УДК 551.345

# ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НА УЧАСТКЕ РАЗВИТИЯ ПОРОД ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА В ПОЛОСЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ТОММОТ – ЯКУТСК

**Варламов С.П.**

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

Представлены результаты многолетних экспериментальных наблюдений за тепловым состоянием грунтов основания и тела земляного полотна с широким применением сезонных охлаждающих устройств (СОУ) и теплоизоляционных материалов. Исследования выявили, что высокая насыпь в годовом цикле оказывает слабое охлаждающее влияние на грунты его основания, чем низкая. На насыпи, отсыпанной в холодный период, наблюдается поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород, при этом, чем выше высота насыпи, тем интенсивнее скорость ее поднятия. При отсыпке нулевой насыпи в теплый период с удалением сезонно-талого слоя в её основании формируется многолетняя чаша протаивания. Наблюдается деградация мерзлых пород ледового комплекса на бортах и водоотводных канавах выемок. Применение СОУ и пеноплекса показали свою эффективность. Рекомендованы методы для понижения температуры грунтов и уменьшения сезонного протаивания в теле земляного полотна.

**Ключевые слова: земляное полотно, ледовый комплекс, температурный режим грунтов, сезонные охлаждающие устройства, теплоизоляционный материал**

# GEOCRYOLOGICAL MONITORING AT THE ICE-RICH SECTION OF THE TOMMOT-YAKUTSK RAILROAD

**Varlamov S.P.**

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

This paper reports the results of long-term experimental observations on the thermal state of foundation and embankment soils with the wide use of thermosyphons and insulation materials. Field studies have demonstrated that the annual cooling effect of higher embankments is less than that of lower embankments. Winter placement of embankment material results in rising of the permafrost table, with the rate of rise being greater for higher embankments. The placement of a zero embankment in summer with removal of the active layer results in the development of a perennial thaw bulb. Degradation of ice-rich permafrost is observed on the slopes and ditches in the cut sections. Thermosyphons and Penoplex insulation have proven effective. Additional measures are recommended to lower ground temperatures and reduce seasonal thaw in the roadway.

**Keywords: roadway, ice-rich permafrost, ground temperature regime, thermosyphon; insulation**

Железнодорожная линия Томмот – Нижний Бестях, проектированная по I принципу пересекает на 692-734 км участок распространения пород ледового комплекса, где льдистость верхней 10-15-ти метровой толще достигает 0,7–0,8 долях единицы [1, 3]. Это наиболее сложный для строительства и эксплуатации железной дороги участок. Проблемы ледового комплекса рассматривались на научно-техническом совете и семинаре-совещании, проведенных в г.Якутске [2, 4]. По итогам обсуждений принято решение организовать систему инженерно-геокриологического мониторинга на стадии строительства и эксплуатации железной дороги на этом участке, как опытного полигона железнодорожного строительства в экстремальных условиях. После первых лет эксплуатации железной дороги предусматривается проектирование дополнительных мероприятий, обеспечивающих устойчивость земляного полотна. Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН с 2007 г. проводит на этом участке экспериментальные исследования за тепловым состоянием грунтов основания земляного полотна и прилегающей к трассе территории. Одной из основных задач исследований является оценка теплового состояния грунтов оснований насыпей различными конструкциями на стадиях строительства и эксплуатации железной дороги. Экспериментальные наблюдения проводятся на земляном полотне с высокими, низкими и нулевыми насыпями, где широко применяются сезонные охлаждающие устройства (СОУ) и теплоизоляционные материалы.

## Организация наблюдательной сети и особенности строительства насыпей

Для проведения инженерно-геокриологического мониторинга в системе железнодорожное полотно – окружающая среда в 2007-2010 гг. были оборудованы 9 поперечных профилей в районе пикетов (ПК): 6924, 6926, 6932, 6934, 7087, 7088, 7089, 7175, и 7179. Бурение 45 скважин и их оборудование для режимных температурных

наблюдений под основания земляного полотна были проведены после вырубки просек трассы и до начала их отсыпки, в районе ПК: 6924, 7005 – после сооружения выемок, 7179 – после возведения нулевой насыпи, а на окружающей территории (просека, лес) во время возведения насыпей. Объектами исследований являются насыпи и грунты их основания до глубины 5-10 м. Регистраторами температуры грунтов используются полупроводниковые терморезисторы ММТ-4 с точностью измерений 0,1°С. Замеры температуры грунтов в скважинах проводятся стационарно установленными терморезисторными гирляндами. В устройстве термической обсадки скважин и отводов термогирлянд из-под будущих насыпей железнодорожного полотна были использованы полипропиленовые трубы.

