

Вечная мерзлота: геокриологические опасности и региональная деградация мерзлых грунтов

В.А. Юрченко, А.В. Манько

Московский государственный строительный университет

Аннотация: На сегодняшний день проблема глобального изменения климата и связанная с ней деградация мерзлоты является приоритетным направлением исследований. В районах Крайнего Севера изменение температуры на полградуса способствует возникновению геокриологических опасностей: появлению оврагов, термокарстовых просадок, пучений, образованию жильных льдов и, как следствие, разрушению домов и инфраструктуры. В России зона вечной мерзлоты занимает около 63-65% ее территории и простирается на тысячи километров. Различные инженерно-геологические воздействия, в том числе, техногенные, представляет собой серьезную геокриологическую опасность и могут приводить к деградации мерзлых грунтов в различных регионах. Вследствие быстрого оттаивания льда и изменения климата, на мерзлых грунтах образуются обвалы и пустоты. Также, при оттаивании вечной мерзлоты, образуется большое количество грунтовых вод и появляется риск засоления близлежащих водных и прибрежных зон. Это может привести к утрате ресурсов, которые необходимы для жизни местного населения, а также для экономики региона. Несмотря на то, что существуют многочисленные программы и исследования на эту тему, в России огромный объем работ по устранению геокриологических угроз до сих пор не проведен.

Ключевые слова: геокриология, вечная мерзлота, грунт, деградация мерзлых грунтов, протаивание, мониторинг, Якутия, криолитозона, геокриологическая опасность.

Вечная мерзлота или по ГОСТ 25100-2020 вечномерзлые грунты – горные породы или грунты с температурой ниже 0 °С в течение длительного временного промежутка. Данные грунты включают в себя почвенно-растительный слой, сухие породы, ледяные субстраты, но исключают настоящие ледники [1]. Важным показателем для вечной мерзлоты является мощность слоя мерзлых грунтов. Так, по данным Росгидромета, среднее значение толщины мерзлых грунтов в России составляет 350 метров. Причем, наибольшая толщина мерзлых грунтов на территории России зарегистрирована в Восточной Сибири и составляет 1450 м [2]. Деградация вечной мерзлоты – нарушение естественного рельефа за счет термокарстовых просадок. Основной причиной является антропогенное изменение климата. Деградация, в том числе региональная, приводит к изменению структуры

грунта, к потере несущей способности свайных фундаментов, возрастает риск разрушения инженерных сооружений.

Одной из главных геокриологических опасностей, связанных с вечной мерзлотой, является образование талых озер – это поверхностные водные образования, которые появляются на месте талых ледников и снегопадов. Талые озера могут приводить к формированию водных потоков, снабжающих реки и озера, которые затем могут затоплять низинные территории и вызывать опасные для жизни наводнения.

Второй геокриологической опасностью, связанной с вечной мерзлотой, являются оползневые процессы, при которых массы грунта начинают двигаться по склону или откосу. На мерзлых грунтах эти процессы могут быть особенно опасными, поскольку массы грунта способны перемещаться на очень большие расстояния, приводя к разрушительным последствиям.

Третьей геокриологической опасностью, связанной с вечной мерзлотой, является распространение заболоченности территорий – процесс, при котором на поверхности грунта образуются торфяные залежи, возникающие из-за медленной деградации растительности, которая не успевает полностью разлагаться на поверхности вечной мерзлоты из-за низкой температуры.

С течением времени это приводит к образованию заболоченной местности, что делает территорию непригодной для сельского хозяйства или других видов деятельности. Также есть опасность образования криокарстовых воронок и провалов на поверхности земли. Вследствие оттепели и других природных факторов, могут образовываться пустоты внутри мерзлого грунта, что может привести к обрушению земной поверхности. Виной всему - деградация мерзлых грунтов. В Центральной Якутии за последние 30 лет наблюдается один из наиболее высоких в России трендов повышения среднегодовой температуры воздуха, достигающий 0,08 °С/год [3], а вместе с

повышением уменьшается площадь вечномерзлых грунтов. За период систематических наблюдений (с середины 1990-х годов) на площадках мониторинга отмечается увеличение средней глубины сезонного протаивания на 1–2 см в западной Сибири и Якутии и на 2–6 см. Причем повышение температуры воздуха и увеличение глубины сезонного протаивания не происходят строго синхронно [4]. Карта деградации мерзлых грунтов в Якутии является одним из важных инструментов для оценки устойчивого развития региона и определения наиболее уязвимых зон. Она позволяет определить степень деградации мерзлых грунтов, которые находятся под влиянием антропогенных и природных факторов. Это, в свою очередь, позволяет разработать стратегии по сохранению мерзлотных экосистем. Не так давно ученые Института мерзлотоведения Сибирского отделения РАН составили обновленную мерзлотно-ландшафтную карту, которая содержит информацию о температуре мерзлоты, глубине сезонно-талого слоя и происходящих криогенных процессах.

