Типизация многолетнемерзлых пород района проектируемой железной дороги Элегест–Кызыл–Курагино

Юлия Юрьевна НАДЕЖДИНА*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Аннотация

Актуальность исследований. Природные условия района строительства железной дороги Элегест–Кызыл–Курагино являются крайне сложными. Осваиваемая территория расположена в двух регионах: Красноярском крае и Республике Тыва и пересекает сложную горную систему Западных Саян. Климат рассматриваемой территории резко континентальный, среднегодовая температура воздуха $-5,4^{\circ}\text{C}$, распределение осадков неравномерное (северная часть 290–300 мм, южная 400–420 мм). Также исследования осложняются протяженностью объекта, которая составляет более 400 км. Для Республики Тыва проектируемая железная дорога будет играть большую роль в развитии топливно-энергетического комплекса, а также развитии экономики страны в целом. Район исследований является малоизученным, однако он характеризуется развитием разнообразных геологических процессов, в том числе многолетнемерзлых пород. Информации по распространению многолетнемерзлых пород крайне мало, и она разобщена.

Цель работы заключается в обобщении и анализе информации о распространении многолетнемерзлых пород на исследуемой территории. В материале рассматривается взаимосвязь высотных отметок с распространением многолетнемерзлых пород, также дается краткая характеристика геологических условий района исследований, рельефа, возможных опасных геологических процессов.

Методы исследований. Обобщение и построение карты осуществлялось при помощи программных продуктов AutoCAD и ArcGIS.

В результате работы проведен анализ литературных источников по распространению многолетнемерзлых и сезонно-мерзлых пород, обобщена информация и построена карта распространения мерзлоты по типам (сплошной, островной, прерывистой), а также уточнены границы распространения многолетнемерзлых пород в соответствии с высотными отметками и типом мерзлоты.

Ключевые слова: Западные Саяны, многолетнемерзлые породы, мерзлота, ледники, криогенные процессы, пояс распространения, рельеф.

Введение

Для Республики Тыва железная дорога Элегест–Кызыл–Курагино будет способствовать развитию топливно-энергетического комплекса и экономики страны в целом. Тыва является одним из немногих регионов, в котором отсутствует железная дорога. Местность высокогорная, поэтому необходимо соорудить 8 тоннелей и 127 мостовых переходов, 1087 водопропускных труб, протяженность которых составит около 25 км. Железная дорога будет проходить в крайне сложных и малоизученных инженерно-геологических условиях. Одним из факторов, который оказывает значительное воздействие на формирование инженерно-геологических условий, является распространение многолетнемерзлых пород.

Развитие многолетнемерзлых пород прямо связано с тектоникой, геологическими и климатическими условиями региона. Изучение основных закономерностей и районов распространения многолетнемерзлых пород позволит более обоснованно осуществить выбор варианта трассы железной дороги, планирование территории при инженерно-хозяйственном освоении в целом.

Район исследований протянулся в субширотном направлении. Протяженность участка составляет немногим

более 400 км. Активные исследования проводились преимущественно в начале–середине XX в. Республика Тыва до 1944 г. не входила в состав Советского Союза, в связи с чем на территории в меньшей степени проводились планомерные исследования природных условий [1]. В 1950-х гг. проводились комплексные исследования, в результате были обнаружены следы оледенений и непосредственно ледники, которые связаны с общим похолоданием в этом районе. Большинство работ посвящено Алтае-Саянской горной области, в которых рассматриваются природные особенности Восточных Саян. Максимально близко к рассматриваемому району в 1942 г. проводила исследования экспедиция под руководством А. М. Кошурникова с целью строительства железной дороги Абакан–Тайшет [1]. Многолетнемерзлые породы являются одним из важнейших факторов, оказывающих влияние на формирование инженерно-геологических условий территории в целом. По данному региону информации по вечноммерзлым породам мало, и она весьма разрознена.

Целью данной работы является обобщение и анализ информации по наличию и распространению многолетнемерзлых пород исследуемого региона.