Следует отметить, что процессы отсыпки насыпи были произведены круглогодично. В конце теплого периода 2010 г. строителями сооружены из скального грунта насыпи разных конструкций в районе следующих пикетов:

ПК: 6924, 7005 – насыпи на выемках;

ПК 6926 – насыпь высотой 7 м с установкой на бермах сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ) до глубины 4 м;

ПК 6932 – насыпь высотой до 2,5-3,0 м с установкой на бермах СОУ и укладкой на основании бермы и насыпи теплоизоляционного материала из пеноплекса толщиной 5 см и шириной 8 м;

ПК 6934 – насыпь высотой 7 м;

ПК 7087 – насыпь высотой 2,5 м с субвертикальными охлаждающими откосами;

ПК 7088 – насыпь высотой 2,5-3,0 м с консольным солнцезащитным и снегоудерживающим навесом на откосах;

ПК 7089 – насыпь высотой до 2,5 м с установкой на бермах СОУ и укладкой на основании бермы и насыпи теплоизоляционного слоя пеноплекса;

ПК 7175 сооружено земляное полотно сложной конструкции. Насыпь высотой 2-2,5 м отсыпана с частичным удалением грунта деятельного слоя. Слева насыпи отсыпана высокая берма высотой до 5 м, справа – берма высотой до 3 м. Под бермами и насыпью уложены гофрированные трубы для дренажа и охлаждения грунтов основания насыпи;

ПК 7179 сооружена нулевая насыпь из скального грунта мощностью 2,2 м с заменой грунта сезоннопротаивающего слоя.

**Результаты исследований**

В районе ПК 6924 температурный режим грунтов после строительства земляного полотна железной дороги на участке выемки резко изменился в сторону потепления. Сравнение температурных данных в период изысканий в 2005 г. (С-281/05) и после строительства земляного полотна в 2013 г. показало, что температура грунтов левого борта откоса выемки на глубинах 2,5; 5 и 10 м за это время повысилась соответственно на 4,3; 1,7 и 1,1 °С, слева на валике на 1,1; 1,0 и 0,5 °С (рис. 1). В 2013 г. по температурным данным мощность сезонноталого слоя в лесу составила 0,8 м, на валике – 2,3 м и на левом борте откоса выемки – 3,3 м, что свидетельствует о деградации многолетней мерзлоты на прилегающем участке выемки, угрожающей устойчивости земляного полотна.

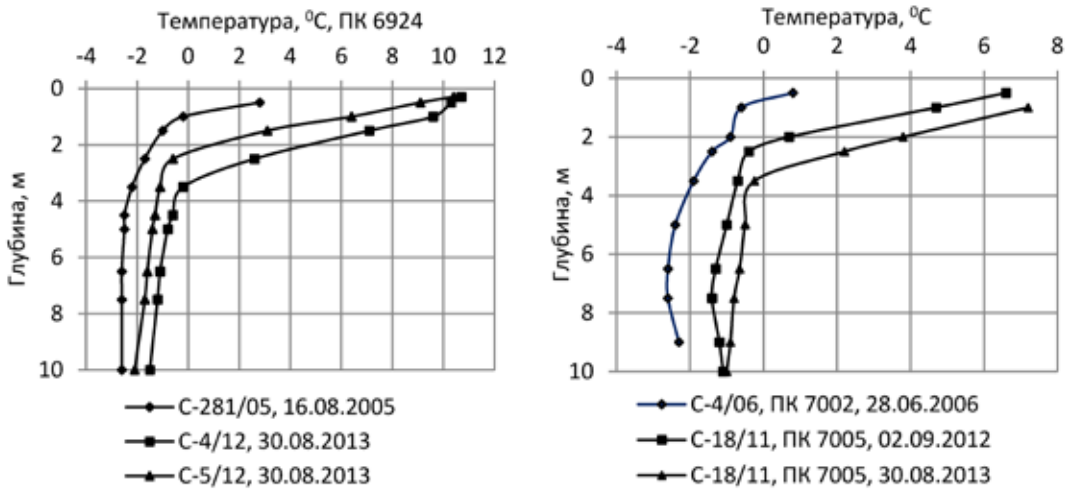


*Рис. 1. Изменение температуры грунтов по глубине в естественных условиях (С-281/05; С-4/06), у борта выемки (С-4/12), на валике (С-5/12) и на дне выемки (С-18/11) в районе ПК: 6924, 7002, 7005*