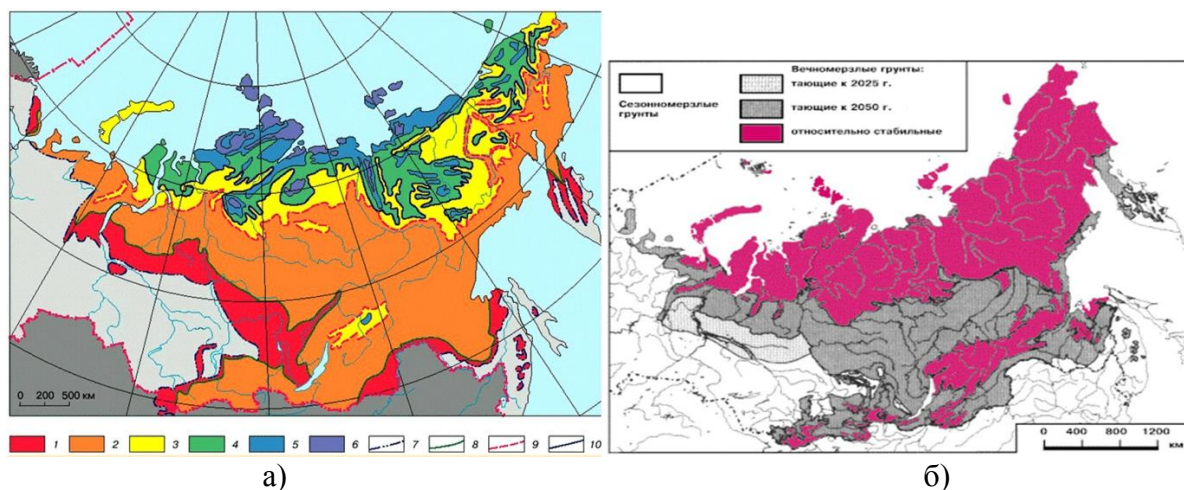


Рис. 1. – Прогнозная геокриологическая карта: а – по Э.Д. Ершову, б – по

А.В. Павлову и Г.Ф. Гравису

Исходя из ранних предположений Э.Д. Ершова [5], А.В. Павлова и Г.Ф. Грависа [6] (рис. 1) о развитии деградации, можно сделать вывод, что их предположения сбылись.

По многочисленным снимкам из космоса и данным наблюдений с 1930^x годов по 2023 год, можно увидеть, что первоначально протаяли зоны островной мерзлоты в Якутии (рис. 2) [7].

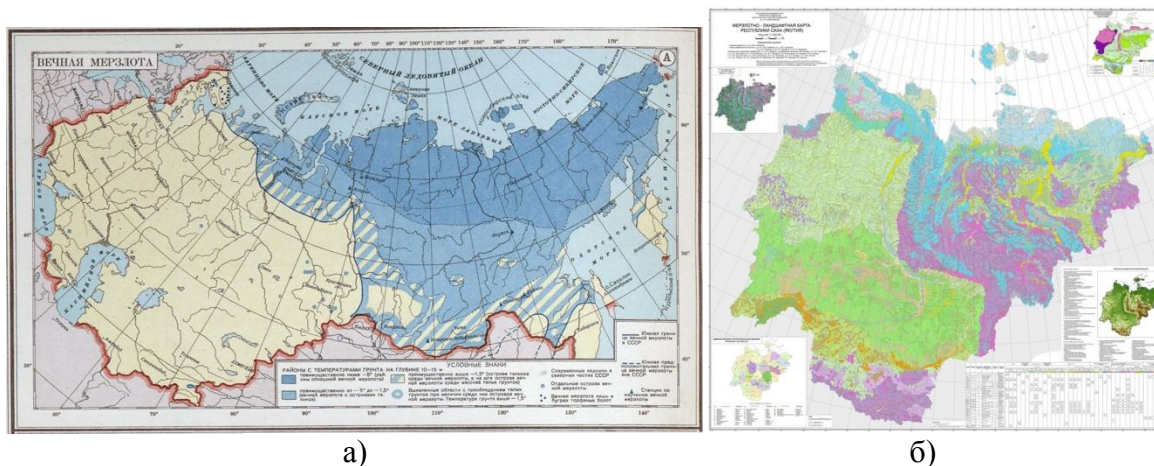


Рис. 2. – Карта распространения вечной мерзлоты: а – 1937г., б – 2017г.

