типах местности: низкотеррасовом, песчано-грядовом, межгрядово-низинном, аласном, межаласном и плакорном. 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 соответствии с требованиями метода природных аналогий на основе организации длительных натурных исследований [3].

Наблюдательная сеть геотемпературного мониторинга охватывает более 130 естественные и нарушенные ландшафты, в том числе с удаленным напочвенным покровом – 5, на вырубках – 28, на горях – 12, на горях с вырубкой – 14. 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 и обсуждение

В Центральной Якутии со второй половины 60-х годов прошлого века наблюдается один из наиболее высоких в России тенденций повышения температуры воздуха [4]. Период с 1987 по 2016 гг. является одним из теплых за всю историю метеорологических наблюдений в г. Якутске: среднегодовая температура воздуха составила $-8,5$ °С при норме $-10,0$ °С. Оценка изменения среднегодовой температуры приземного воздуха в г. Якутске, составленная в Институте мерзлотоведения СО РАН, показывает превышение к 2050 г. среднегодовой температуры воздуха достигнутого климатического уровня не

более чем на 0,7–1,0 °С [5]. Закономерности формирования термического режима грунтов при антропогенных воздействиях являются наиболее достоверными при учете динамики температуры воздуха за холодный и теплый сезоны года, высоты снежного покрова и летних осадков.

Экспериментальные исследования позволили количественно оценить влияние антропогенных воздействий на термический режим грунтов на трассах линейных сооружений. В районе 77 км полосы федеральной автодороги Лена (Ф-56) в межгрядово-низинном типе местности на мари в июле 1990 г. был удален мохово-торфяной слой мощностью 0,15–0,25 м. По сравнению с естественными условиями среднегодовая температура грунтов на глубине 6 м повысилась на третий год на 4 °С, мощность сезонного талого слоя увеличилась в 1,6 раза и составила 1,5 м. Спустя 25 лет самовосстановление ерничково-березового молодняка сократило разницу среднегодовой температуры до 1,8 °С, мощность сезонного талого слоя не превышала 1,4–1,5 м, т.е. отмечается стабилизация теплового состояния грунтов.

В межлассном типе местности в 1992 г. при прокладке водовода Нижний Бестях – Майя для создания водохранилища Мундулах был вырублен лиственный лес с последующим нарушением напочвенного покрова. Через 24 года на просеке по сравнению с естественными условиями температура грунтов на глубине 10 м повысилась на 2 °С, а глубина сезонного протаивания увеличилась на 1,4 м и превышала 3 м. Такие изменения теплового состояния грунтов при близком залегании повторно-жильных льдов всего на глубине 2–2,5 м обусловили просадку поверхности до 0,6 м и более, развитие полигональной формы рельефа, угрожающей устойчивости водовода.

В районе пикета (ПК) 7309 на участке пересечения проектируемой трассы железной дороги и ручья Тарынг при прокладке лесовозной дороги на склоне межлассья в 1989 г. был удален бульдозером напочвенный покров. После выпадения обильных осадков в июне 1990 г. вдоль дороги началось развитие термоэрозии и, как следствие, - формирование оврага. Через 5 лет размеры оврага оказались следующими: длина – 340, ширина – 10 – 16, глубина до 6 метров. На участке конуса выноса образовался намыв грунтов толщиной 0,5 м и за 2 года погиб весь лес. На стадии развития травяного покрова спустя 4 года t_0 повысилась на 1,5 °С [2]. Спустя 20 лет на конусе выноса на стадии развития березово-кустарникового покрова при повторном колонковом бурении обнаружен сложный инженерно-геокриологический разрез. Мощность сезонно-

талого слоя составила 1,8 м. В интервале глубин 3,4–3,8 и 4,2–5,5 м сформировались талые прослойки грунтов – представляющие водооток, ослабляющие устойчивость грунтов.