В районе ПК 7005 в 2011 г. была пробурена скважина на дне выемки. Здесь мощность каменной отсыпки составляет 2 м. Температура грунтов на глубине 10 м была равной -1,2 °С. В 2012 и 2013 г.г. по температурным данным мощность сезонного протаивания соответственно составила 2,2 и 3,3 м, температуры на глубинах 5 и 10 м были соответственно: в 2012 г. – -1,0 и -1,1 °С; в 2013 г. – -0,5 и -1,0 °С. В 2006 г. по данным изысканий на этом участке (ПК 7002, С-4/06) в естественных условиях в лесу на этих глубинах температуры грунтов соответствовали -2,4 и -2,1 °С. Итак, за 7-летний период под выемкой температура многолетнемерзлых пород на глубинах 5 и 10 м повысилась на 1,8 и 1,3 °С, что показывает о тенденции опасности устойчивости земляного полотна (см. рис. 1).

В районе ПК 6926 на мари вырубка просеки трассы проведена весной до схода снежного покрова. В сентябре 2007 г. мощность сезонноталого слоя составила 1,02-1,12 м, температура грунтов на глубинах 1,5, 3,0 и 5,0 м соответственно изменяется в пределах –0,3…–0,6; –1,3…–1,6 и –1,9…–2,7 °С. В 2008 г. мощность сезонноталого слоя увеличилась по сравнению с предыдущим сезоном на 0,1-0,2 м, температура грунтов в глубинах 3 и 5 м повысилась на 0,1 и 0,2–0,3 °С. В апреле 2009 г. на этом участке строители начали отсыпку насыпи до отметки высотой 1,5-2,0 м. Температура грунтов по сравнению с предыдущей зимой охладилась на глубинах 3 и 5 м на 3,1-3,6 и 1,0-1,9 °С. К осени верхняя граница многолетнемерзлых пород оказалась приподнятой под осью земляного полотна на 1,0 м, а под бермами на 0,5 м. Температура грунтов под основания насыпи на отметках 1,5, 3,0 и 5,0 м составила соответственно до –1,4…–1,5; – 2,4 и -2,4…–3,2 °С. К концу теплого периода 2010 г. после возведения 7 метровой насыпи под ним ещё остается талый слой мощностью 0,3-0,5 м, хотя температура грунтов под основанием насыпи еще имеет тенденцию к охлаждению. Интенсивный охлаждающий эффект в первый год, по-видимому, объясняется отсыпкой насыпи в зимнее время на мерзлые грунты, а потеря этого эффекта на второй год – отепляющим влиянием тела высокой насыпи на подстилающие грунты в предыдущий летний сезон. За период 2010-2013 г.г. верхняя кровля многолетней мерзлоты под основаниями семиметровой насыпи с бермами по оси трассы по температурным данным приподнялась выше уровня поверхности перед отсыпкой насыпи, т.е. находится уже в теле насыпи (рис. 2). Грунты основания имеют тенденцию к охлаждению и свидетельствуют об устойчивости земляного полотна.