Эффективным способом в качестве опорного элемента на сегодняшний день можно считать спутниковые данные. Их использование для оценки вечной мерзлоты до сих пор было ограниченным. Для детального анализа ландшафтных процессов в неоднородных тундровых средах требуются наблюдения с гораздо более высоким пространственным разрешением. Коммерческие спутниковые данные с высоким разрешением (микроспутник для съемки суши с космоса фирмы PlanetScore с разрешением 3,15 м метра) или с очень высоким разрешением (космические спутники фирм Worldview, GeoEye с разрешением менее 1 м) дополнительно помогут обнаружить даже небольшие возмущения, но доступность данных остается ограниченной [8]. Поэтому спутниковые результаты должны подкрепляться данными, полученными на месте. Для оценки темпов деградации мерзлоты, в нестационарных климатических и неоднородных геокриологических условиях была разработана новая математическая модель, учитывающая развитие деструктивных криогенных процессов и влияние снежного покрова. Модель показывает, что при умеренных трендах потепления (0,012–0,025 °С/год) в XXI в. и положительном тренде средней высоты снежного покрова,

средняя скорость деградации мерзлых пород с объемной льдистостью 50% в восточных арктических районах составит 0,02–0,08 м/год (рис. 3).

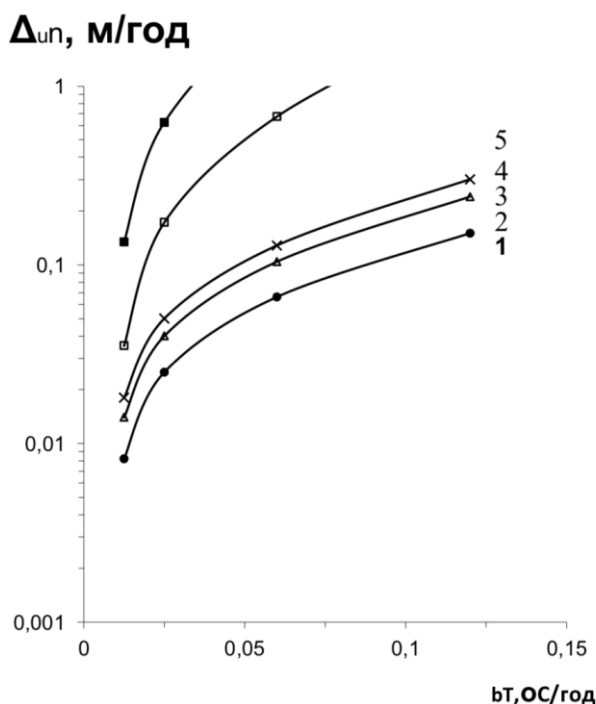


Рис. 3. – Аномалии скорости деградации многолетнемерзлых пород со средней льдистостью 50% при различных линейных трендах

На данном графике средней температуры воздуха сезона оттаивания (bT) и равномерном возрастании средней высоты снежного покрова указано по следующим номерам статистической кривой: 1 – 0,2-0,3 м. (климатическая норма), 2 – 0,4-0,5 м., 3 – 0,5-0,6 м., 4 – 0,7-0,8 м., 5 – 1-1,1 м. с коэффициентами тренда 0, 4, 8, 12, 20 мм/год, соответственно. Во многих других районах криолитозоны Арктики, Сибири средний темп деградации мерзлоты, по-видимому, не выйдет за рамки указанного интервала [9].

На местности, в отдаленных уголках Якутии, продолжают снимать температуру грунта, GPS-навигаторы устанавливают поверхности льда на водоемах, замеряют слой болотного торфа, обновляются карты, используются специальные имитационные модели, позволяющие предвидеть движение мерзлых грунтов и вероятность возникновения опасных ситуаций. В работе Анисимова был разработан прогностический метод, основанный на

применении расчетного индекса. Из полученной им формулы следует, что вероятность развития деструктивных процессов больше там, где выше содержание льда в грунте [10]. Также имеются и другие работы в этом направлении [11, 12].

