

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.28>

**СОСТАВЛЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ КАРТ КЛЮЧЕВЫХ УЧАСТКОВ
АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ РЕСПУБЛИКАНСКОГО ЗНАЧЕНИЯ**

Научная статья

Шестакова А.А.^{1,*}, Торговкин Я.И.²

¹ ORCID : 0000-0002-0648-0362;

² ORCID : 0000-0002-7146-0798;

^{1,2} Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск,
Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (aashest[at]mail.ru)

Аннотация

Инженерно-геокриологические условия автодороги «Амга» определялись по ключевым участкам А-1 и А-2. Для выявления ландшафтного разнообразия в пределах исследуемых ключевых участков проведена крупномасштабная ландшафтная съемка, в ходе которой были определены естественные и антропогенные природно-территориальные комплексы. На основе фондовых, литературных данных и фактических материалов, полученных во время полевых работ составлены инженерно-геокриологические карты ключевых участков масштаба 1:2 000. Сопоставлены результаты буровых работ и геофизических исследований, которые подтвердили повсеместное распространение повторно-жильных льдов на ключевом участке А-1 и развитие сильнольдистых аласных отложений на ключевом участке А-2.

Ключевые слова: криогенные процессы, мерзлотные ландшафты, температура многолетнемерзлых пород, инженерно-геокриологическая карта, термокарст.

**COMPILATION OF ENGINEERING AND GEOCRIOLOGICAL MAPPING OF THE KEY SECTIONS OF THE
AMGA HIGHWAY**

Research article

Shestakova A.A.^{1,*}, Torgovkin Y.I.²

¹ ORCID : 0000-0002-0648-0362;

² ORCID : 0000-0002-7146-0798;

^{1,2} P.I. Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

* Corresponding author (aashest[at]mail.ru)

Abstract

The engineering and geocryological conditions of the Amga highway were determined for the key sections A-1 and A-2. To identify landscape diversity within the studied key areas, a large-scale landscape survey was carried out, during which natural and anthropogenic natural-territorial complexes were identified. On the basis of stock, literature data and actual materials obtained during field work, Engineering and geocryological maps of key areas at a scale of 1: 2,000 were compiled. The results of drilling and geophysical studies were compared, which confirmed the widespread distribution of re-veined ice in the key area A-1 and the development of ice-rich alas deposits in the key area A-2.

Keywords: cryogenic processes, permafrost landscapes, permafrost temperature, geocryological engineering map, thermokarst.

Введение

Совместное влияние техногенного и климатического факторов уже привело и может привести в отдельных районах криолитозоны к ряду экологических катастроф и крупных аварий на природно-технических системах, в частности к деформациям на автомобильных дорогах. В настоящее время на опытно-экспериментальных полигонах сети автомобильных дорог регионального значения, куда входят и ключевые участки А-1 и А-2, активно ведется инженерно-геокриологический мониторинг. Целью работы является составление инженерно-геокриологических карт ключевых участков автомобильной дороги «Амга», которые необходимы для дальнейшего изучения устойчивости земляного полотна в криолитозоне Республики Саха (Якутия).

Около 100 км автодороги «Амга» пролегает по территории широкого распространения ледового комплекса. Согласно районированию по Мерзлотно-ландшафтной карте [1], [2], [3] автодорога «Амга» находится в пределах Лено-Амгинской среднетаежной аласной провинции сплошных многолетнемерзлых пород (ММП), в пределах Тюнгулюнской и Абалахской террас р. Лены. На территории Абалахской террасы р. Лены особенно широко развиты повторно-жильные и текстурообразующие льды. В среднем вертикальная мощность ледяных жил колеблется от 15 до 25 м, ширина достигает 6-7 м. В то же время встречаются крупные жильные льды с мощностью 40-65 м, которые были вскрыты бурением на межлаласьях в сингенетически промерзших супесчано-суглинистых отложениях [4]. Объемная льдистость пород верхних 5-8 метров толщи ледового комплекса в среднем составляет 60-70%.