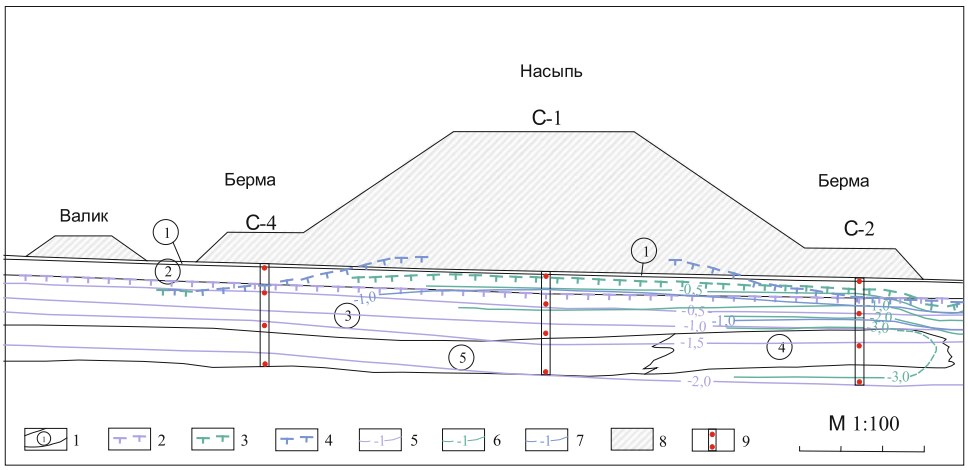


*Рис. 2. Изменения термоизоплет грунтов и верхней границы многолетнемерзлых пород под основаниями насыпей в районе ПК 6926:*
*1 – номер слоя грунтов: 1 – почвенно-растительный слой насыщенный водой, льдистость (δ) – 0,10, 2 – суглинок текучий δ-0,24, 3 – суглинок тугопластичный δ-0,10, 4 – лёд, 5 – суглинок текучий δ-0,77; верхняя граница многолетнемерзлых пород: 2 – в 2007 г., 3 – в 2011 г., 4 – в 2013 г.; термоизоплеты грунтов: 5 – в 16.09.2007 г., 6 – 17.09.2011 г., 7 – в 30.08.2013 г.; 8 – скальный грунт с заполнителем до 10 %; 9 – термометрическая скважина*

В районе ПК 6932 вырубка просеки трассы проведена весной до схода снежного покрова. В 2007 г. мощность сезонно–талого слоя составила 0,72–0,92 м, температура грунтов на глубинах 1,5, 3,0 и 5,0 м соответственно изменяется в пределах –0,5…–0,8; –1,2…–1,4 и –1,8…–2,0 °С. В 2008 г. мощность сезонноталого слоя увеличилась по сравнению с предыдущим сезоном на 0,21–0,42 м, температура грунтов в глубинах 3 и 5 м повысилась на 0,1–0,2 и 0,2–0,3 °С. Здесь слабая интенсивность накопления холода грунтами, по сравнению с маревым участком (ПК 6926), объясняется более поздними сроками смыкания фазовых границ, обусловленными увеличением мощности сезонноталого слоя после вырубки леса. В зиму 2008/2009 гг. во время отсыпки в телах бермы и насыпи были уложены теплоизоляционные материалы из пеноплекса. Грунты основания насыпи заметно начали аккумулировать холод до глубины 4–5 м. К концу летнего периода 2009 г. по температурным данным верхняя граница многолетнемерзлых пород на оси трассы была приподнята на 1 м, а под откосами бермы заметно меньше (0,5 м). В зиму 2009/2010 гг. грунты под основаниями насыпи охладились по–разному. Так, на глубинах 0,2, 1,5, 3,0 и 5,0 м температура грунтов достигала по оси трассы –6,0, –3,4, –1,9 и –1,6 °С, под откосами правой бермы –8,6, –6,4, –4,2 и –2,7 °С и левой бермы –4,6, –2,8, –1,3 и –1,4 °С. По сравнению с предыдущей зимой грунты под правой бермой на глубине 5 м охладились на 1,2 °С, а под осью трассы и под левой бермой температуры повысились соответственно 0,1 и 0,2 °С. Это, по-видимому, объясняется скоплением надмерзлотных вод сезонноталого слоя у левой бермы и теплоизолирующей ролью пеноплекса под осью трассы. В конце летнего сезона по температурным данным под осью трассы и под откосами берм верхняя граница многолетнемерзлых пород сохранилась на уровне предыдущего сезона. Температура грунтов под правой бермой в 5-метровом слое понизилась по сравнению с предыдущим сезоном на 0,1–0,3 °С, а под основанием левой бермы повысилась на 0,1–0,8 °С и под осью насыпи – на 0,1 °С. В зиму 2010/2011 гг. на бермах были установлены сезонноохлаждающие устройства (СОУ). По оси земляного полотна, начиная с 2010 г. отмечается четкая тенденция к охлаждению грунтов основания насыпи. Более заметное охлаждение грунтов наблюдается под затененной бермой справа. Под более открытой левой бермой отмечается слабое охлаждение грунтов (рис. 3). Тепловое состояние земляного полотна оценивается как устойчивое.