*levak.yuliya@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4681-2162>

Методы исследований

При выполнении исследований за основу были приняты работы Н. А. Ефимцева, В. А. Обручева и других исследователей, в которых рассмотрены вопросы оледенений Западной Тувы, Восточной части Горного Алтая и Красноярского края [2–6]. В работе Л. К. Зятковой отражены особенности новейшей тектоники Западных Саян [7]. Обобщение и анализ собранной информации осуществлялись посредством стандартных программных продуктов, например, схема распространения многолетнемерзлых пород (ММП) и выделение границы мерзлоты выполнены в программных продуктах ArcGis и AutoCad. Границы уточнялись при помощи интерпретации космоснимков SRTM.

Типы и распространение многолетнемерзлых пород района исследований

На территории Российской Федерации многолетняя мерзлота имеет широкое распространение, занимает около 11 млн км². Хребты Западного Саяна и северо-западная часть Тывы являются одной из границ распространения криолитозоны по территории страны [8].

Тектонические движения (а именно формирование высокогорной зоны) предопределили развитие многолетней мерзлоты. Современный облик района исследований начал складываться в палеогене и окончательно сформировался в четвертичное время. Регион приурочен к центральной части Алтае-Саянской области. Тектоническое строение весьма сложное, выделяется ряд сооружений разного возраста и типа: от добайкальских массивов, салаирских и каледонских складчатых структур до наложенных структур в виде впадин, прогибов и других образований позднего палеозоя, мезозоя, а также рифтогенеза кайнозойского периода. В связи с тем, что неотектонические движения продолжают по настоящее время и территория испытывает общее поднятие, районы распространения многолетнемерзлых пород будут сохраняться, начнут развиваться новые.

Отложения представлены рядом фаций: магматической, метаморфической и терригенной. Возраст отложений – от рифейского до четвертичного. Между собой отложения залегают согласно и несогласно.

В настоящее время исследователями установлены следы двух оледенений, возникших в поздне- и среднеледникового периоды. Развивались геокриологические формы по-разному, в прямой зависимости от климатических условий, высотности, расчлененности рельефа и литологии [4, 5, 9]. Также известно, что метелевый перенос снега имеет большое значение в жизненном цикле ледников. Снеговая линия последнего оледенения, предположительно, располагалась на высоте 1600–1700 м, ледники развивались до долинного типа, так как вершины хребтов были выше на 300–400 м [2].

В Западном Саяне находятся 52 маленьких ледника, которые покрывают площадь около 3 км². Ледники Саян являются малоизученными. Выводы об уменьшении размеров ледников делаются на основании положения конечных морен, установленных в 1960-х гг. [4, 5, 9]. Кары северо-восточной экспозиции заполнены мощными толщами снега, в связи с чем на высоте до 2300 м встречаются отдельные ледники [6]. Ледники Западного Саяна

подразделяются на 3 морфологических типа: каровые, карово-долинные, присклоновые. Преобладающая экспозиция ледников северо-восточная, восточная и северо-западная, преимущественно ледники ориентированы в восточном направлении.

Оледенения оказывают экзарационное воздействие на рельеф, тем самым формируя специфичный высокогорный альпийский тип. В районе исследований следы оледенения встречаются в пределах Центрально-Саянского и Кантегиро-Борусского хребтов, что выражается в формах рельефа в виде каров и трогов, вторые часто заполнены озерами ледникового происхождения. Размеры каров варьируются от уровня «зачаточных» до максимальных, достигая в глубину 1000 м при ширине 3–4 км в бассейне реки Хемчик [3]. Центрально-Саянский хребет достигает высоты 2828 м и характеризуется отсутствием коры выветривания и наличием локального оледенения. Экзарационная деятельность оледенения способствует развитию термодинамических, гравитационных экзоморфодинамических процессов, в связи с чем развиты обвалы, оползни, осыпи, лавинные процессы, курумы и солифлюкционные процессы.