Разнорезимные рубки лесов (выборочная, постепенная, сплошная) на участках, прилегающих к трассе железной дорожной линии АЯМ, приводят к изменению мерзлотных условий. В районе ПК 7810 на песчано-грядовом типе местности при сплошной рубке редкостойного соснового леса на стадии развития молодняка (10–30 лет) теплое состояние грунтов было близко к исходному. В районе ПК 7303 в межлассном типе местности при выборочной рубке лиственнично-соснового леса на березово-кустарниковой стадии развития (10–20 лет) t_0 понижается на 0,3–0,6 °С. В районе ПК 7309 постепенная рубка лиственничного леса на травяной (3–8 лет) и березово-кустарниковой стадиях (10–20 лет) развития приводит к повышению t_0 на 0,5–1,2 °С. В районе ПК 7270 на старой вырубке, на стадии восстановления березово-лиственничного молодняка (чаща) возрастом 10–30 лет t_0 понижается в среднем на 1 °С. На этом участке годовые циклы (2005–2008 гг.) с теплыми зимами и мощными снегоотложениями способствовали повышению t_0 на 2,1 °С. Малоснежные зимы 2009–2010 гг. привели к понижению t_0 .

С 2007 г. мониторинговые исследования организованы на трассе АЯМ в районе ледового комплекса со сложными геокриологическими условиями. Экспериментальные работы продолжаются на 8 поперечных профилях (ПК – 6926...7179) с 32 скважинами на свежих вырубках и, впоследствии, охватывающие травяную, березово-кустарниковую и березово-лиственничные стадии восстановления растительности. На просеке слева от железнодорожной линии повышение температуры грунтов на глубине 10 м по сравнению с естественными условиями можно оценить в пределах 0,3–0,8 °С. Вырубка леса справа от оси трассы без нарушения напочвенного покрова сопровождается увеличением ξ на 0,2–0,4 м. Увеличение ξ в 1,7–2,5 раза отмечается на просеке слева, что обусловлено нарушением и уничтожением напочвенного покрова при вывозке древесины и очистки участка методом пожогов. На просеках отчетливо наблюдается тенденция ежегодного увеличения слоя сезонного протаивания. На пятый год ξ на просеке слева составила 1,9 м и сопровождалась началом протаивания повторно-жильных льдов, залегающих с глубины 1,2–2,1 м (рис. 1). Здесь четко отмечается развитие тепловой просадки грунтов и криогенных процессов, угрожающих устойчивости железнодорожной насыпи.

ДИНАМИКА ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ НА ТРАССАХ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ



Рис. 1. Динамика глубины протаивания грунтов в лиственничнике и на просеках трассы железной дороги Томмот – Нижний Бестях (ПК 6934).

Наибольшая мощность сезонноталого слоя формируется на более освещенной просеке с западной стороны железнодорожной насыпи, а наименьшая – на затененной просеке с восточной стороны.

Типы лесов и напочвенных покровов по классам пожарной опасности в низкотеррасовом, межлассном и плакорном типах местности относятся к высокопожароопасным, в песчано-грядовом – к очень высокопожароопасным, в межгрядово-низинном – к среднепожароопасным. Влияние пирогенеза на температурный режим грунтов изучено наиболее детально в песчано-грядовом типе местности на 10 участках. На трассе ЛЭП Нерюнгри – Нижний Бестях пожар в сосновом лесу в июне 1987 г. уничто-

жил маломощный травяно-толокнянковый напочвенный покров и в последующем стал причиной вывала молодого древостоя. В течение первых 2 лет после пожара отмечается резкое повышение температуры грунтов на глубине 10 м (примерно на 1,5 °С). Начиная с 4-го года, на гаревом участке при постепенном самовосстановлении березово-кустарниковой растительности наблюдается стабилизация температуры грунтов, и ее значения не выходили за пределы -0,3...-0,4 °С (рис. 2).

Для количественной оценки влияния гари и вырубki леса на термический режим грунтов в низкотеррасовом типе местности в районе 1075 км автодороги Лена были организованы наблюдения в лиственничнике и на участках, где