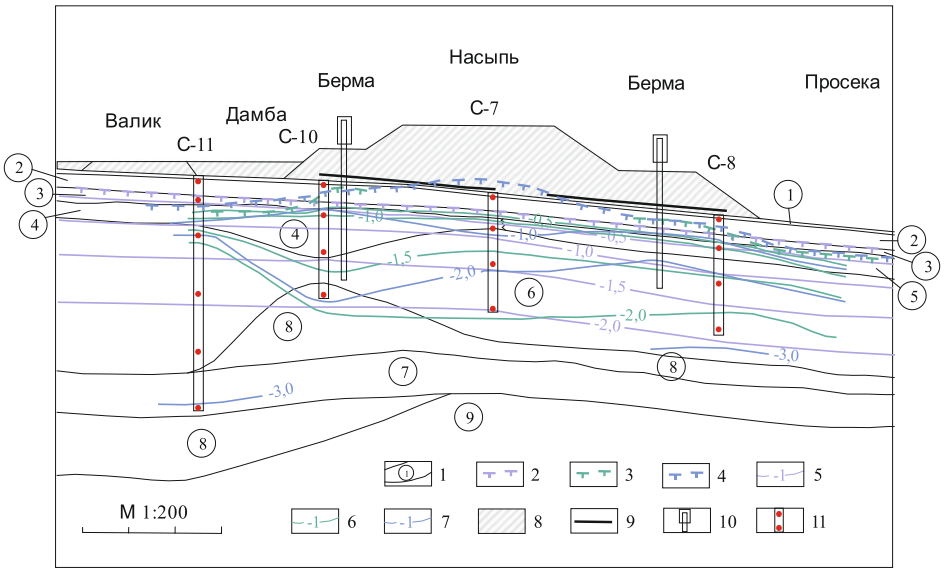


*Рис. 3. Изменения термоизоплет грунтов и верхней границы многолетнемерзлых пород под основаниями насыпей в районе ПК 6932:*
*1 – номер слоя грунтов: 1 – почвенно-растительный слой δ-0,12, 2 – суглинок мягкопластичный δ-0,12, 3 – суглинок текучий (льдистый) δ-0,60, 4 – суглинок мягкопластичный δ-0,04, 5 – суглинок текучий δ-0,27, 6 – лёд δ-0,95, 7 – ледогрунт δ-0,70, 8 – суглинок текучий (льдистый) δ-0,52, 9 – супесь пластичная δ-0,09; верхняя граница многолетнемерзлых пород: 2 – в 2007 г., 3 в 2011 г., 4 – в 2013 г.; термоизоплеты грунтов: 5 – в 23.09.2007 г., 6 – в 17.09.2011 г., 7 – в 30.08.2013 г.; 8 – скальный грунт с заполнителем до 10 %; 9 – теплоизолирующий слой из термоплекса; 10 – сезонноохлаждающее устройство (СОУ); 11 – термометрическая скважина*

На участке распространения пород ледового комплекса при возведении земляного полотна широко использовался теплоизоляционный материал из пеноплекса. Экспериментальные наблюдения в скважинах на бермах пикетов 6932 и 6935 показали, что теплоизоляционная эффективность его зависит от глубины укладки. Так, в первый год укладки его на глубине 0,7 м мощность сезонного протаивания грунтов под бермой ПК 6935 составила 1,70 м, а при укладке на глубине 1,1 м (ПК 6932) – 1,95 м. Спустя 3 года, по температурным данным, на берме ПК 6935 верхняя кровля многолетнемерзлых пород приподнялась до уровня укладки пеноплекса (0,7 м), а на берме ПК 6932 она осталась в таком же уровне (1,95 м). Трехгодичный цикл наблюдений в термометрических скважинах с разной удаленностью от СОУ показали, что охлаждающий эффект его на расстоянии 0,5 м заметное, а на удалении 1,3 м резко снижается. Экспериментами установлено эффективность использования пеноплекса и СОУ для обеспечения устойчивости земляного полотна.