Методы и принципы исследования

Ключевые участки выбирались таким образом, чтобы с учетом сложности территории по геокриологическим условиям можно было оценить их оптимальное количество с учетом набора максимально неблагоприятных природных компонентов для эксплуатации автодороги. В ходе маршрутных исследований интервалы основных и дополнительных точек наблюдения определялись конкретными условиями и сложностью того или иного участка автодороги. На поперечниках основные точки наблюдения обычно располагаются вне трассы через 20-25 м, на дорожной инфраструктуре площадки у подножья насыпи, оси автодороги и ограничивается внешними границами площадки. вспомогательные точки обычно намечаются на участках изменения ландшафтных и геокриологических условий, при фиксации значимых геологических процессов и явлений (образований), в пунктах начала и окончания маршрутов.

Ключевой участок А-1 расположен на 37-39 км автомобильного тракта «Амга» и находится в урочище Чюйя в Абалахской надпойменной террасе Лено-Амгинского междуречья. Автодорога здесь пролегает почти по бровке борта аласной котловины с крупным озером. Днище этой термокарстовой впадины находится гипсометрически на 10 м ниже от уровня межаласья. Склоны аласа довольно крутые и осложнены байджерами. Во время проведения буровых работ на этом участке во всех скважинах были вскрыты повторно-жильные льды с вертикальной мощностью 9-12 м. Скважины были пробурены на краю проезжей части в 2 м от бровки насыпи. Высота земельного полотна здесь составляет 0,8, ширина проезжей части – около 10 м. Под покровными суглинками на глубине 2,7 м вскрыта кровля повторно-жильного льда. Нижний конец ледяной жилы выклинивается в мелкозернистых песках на глубине 14,2 м.

Ключевой участок А-2 расположен на 74-75 км автодороги «Амга» в Абалахской надпойменной террасе Лено-Амгинского междуречья. Основным типом рельефа является эрозионно-аккумулятивный и термокарстовый (аласный). При проведении буровых работ на территории ключевого участка были вскрыты аласные отложения. Эти образования не содержат крупные тела подземного льда, но за счет содержания большого количества текстурообразующего льда относятся к сильнольдистым грунтам. Мощность толщи аласных отложений на этом участке по данным бурения колеблется от 7,5 до 11,0 м. Так, аласные отложения вскрыты на интервале глубин от 2,2 до 12,3 м и представлены сильнольдистыми илистыми суглинками серого цвета.

Для выявления ландшафтного разнообразия в пределах исследуемых ключевых участков А-1 и А-2 в июне-июле 2020 года проведена крупномасштабная ландшафтная съемка. Схема расположения точек заранее определялась по топокарте и космоснимкам дешифровочных признаков. Описание опасных участков производилось на уровне фации, наименьшей единице классификации ландшафтов [5], [6] и сопровождалось определением состава древостоя, его высоты и диаметра стволов, сомкнутости крон, состава подроста с определением его густоты, состава кустарникового яруса с определением покрытия, типа травяно-кустарничкового яруса с определением состава флоры и мохового, лишайникового покровов и их проективного покрытия, определения микрорельефа поверхности. Полевые обследования ландшафтов на ключевых участках проводились пешим маршрутом вдоль дороги с фотографированием ландшафтов и криогенных процессов, а также дистанционным фотографированием и видеосъемкой беспилотным летающим аппаратом (квадрокоптером).

Количественные данные по изменению состояния основных компонентов сезонной и многолетней мерзлоты (глубины сезонного промерзания и протаивания, средней годовой температуры на границе деятельного слоя и многолетней мерзлоты, температуры на подошве слоя годовых теплооборотов, криогенного пучения грунтов, подземных вод (вод сезонно-талого слоя)) послужили основой для составления инженерно-геокриологических карт ключевых участков масштаба 1:2 000 с применением ГИС-технологий. Составление и оформление цифровых карт проводилось с применением программы ArcGIS. В основном были использованы ортофотопланы и цифровые модели рельефа с разрешением 1,5 см/пикс., полученные во время съемки с помощью БПЛА DJI Phantom 4. К картам составлены таблицы, в которых представлены основные характеристики мерзлотных ландшафтов.