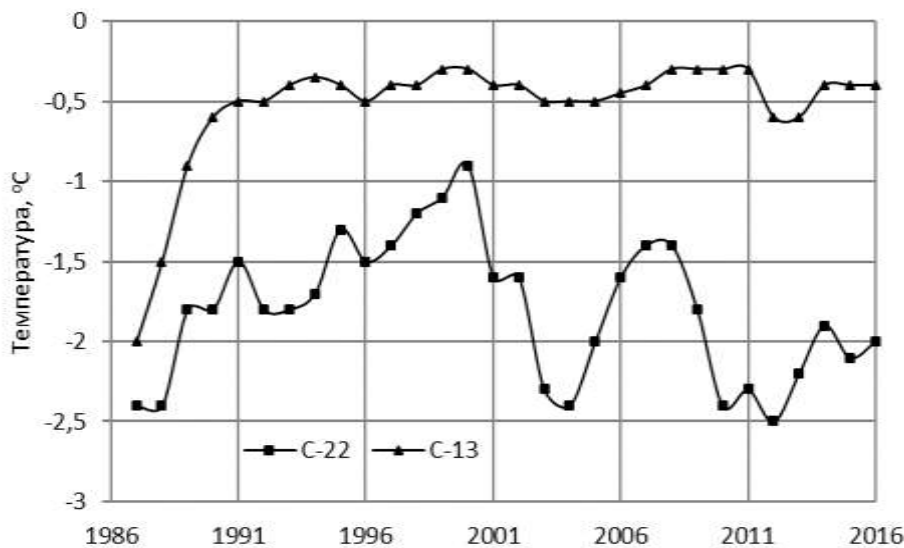


Рис. 2. Динамика среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м в сосняке (С-22) и на гари с вырубкой (С-13) в песчано-грядовом типе местности на трассе ЛЭП Нерюнгри – Нижний Бестях.

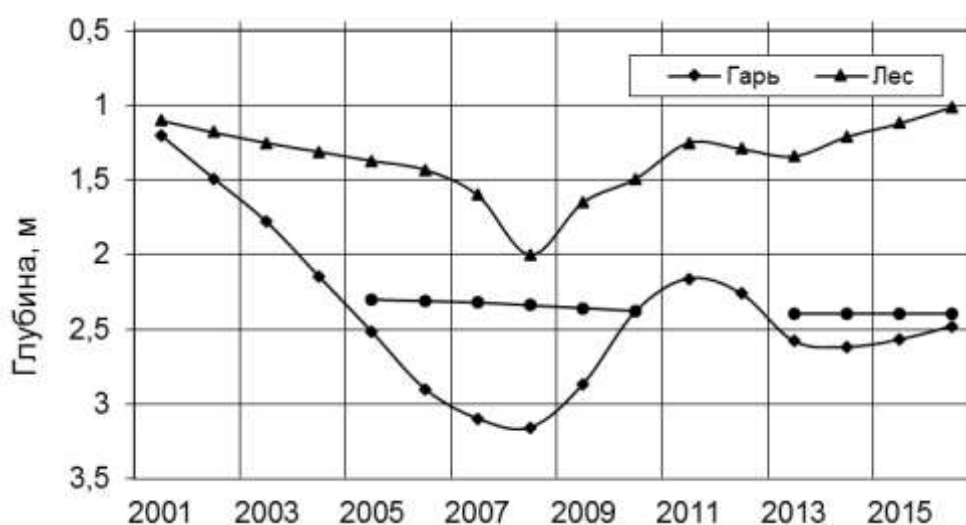


Рис. 3. Динамика глубины протаивания грунтов в лиственничнике и на гари с вырубкой на трассе газопровода Таас Тумус – Якутск.

после пожара 1986 г. проведена сплошная вырубка горелого лиственничного леса. Пирогенное воздействие и вырубка леса привели через год к повышению t_0 на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и увеличению ξ на $0,15\text{ м}$, а через 3 года – соответственно на $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0,43\text{ м}$. Через 20 лет после пожара в связи с самовосстановлением березово-лиственничной чащи понижение t_0 составило $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, но сохранилось увеличение ξ на $0,5\text{ м}$.