В районе пикета 7179 бурение и оборудование термических скважин произведено в конце августа 2009 г. после выемки грунтов сезоннопротаивающего слоя и возведения нулевого земляного полотна. При бурении скважин глубина протаивания от поверхности насыпи составляла 2,5-3,0 м при мощности скального грунта 2,2 м. Итак, здесь были созданы условия формирования чаши протаивания грунтов в основании насыпи. Это подтверждают и температурные данные. Так, в зимний сезон в теле насыпи на глубине 1,5 м температура понижается до -5,0 °С, а в летний сезон она повышается до 4,3-7,1 °С, и грунты на глубине 5 м остаются стабильно высокотемпературными (–08…–1,5 °С). По расчётам нулевая изотерма находится на глубине 2,8–3,2 м и, по-видимому, здесь промерзающий слой не смыкается с многолетнемерзлыми породами. В 2013 г. в конце теплого сезона температура грунтов на глубине 5 м составила –0,8 и –1,5 °С. Натурными наблюдениями установлена недопустимость летней отсыпки насыпи, которая сопровождается ослаблением устойчивости земляного полотна.

## Выводы

1. Оценка изменений теплового состояния грунтов в период строительства и временной эксплуатации железной дороги выявила начала деградации мерзлых пород ледового комплекса на бортах и в водоотводных канавах выемок.

2. Возведение насыпи в холодный период способствует поднятию верхней границы многолетнемерзлых пород, при этом, чем выше высота насыпи, тем интенсивнее скорость ее поднятия. На выемках при отсыпке нулевой насыпи в теплый период с удалением сезонноталого слоя в её основании формируется многолетняя чаша протаивания, угрожающая устойчивости основания насыпи.

3. Возведение высокой насыпи в годовом цикле оказывает слабое охлаждающее влияние на грунты его основания, а низкой – наоборот, сильное.

4. Установка сезоннoохлаждающих устройств (СОУ) и укладка пеноплекса вызывают заметное охлаждение грунтов под правой затененной бермой (нижнесклоновая часть), слабое – под более открытой левой (верхнесклоновая часть). Применение СОУ и пеноплекса показали свою эффективность.

5. Грунты под правым затененным откосам основания насыпи (нижнесклоновая часть) имеют тенденцию к охлаждению. Под левым (с верхнесклоновой стороны) более открытым откосам оснований установлено опускание верхней кровли мерзлоты под отепляющим влиянием поверхностных вод.

6. Для предотвращения повышения температуры грунтов основания и увеличения мощности сезоннопротаивающего слоя у более открытого основания левой части земляного полотна рекомендуется установить дополнительные сезонные охлаждающие устройства (СОУ) – термостабилизаторы. Для обеспечения устойчивости земляного полотна рекомендуются методы тепловой мелиорации: регулярное удаление снежного покрова или его уплотнение.

7. Экспериментальные исследования земляного полотна в период строительства и временной эксплуатации выявили участки, угрожающие устойчивости основания насыпи и подверженные к опасным деформациям. Рекомендуется необходимость продолжения инженерно-геокриологического мониторинга и ежегодного обследования земляного полотна всей трассы.

## Список литературы

1. Варламов С.П. Льдистость 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, 29-31 мая, 2006 г.). – Тюмень, 2006. – Т. 2. – С. 212–214.

2. Обеспечение надежности строящихся сооружений железнодорожной линии Томмот-Кердем на участке «ледового комплекса» // Материалы семинара-совещания (Якутск, 11-12 сент. 2007 г.). – Якутск, 2007. – 165 с.

3. Позин В.А., Королев А.А., Наумов М.С. «Ледовый комплекс» Центральной Якутии как опытный полигон железнодорожного строительства в экстремальных инженерно-геокриологических условиях // Инженерная геология. – 2009. – № 1. – С. 12–18.

4. Проектирование и строительство земляного полотна железной дороги Томмот-Кердем в сложных инженерно-геокриологических условиях. Итоги инженерных изысканий в 2005 г. // Материалы научно-технического совета (Якутск, 7–8 дек. 2005 г.). – М., 2005. – 118 с.