Геофизические исследования проводились с применением метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) в модификации электротомографии (ЭТ) и георадиолокации. Так, на участке А-1 выполнено 4 геофизических профиля. Два профиля по левой и правой обочине дороги протяженностью 188 м и два профиля перпендикулярно по 126 м. Профиля 0 и 1 имеют схожее двухслойное строение. В верхней части залегают низкоомные грунты (до 300 Ом·м) представленные суглинками, мощностью до 3 м. Ниже залегает лед, имеющий очень высокие значения удельного сопротивления (50 000 – 150 000 Ом·м). Из-за высоких значений сопротивления нижележащие слои не выделяются и были нарисованы условно по скважинам. На профиле два, проходящем от дороги в сторону аласа, так же выделяется в верхней части слой глин и суглинков, который залегает на льдах, ниже залегают различные по крупности пески. Профиль 3 имеет более сложное строение. В верхней части выделяются глинистые и песчаные грунты, которые залегают на льду, и песках. На расстоянии 70-80 м от начала профиля на глубинах 10-20 м залегают супесь, которая выделилась по низким значениям удельного сопротивления.

На участке А-2 выполнено 4 геофизических профиля. Два профиля по левой и правой обочине дороги, протяженностью по 252 м. И два профиля перпендикулярно дороге, протяженностью по 126 м. Профиль 0 и 1 имеют схожее трёхслойное строение. В верхней части выделяются супеси мощностью до 2-3 м. Ниже залегают сильнольдистые суглинки мощностью до 12-13 м. Нижние слои представлены пылеватыми песками и суглинками. Профиль 2 сложен в верхней части супесями, которые залегают на сильнольдистых суглинках, а местами на пылеватых песках и суглинках. Профиль 3 проходил через край термокарстового озера. Под озером выделяется талик до 10 м. Верхняя часть разреза представлена супесями, которые залегают на сильнольдистых суглинках.

Основные результаты

Естественные природно-территориальные комплексы (ПТК) прилегающие к автодороге в пределах ключевого участка А-1, в основном представлены разнотравно-злаковыми лугами на межаласном и аласном типах местности (рис. 1).

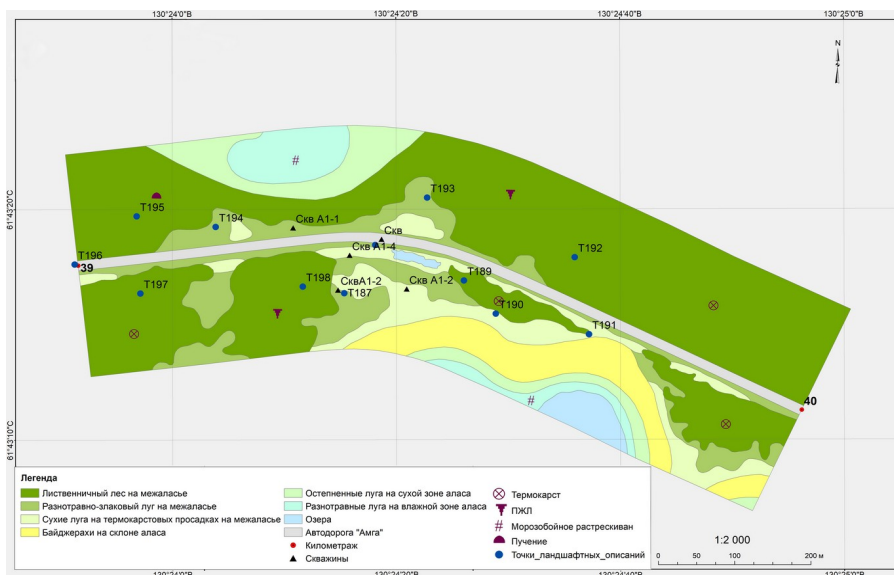


Рисунок 1 - Инженерно-геокриологическая карта участка А-1 автодороги «Амга»
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.28.1>