Влияние пожара и вырубки леса на тепловое состояние грунтов изучается по трассе газопровода Таас Тумус–Якутск в межлассном типе местности. В 2002 г. пожар в березово-лиственничном лесу привел к вывалу большей части древостоя. Уменьшение теплоизолирующего влияния уплотненного снежного покрова при зимней сплошной вырубке и вывозке лесоматериала привело к понижению через год среднегодовой температуры на глубине 15 м на $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. При залегании верхней кровли повторно-жильных льдов на глубине $2,5\text{ м}$ мощность сезоннопротаивающего слоя суглинистых грунтов с повышенной влажностью на гари увеличилась на $0,5\text{ м}$ по сравнению с контрольным участком. В конце многоснежной зимы 2005 г. на гари установлено формирование сезонномерзлого слоя мощностью $2,3\text{ м}$. Под этим слоем до верхней границы мерзлой толщи, залегающей на глубине $3,2\text{ м}$, образовался талик. В малоснежный 2010 г. отмечено полное промерзание талика, но в 2013 – 2016 гг. многоснежные и аномально теплые зимы вновь привели к формированию талого слоя (рис. 3). За 15 лет после техногенного воздействия глубина протаивания грунтов на гари по сравнению с естественными условиями увеличилась на $1,5\text{ м}$, температура грунтов на глубине 10 м повысилась на $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$,

тепловая просадка грунтов составила $0,07\text{ м}$. Начальная стадия формирования полигональной формы рельефа.

Выводы

На основе выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы.

Динамика термического режима грунтов на трассах линейных сооружений свидетельствует об их относительной устойчивости в песчано-грядовом и слабой устойчивости в межлассном типах местности.

Результаты исследований теплового состояния грунтов можно экстраполировать на аналогичные нарушенные ландшафты, прилегающие к линейным сооружениям.

Результаты исследований использованы при проектировании и строительстве трубопроводов, железной дороги, линии электропередачи.

Экспериментальные данные являются основой прогноза теплового состояния грунтов осваиваемых территорий и разработке природоохранных мероприятий.

Литература

1. Варламов С.П. Лыдность грунтов северного участка проектируемой железной дороги Томмот – Кердем (ст. Олень – ст. Кердем) // Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменения: Материалы международной конференции. Тюмень, 2006. Т. 2, с. 212 – 214.
2. Варламов С.П. Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии / Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н. - Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН. 2002. – 218 с.

3. *Скрябин П.Н.* Развитие наблюдательной сети термического мониторинга в Центральной Якутии // Криосфера Земли, 2001. Т. V, № 3, с. 56-62.

4. *Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Варламов С.П.* Изменчивость температуры грунтов слоя годовых теплооборотов в окрестностях г. Якутска за последние 40 лет // Современные проблемы теплофизики и теплоэнергетики в условиях Крайнего Севера: Материалы X научно-технической конференции памяти профессора Н.С. Иванова (Якутск, 2011 г.). Якутск, 2013. С. 113-122.

5. *Нерадовский Л.Г., Скачков Ю.Б.* Прогноз температуры воздуха в Якутии до 2050 г. // Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы IX Международного симпозиума (Мирный, 2011 г.). Якутск, 2011. С. 389-393.

References

1. *Varlamov S.P.* L'distost' gruntov severnogo uchastka proektiruemoj zheleznoj dorogi Tommot – Kerdem (st. Olen' – st. Kerdem) // Teoriya i praktika ocenki sostoyaniya kriosfery Zemli i prognoz ee

izmeneniya: Materialy mezhdunarodnoj konferencii. Tyumen, 2006, vol. 2, pp. 212 – 214.

2. *Varlamov S.P.* Temperaturnyj rezhim gruntov merzlotnyh landshaftov Central'noj Yakutii / Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Yakutsk: Izd. Instituta merzlotovedeniya SO RAN, 2002, p. 218.

3. *Skryabin P.N.* Razvitie nablyudatel'noj seti termicheskogo monitoringa v Central'noj Yakutii // Kriosfera Zemli, 2001, vol. 5, № 3, pp. 56-62.

4. *Skachkov YU.B., Skryabin P.N., Varlamov S.P.* Izmenchivost' temperatury gruntov sloya godovyh teplooborotov v okrestnostyah Yakutska za poslednie 40 let // Sovremennye problemy teplofiziki i teploenergetiki v usloviyah Krajnego Severa: Materialy H nauchno-tehnicheskoy konferencii pamyati professora N.S. Ivanova (Yakutsk, 2011). Yakutsk, 2013, pp. 113-122.

5. *Neradovskij L.G., Skachkov Y.B.* Prognoz temperatury vozduha v YAkutii do 2050 g. // Problemy inzhenernogo merzlotovedeniya: materialy IX Mezhdunarodnogo simpoziuma (Mirnyj, 2011), Yakutsk, 2011, pp. 389-393.

Поступила в редакцию 15.05.2017