На сегодняшний день район Западного Саяна испытывает общее похолодание, и в высокогорье довольно широко распространены локальные оледенения. Мерзлота Западных Саян преимущественно относится к «островному» типу распространения, встречается практически везде, кроме Минусинской котловины. Столь широкое распространение мерзлоты обусловлено неравномерным размещением снега на склонах разной экспозиции, развитием растительности, изменением с высотой температуры воздуха и в целом климатическими особенностями. Западные склоны Западных Саян получают максимальное количество осадков (1500–2500 мм/год) в связи с поступлением влажных воздушных масс с Атлантического океана. Лето дождливое, мощность снежного покрова достигает 2,5 м. В этих районах распространены пихтовая тайга, влажные горные луга и болота. Восточные склоны находятся в противоположных условиях по отношению к западным, здесь снежный покров максимально достигает 1 м, и именно на восточных склонах преимущественно встречается мерзлота. Мощность мерзлых толщ варьируется от нескольких первых метров до десятков и реже 200 м, температура мерзлых толщ близка к 0 °С. В малоснежных районах Тувы с отметками более 2000 м мощность многолетнемерзлой толщи составляет более 1000 м. Мерзлота встречается преимущественно по периферии районов, где распространено современное оледенение. Массивы мерзлых пород преимущественно сохраняются в торфяных и суглинистых льдистых отложениях, в местах наибольшего затенения, как правило, лесных массивах. При строительстве необходимо учитывать возможность возникновения мерзлотных процессов: просадочных явлений, термокарста, поверхностных оползней-смывов, солифлюкционных явлений, которые возникают при протаивании ледяных образований, содержащихся в толщах горных пород [10].

Криогенные процессы исследуемого района связаны с фазовыми переходами воды в верхних слоях [11]. Значительно развиты экзогенные криогенные процессы.

Рисунок 1. Карта распространения многолетнемерзлых пород по железной дороге Элегест-Кызыл-Курагино//Известия УГГУ. 2020. Вып. 3(59). С. 69-74. DOI 10.21440/2307-2091-2020-3-69-74

Figure 1. Map of permafrost distribution. Scale 1: 1 000 000.

Солифлюкционные процессы развиты на пологих склонах и водоразделах, где высоты превышают 1500 м, смещения достигают первых метров. В случае сильного переувлажнения возникают сплывы, более значительные по масштабу. Термокарстовый процесс развит в озерных котловинах, заболоченных днищах долин, просадочных воронках. Просадочные воронки имеют глубину до 5 м и крутизну бортов около 10–60°. Морозное пучение встречается вдоль озерно-болотных впадин. Морозобойные трещины, наледи, бугры пучения, наледообразования и термокарстовые просадки приурочены к днищам межгорных котловин [12].

Несмотря на то, что Западные Саяны характеризуются преимущественно развитием «островного» типа распространения мерзлоты, имеется пояс сплошного распространения многолетнемерзлых пород преимущественно на вершинах, превышающих 2000 м. Информация о температуре и мощности мерзлоты, расположенной на максимальных высотах Алтае-Саянской области, отсутствует [1]. Горный Алтай является соседствующей горной системой и имеет схожие природно-климатические условия, в связи с чем предполагаемая мощность мерзлоты может достигать размеров от 400 м до 1 км по аналогии с соседствующим регионом. Согласно карте геокриологического районирования СССР, мощность мерзлоты достигает 200–400 м при среднегодовой температуре от –3 до –5 °С [13, 14].

Пояс сплошного распространения (когда ММП занимают более 90 % площади) криолитозоны приурочен к высотам ориентировочно более 2000 м, в указанном поясе находятся хребты Ергаки, Саянский, Куртушибинский, Иджир. Температура ММП составляет от –3 до –5 °С.