Антропогенные комплексы сформированы вдоль автодороги в виде термокарстовых просадок и заболоченных участков. В Центральной Якутии термокарст является одним из ведущих инженерно-геологических процессов [7], [8], [9]. Он вызывает коренное изменение строения ледового комплекса, приводит к образованию глубоких просадочных и провальных форм рельефа [4]. П.А. Соловьев дал первое определение отложениям термокарстовых форм рельефа и назвал их аласными [10].

На Инженерно-геокриологической карте ключевого участка А-1 масштаба 1:2 000 (рис. 1) многолетнемерзлые породы мощностью 280-300 м имеют сплошное распространение, отложения представлены суглинками и супесями. Всего на карте выделено 6 природно-территориальных комплексов:

- 1) лиственный лес на межаласе с температурой пород $-2,8^{\circ}\text{C}$, мощностью сезонно-талого слоя (СТС) 0,8-1,2 м, распространены термокарст и пучение;
- 2) разнотравно-злаковый луг на межаласе с температурой пород -2°C , мощностью СТС до 2 м, распространены морозобойное растрескивание и пучение;
- 3) сухие луга на термокарстовых просадках на межаласе мощностью СТС 1,-2,0 м, распространены термокарст и пучение;
- 4) байджехахи на склоне аласа мощностью СТС 2,0,-2,5 м, распространены термокарст;
- 5) остепненные луга на сухой зоне аласа с температурой пород $-0,7^{\circ}\text{C}$, мощностью СТС 2,5-3,0 м, распространены морозобойное растрескивание и пучение;
- 6) разнотравные луга на влажной зоне аласа с температурой пород $-0,5^{\circ}\text{C}$, мощностью СТС 2,5-3,0 м, распространены морозобойное растрескивание и пучение.

Криотекстура пород в основном линзовидная, слоистая, базальная и массивная, линзовидная, сетчатая.

Естественные природно-территориальные комплексы прилегающие к автодороге в пределах ключевого участка А-2, в основном представлены зеленомошно-брусничным лиственным коренным лесом на межаласном типе местности, осоковым кочкарником и разнотравно-злаковым лугом на аласном типе местности (рис. 2). Антропогенные комплексы сформированы вдоль автодороги в виде термокарстовых просадок и заболоченных участков.

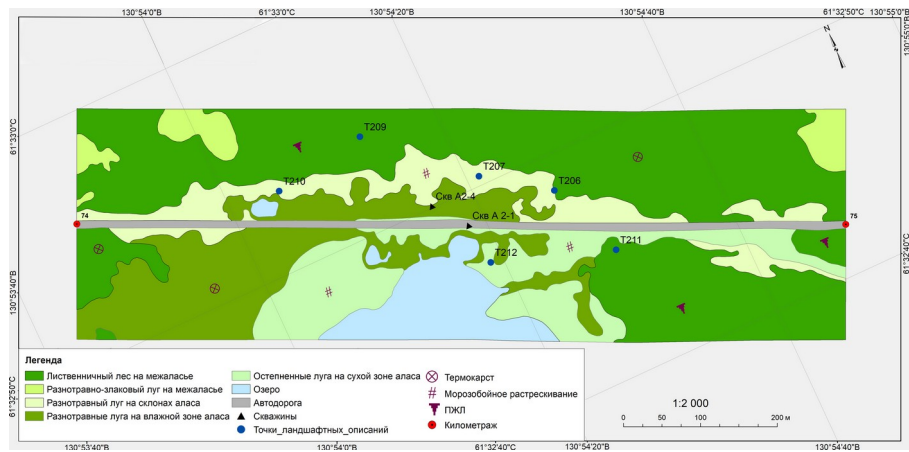


Рисунок 2 - Инженерно-геокриологическая карта участка А-2 автодороги «Амга»

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.28.2>

На Инженерно-геокриологической карте ключевого участка А-2 масштаба 1:2 000 (рис. 2) представлены многолетнемерзлые породы с идентичной с ключевым участком А-1 мощностью (280-300 м) и распространением (сплошное), отложения представлены суглинками. Выделены следующие природно-территориальные комплексы: листоветочный лес на межаласе с температурой пород $-3,0...-4,0^{\circ}\text{C}$, мощностью СТС 1,2-1,5 м; разнотравно-злаковый луг на межаласе с температурой пород $-2,0...-2,5^{\circ}\text{C}$, мощностью СТС 1,8-2,0 м; остепненные луга на склонах аласов с температурой пород $0...-1,0^{\circ}\text{C}$, мощностью СТС 2,2-2,5 м; кустарниковая растительность на межаласе с температурой пород $0...-1,0^{\circ}\text{C}$, мощностью СТС 1,8-2,0 м; остепненные луга на сухой долине с температурой пород $-1,0...-2,0^{\circ}\text{C}$, мощностью СТС 2,0-2,2 м; разнотравные луга на влажной долине, остепненные луга на сухой зоне аласа и разнотравные луга на влажной зоне аласа мощностью СТС 2,0-2,2 м. Криотекстура пород в основном линзовидная, слоистая и массивная. Развита криогенные процессы – термокарст, пучение, морозобойное растрескивание.

Заклучение

В результате проведения мерзлотно-ландшафтных исследований и изучения инженерно-геокриологических условий ключевых участков А-1 и А-2 автомобильной дороги Амга составлены инженерно-геокриологические карты масштаба 1:2 000 с отражением природно-территориальных комплексов с характерными для них значениями температуры пород, мощности сезонно-талого слоя и криогенными процессами. На участке А-1 температура многолетнемерзлых пород и мощность сезонно-талого слоя изменяются от $-0,5^{\circ}\text{C}$ и на 2,5-3,0 м в разнотравных лугах на влажной зоне аласа до $-2,8^{\circ}\text{C}$ и на 0,8-1,2 м в листоветочных лесах на межаласном типе местности. На участке А-2 температура пород и мощность сезонно-талого слоя изменяются от $-1,0...-2,0^{\circ}\text{C}$ и на 2,0-2,2 м в остепненных лугах на сухой долине до $-3,0...-4,0^{\circ}\text{C}$ и на 1,2-1,5 м в листоветочных лесах на межаласном типе местности. На ключевых участках развивается термокарст, пучение и морозобойное растрескивание. Результаты буровых работ и геофизических исследований показали, что на ключевом участке А-1 автодороги Амга повторно-жильные льды распространены почти повсеместно, кроме аласных котловин, а на ключевом участке А-2 широко развиты сильнольдистые аласные отложения.

Полученные результаты позволят разработать рекомендации по эксплуатации автомобильных дорог в области залегания подземных льдов и возможного интенсивного развития термокарстовых явлений, использовать мероприятия по обеспечению устойчивости и увеличению срока эксплуатации автомобильных дорог в реальных инженерно-геокриологических условиях.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Федоров А.Н. Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования / А.Н. Федоров — Якутск: ИМЗ СО РАН СССР, 1991. — 140 с.
2. Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР / АН СССР, Спб. отд., Ин-т мерзловедения. — М.: Госгеодезия СССР, 1991. — 1 к. (2 л.).
3. Fedorov A.N. Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) at scale 1:1,500,000. / A.N. Fedorov, N.F. Vasilyev, Y.I. Torgovkin et al. // Geosciences. — 2018. — 8(465). — DOI: 10.3390/geosciences8120465