Пояс прерывистого распространения (ММП занимают 50–90 % площади) криолитозоны расположен преимущественно на высоте от 1500 до 2000 м, к этому поясу приурочены хребты Западный и Восточный Танну-Ола. Следствием приуроченности к поясу прерывистого распространения криолитозоны является окружение степями и недостаточная увлажненность грунтов. Также прерывистая мерзлота встречается в Тоджинской котловине. В поясе прерывистого распространения криолитозоны многолетнемерзлые породы встречаются на дне депрессий, в привершинных частях склонов северной экспозиции, а также у подножий склонов. Мерзлота в Тоджинской котловине изучена более подробно. Мощность мерзлой толщи варьируется от 100 м и редко достигает 300 м, температура составляет от 0 до –2 °С. Глубина сезонного протаивания в зависимости от разновидности грунтов составляет: в торфяниках 0,4–0,5 м, в суглинках 0,3–2,5 м, супесях 1–3,2 м. Слой мерзлой толщи достигает 15 м, здесь встречаются повторно-жильные реликтовые льды, мощность которых достигает 5,4 м [15].

Пояс островного распространения криолитозоны (ММП занимают 10–50 % площади) развит более широко.

Встречается в нижней части хребтов Восточного Танну-Ола, Обручева. Островная мерзлота в высотной части распространена на отметках от 1000 до 1500 м и зависит от экспозиции склонов, состава грунтов, влажностного режима, почвенно-растительного слоя. Мощность мерзлой толщи варьируется от 10 до 30 м. В понижениях мерзлота приурочена к Тоджинской и Турано-Уюкской впадинам, в меньшей степени к Тывинской депрессии. Мощность мерзлого слоя составляет от 5 до 15 м и редко достигает 30 м. В понижениях мерзлота распространена на отметках от 500 до 900 м, температура варьируется в пределах от 0 до –1,5 °С.

Пояс редкоостровной многолетней мерзлоты (ММП занимают менее 10 % площади) встречается только в районе степных и полупустынных ландшафтов Тывинской котловины. Мерзлота встречается на склонах хребтов, окружающих котловину, на высоте от 600 до 1200 м. В пониженной части котловины встречаются редко островки многолетнемерзлых пород и перелетки. В пределах указанного пояса глубины этого процесса изменяются в суглинках от 0,6 до 2,8 м, в супесях – от 1,3 до 3,6 м, в гравийно-галечниковых отложениях с супесчано-суглинистым заполнителем – от 1,4 до 5 м.

Пояс сезонного промерзания пород представлен в ландшафтах Южно-Минусинской котловины (рис. 1).

В связи с тем, что продолжаются неотектонические движения, продолжается и поднятие территории, что способствует сохранению и развитию мерзлоты.

Выводы

На исследуемой территории широко и разнообразно распространены многолетнемерзлые породы (рис. 1). На карте показаны типы сплошного (5,35 % от нашей площади исследований), прерывистого (16,97 %), островного (57,80 %), редкоостровного (13,88 %) распространения многолетнемерзлых пород и зона сезонного промерзания (6,01 %). Южная часть Западных Саян более подвержена распространению мерзлотных явлений, чем северная [7].

Максимальная мощность многолетнемерзлых пород в районе исследований достигает 1000 м, температура отложений на высоте 1800 м составляет –3 °С. По мере увеличения высоты температура снижается, мощность отложений увеличивается до 600 м (высота 1200–2500 м). Снеговая линия начинается с отметки 2000 м, с высоты 2500 м и более прослеживаются ледники. Наличие определенного типа мерзлоты обусловлено климатическими особенностями и высотными отметками.

В пределах криолитозоны исследуемой территории могут развиваться мерзлотные процессы, а именно термокарст, наледи, солифлюкция, бугры пучения, наледообразование, термокарстовые воронки и другие процессы, которые необходимо учитывать при возведении инженерных сооружений, а также строительстве железной дороги и сопутствующей инфраструктуры (тоннели, трубопроводы, мостовые переходы, линии электропередачи и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Александровский Ю. С., Алексеенко В. Д., Беляев Г. М. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Сер. Алтае-Саянская. Лист М-46 – Кызыл: объяснит. записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 349 с.
2. Обручев В. А. Признаки ледникового периода в северной и центральной Азии // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 1931. № 3. С. 43–120.