4. Иванов М.С. Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской Впадины / М.С. Иванов — Новосибирск: Наука, 1984. — 126 с.
5. Мильков Ф.Н. Ландшафтная география и вопросы практики / Ф.Н. Мильков — М.: Мысль, 1966. — 156 с.
6. Мильков Ф.Н. Ландшафтная сфера Земли / Ф.Н. Мильков — М.: Мысль, 1970. — 207 с.
7. Fedorov A.N. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia. / A.N. Fedorov, P.P. Gavriliiev, P.Y. Konstantinov et al. // *Ecohydrology*. — 2014. — Vol. 7. — Issue 2. — p. 188–196. — DOI: 10.1002/eco.1378
8. Босиков Н.П. Эволюция аласов Центральной Якутии / Н.П. Босиков — Якутск: ИМЗ, 1991. — 127 с.
9. Федоров А.Н. Эволюция и динамика мерзлотных ландшафтов Якутии: дис. ... д-ра Географических наук: 25.00.08 : защищена 2020-11-24 : утв. 2021-03-29 / А.Н. Федоров — Якутск: 2020. — 302 с.
10. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья / П.А. Соловьев. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 144 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Fedorov A.N. Merzlotny'e landshafty' Yakutii: metodika vy'deleniya i voprosy' kartografirovaniya [Permafrost landscapes of Yakutia: identification technique and mapping issues] / A.N. Fedorov — Yakutsk: IMZ SO RAN SSSR, 1991. — 140 p. [in Russian]
2. Merzlotno-landshaftnaya karta YAkutskoj ASSR [Permafrost Landscape Map of the Yakut ASSR] / Academy of Sciences of the USSR, St. Petersburg. Dep., Permafros Institute. — Moscow: State Geodesy of the USSR, 1991. — 1 map. (2 sheets).
3. Fedorov A.N. Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) at scale 1:1,500,000. / A.N. Fedorov, N.F. Vasilyev, Y.I. Torgovkin et al. // *Geosciences*. — 2018. — 8(465). — DOI: 10.3390/geosciences8120465
4. Ivanov M.S. Kriogennoe stroenie chetvertichny'x otlozhenij Leno-Aldanskoj Vpadiny' [The cryogenic structure of the Quaternary deposits of the Leno-Aldan hollows] / M.S. Ivanov — Novosibirsk: Nauka, 1984. — 126 p. [in Russian]
5. Mil'kov F.N. Landshaftnaya geografiya i voprosy' praktiki [Landscape geography and practical issues] / F.N. Mil'kov — M.: My'sl', 1966. — 156 p. [in Russian]
6. Mil'kov F.N. Landshaftnaya sfera Zemli [Earth landscape sphere] / F.N. Mil'kov — M.: My'sl', 1970. — 207 p. [in Russian]
7. Fedorov A.N. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia. / A.N. Fedorov, P.P. Gavriliiev, P.Y. Konstantinov et al. // *Ecohydrology*. — 2014. — Vol. 7. — Issue 2. — p. 188–196. — DOI: 10.1002/eco.1378
8. Bosikov N.P. E'volyciya alasov Central'noj Yakutii [Evolution of the Alasses of Central Yakutia] / N.P. Bosikov — Yakutsk: IMZ, 1991. — 127 p. [in Russian]
9. Fedorov A.N. Evolyutsiya i dinamika merzlotnikh landshaftov Yakutii [Evolution and dynamics of permafrost landscapes in Yakutia]: dis. ... of PhD in Geographical Sciences: 25.00.08 : defense of the thesis 2020-11-24 : approved 2021-03-29 / A.N. Fedorov — Yakutsk: 2020. — 302 p. [in Russian]
10. Solovev P.A. Kriolitozona severnoi chasti Leno-Amginskogo mezhdurechya [Cryolithozone of the northern part of the Lena-Amga interfluve] / P.A. Solovev. — M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1959. — 144 p. [in Russian]