3. Ефимцев Н. А. Четвертичное оледенение Западной Тувы и Восточной части Горного Алтая // Труды Геологического института. М.: Изд-во АН СССР, 1961. Вып. 61. 172 с.
4. Абалаков А. Д., Шеховцов А. И., Лысанова Г. И., Новикова Л. С. Особенности проявления неблагоприятных природных процессов на территории республики Тыва // Успехи современного естествознания. 2016. № 6. С. 132–137. URL: <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35980>
5. Архипов С. А., Ивановский Л. Н., Исаева Л. Л. и др. Проблемы экзогенного рельефообразования. Кн. 1. Рельеф ледниковый, криогенный, эоловый, карстовый и морских побережий: история развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 430 с.
6. Трасса мужества (строительство трассы Абакан–Тайшет). URL: <http://www.rzd-expo.ru/history/Abakan-Taishet/>
7. Смирнов М. Б. Почвы Западного Саяна. М.: Наука, 1970. 350 с.
8. Физическая география России. URL: <http://bibl.tikva.ru/base/B1740/B1740Part1-3.php>
9. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Введ. 2018-11-25. М.: Стандартинформ, 2018. 122 с.
10. Национальный атлас России. URL: <https://xn--80aaaa1bhncicci1cl5c4ep.xn--p1ai/cd2/240-242/240-242.html>
11. Тумель Н. В., Зотова Л. И. Диагностика и картографирование геоэкологических ситуаций в зоне вечной мерзлоты России // Геонауки, 2019. 353 с.
12. Буслов М. М., Джен Х., Травин А. В., Отгонбаатар Д., Куликова А. В., Чен Минг, Семаков Н. Н., Рубанова Е. С., Абилдаева М. А., Войтишек Е. Э., Трофимова Д. А. Глори С. Тектоника и геодинамика Горного Алтая и сопредельных структур Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 10. С. 1600–1627.
13. Зяткова Л. К., Лукаш Л. К. Новейшая тектоника Западного Саяна. Новосибирск: Наука, 1973. 184 с.
14. Чернов Г. А., Вдовин В. В., Окишев П. А. и др. Рельеф Алтае-Саянской горной области / отв. ред. В. А. Николаев, Г. А. Чернов. Новосибирск: Наука. Сибир. отд-ние, 1988. 204 с.
15. Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. В 5 т. Т. 1. Ландшафты в XXI веке: анализ состояния, основные процессы и концепции исследований / под ред. В. Г. Сычева, Л. Мюллера. М.: ВНИИ агрохимии, 2018. 504 с.

Статья поступила в редакцию 22 июня 2020 года

Typification of permafrost rocks in the area of the projected Elegest–Kyzyl–Kuragino railway

Yuliya Yur'evna NADEZHINA*

The National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract

The relevance of the research. Natural conditions of the construction area of the Elegest–Kyzyl–Kuragino railway are extremely difficult. The territory under development is located in two regions: the Krasnoyarsk Territory and the Tyva Republic and crosses the complex mountain system of the Western Sayan Mountains. The climate of the territory under consideration is sharply continental, the average annual air temperature is -5.4°C , the distribution of precipitation is uneven (northern part is 290–300 mm, southern part is 400–420 mm). Moreover, research is complicated by the length of the object, which is more than 400 km. For the Republic of Tuva, the projected railway will play an important role in the development of the fuel and energy complex, as well as in the development of the country's economy as a whole. The study area is poorly studied, but it is characterized by the development of various geological processes, including permafrost. There is very little information on the distribution of permafrost, and it is scattered.

The purpose of the work is to summarize and analyze information on the distribution of permafrost in the study area. The material examines the relationship of elevation marks with the spread of permafrost, and also gives a brief description of the geological conditions of the study area, relief, and possible dangerous geological processes.

Methods of research. Generalization and construction of the map was carried out using AutoCAD and ArcGIS software products.

As a result of the work, an analysis of literature sources on the distribution of permafrost and seasonally frozen rocks was carried out, information was generalized and a map of the distribution of permafrost by type (continuous, island, discontinuous) was constructed, and the boundaries of the distribution of permafrost were clarified in accordance with the altitude and type of permafrost.

Keywords: Western Sayans, permafrost, glaciers, cryogenic processes, distribution belt, relief.

REFERENCES

1. Alexandrovskiy Yu. S., Alekseenko V. D., Belyaev G. M. et al. 2008, State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1 000 000 (third generation). Ser. Altay-Sayanskaya. Sheet M-46 – Kyzyl: explanation note. Saint Petersburg, 349 p.
2. Obruchev V. A. 1931, Signs of the Ice Age in North and Central Asia. *Byulleten' komissii po izucheniyyu chetvertichnogo perioda* [Bulletin of the Commission for Study of the Quaternary], no. 3, pp. 43-120. (In Russ.)
3. Efimtsev N. A. 1961, Quaternary glaciation of Western Tuva and Eastern part of Gornyy Altai. *Trudy Geologicheskogo instituta* [Proceedings of the Geological Institute]. Moscow, issue 61, 172 p.
4. Abalakov A. D., Shekhovtsov A. I., Lysanova G. I., Novikova L. S. 2016, Features of adverse natural processes within the territory of the Republic of Tyva. *Uspexi sovremennogo yestestvoznaniya* [Advances in current natural science], no. 6, pp. 132–137. (In Russ.) URL: <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35980>
5. Arkhipov S. A., Ivanovskiy L. N., Isaeva L. L. et al. 1976, *Problemy ekzogennogo rel'yefoobrazovaniya* [Problems of exogenous relief formation], Book 1. The relief is glacial, cryogenic, aeolian, karst and sea coasts: the history of the development of the relief of Siberia and the Far East. Moscow, 430 p.
6. Highway of Courage (construction of the Abakan–Taishet highway). URL: <http://www.rzd-expo.ru/history/Abakan-Taishet/>
7. Smirnov M. B. 1970, *Pochvy Zapadnogo Sayana* [Soils Of The Western Sayan]. Moscow, 350 p.
8. Physical geography of Russia. URL: <http://bibl.tikva.ru/base/B1740/B1740Part1-3.php>
9. 2018, SP 14.13330.2018. Construction in seismic areas. Updated version of SNiP II-7-81*. Intr. 2018-11-25. Moscow, 122 p.
10. The national Atlas of Russia. URL: <https://xn--80aaaa1bhncicci1cl5c4ep.xn--p1ai/cd2/240-242/240-242.html>
11. Tumei N. V., Zotova L. I. 2019, *Diagnostika i kartografirovaniye geoekologicheskikh situatsiy v zone vechnoy merzloty Rossii* [Diagnostics and mapping of geoeological situations in the permafrost zone of Russia], 353 p.
12. Buslov M. M., Jen H., Travin A. V., Otgonbaatar D., Kulikova A. V., Chen Ming, Semakov N. N., Rubanova E. S., Abildaeva M. A., Voitishchek E. E., Trofimova D. A., Glory S. 2013, Tectonics and geodynamics of Gornyy Altai and adjacent structures of the Altai-Sayan folded region. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics]. vol. 54, no. 10, pp. 1600–1627. (In Russ.)
13. Zyatkov L. K., Lukash L. K. 1973, *Noveyshaya tektonika Zapadnogo Sayana* [The newest tectonics of the Western Sayan]. Novosibirsk, 184 p.
14. Chernov G. A., Vdovin V. V., Okishev P. A. et al. 1988, *Rel'yef Altaye-Sayanskoy gornoy oblasti* [Relief of the Altai-Sayan mountainous region], A. Nikolaev, G. A. Chernov. Novosibirsk, 204 p.
15. 2018, *Novyye metody i rezul'taty issledovaniy landshaftov v Yevrope, Tsentral'noy Azii i Sibiri* [New methods and results of landscape studies in Europe, Central Asia and Siberia]. In 5 vol. Vol. 1. Landscapes in the 21st century: analysis of the state, basic processes and research concepts. Ed. by V. G. Sychev, L. Mueller. Moscow, 504 p.

The article was received on June 22, 2020

✉ levak.yuliya@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4681-2162>