Таким образом, мониторинг вечной мерзлоты, внедрение новых технологий и устройств, планирование и управление экологической деятельностью должны стать приоритетными направлениями в рамках региональной и национальной политики страны. Только все это способно спасти северные регионы от геокриологических опасностей, вызванных деградацией мерзлых грунтов.

Литература

1. Стюарт А.Х., Брушков А.В., Чэн Г. Геокриология. Характеристики и использование вечной мерзлоты. Москва–Берлин: Директ-Медиа. 2020. 438с.
2. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования: оценочный отчет. М.: Совет Гринпис. 2010. 43 с.
3. Скачков Ю.Б. Тенденции изменения экстремальных значений температуры воздуха в г. Якутске // Наука и образование. 2012. № 2. С. 39-41.
4. Алексеев Г.В. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1007 с.
5. Ершов Э.Д. Деградация мерзлоты при возможном глобальном потеплении климата // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 2. С. 70–74.

6. Павлов А.В., Гравис Г.Ф. Вечная мерзлота и современный климат // Институт криосферы Земли СО РАН. 2000. URL: geo.web.ru/db/msg.html?mid=1159815
7. Permafrost-Landscape Map of the Republic of Sakha (Yakutia) on a Scale 1:1500000. URL: mdpi.com/2076-3263/8/12/465
8. Bartsch Annett, Strozzi Tazio and Nitze Ingmar. Permafrost Monitoring from Space. - Surveys in Geophysics, 2023. URL: doi.org/10.1007/s10712-023-09770-3.
9. Разумов, С. О. Оценка современных темпов деградации многолетнемерзлых пород, тенденций и последствий ее развития в XXI в // Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия: Материалы 8 международной научной конференции, Северный Чарльстон, Южная Каролина, США, 17–18 июня 2015 года. Научно-издательский центр «Открытие». Северный Чарльстон, Южная Каролина, США: CreateSpace, 2015. – С. 39-44.
10. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России // Метеорология и гидрология. 2002. № 6. С. 15-22.
11. Гридневский А.В. Комплексная оценка геологических опасностей территорий Ростовской области // Инженерный вестник Дона. 2013. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1946.
12. Новоженин В.П., Карлина И.Н. Влияние температуры грунта на степень его химического закрепления // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2068.

References

1. Stjuart A.H., Brushkov A.V., Chjen G. Geokriologija. Harakteristiki i ispol'zovanie vechnoj merzloty. [Geocryology. Characteristics and uses of permafrost] Moskva-Berlin: Direkt-Media. 2020. 438p.

2. Osnovnye prirodnye i social'no-jekonomicheskie posledstvija izmenenija klimata v rajonah rasprostranenija mnogoletnemerzlyh porod: prognoz na osnove sinteza nabljudenij i modelirovanija: ocenochnyj otchet [Main Natural and Socio-Economic Consequences of Climate Change in Areas of Permafrost Extension: Forecast Based on Synthesis of Observations and Modeling: Assessment Report]. M.: Sovet Grinpis. 2010. 43p.

3. Skachkov Ju.B. Nauka i obrazovanie. 2012. № 2. pp. 39-41.

4. Alekseev G.V. Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii [Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. M.: Rosgidromet, 2014. 1007p.

5. Ershov Je.D. Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal. 1997. № 2. pp. 70–74.

6. Pavlov A.V., Gravis G.F. Institut kriosfery Zemli SO RAN. 2000. URL: geo.web.ru/db/msg.html?mid=1159815.

7. Permafrost-Landscape Map of the Republic of Sakha (Yakutia) on a Scale 1:1500000. URL: mdpi.com/2076-3263/8/12/465

8. Bartsch Annett, Strozzi Tazio and Nitze Ingmar. Permafrost Monitoring from Space. Surveys in Geophysics, 2023. URL: doi.org/10.1007/s10712-023-09770-3

9. Razumov, S. O. Ocenka sovremennyh tempov degradacii mnogoletnemerzlyh porod, tendencij i posledstvij ee razvitija v XXI v (Proc. 8 mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, Severnyj Charl'ston, Juzhnaja Karolina, USA, 17–18 ijunja 2015). Nord Charlston, 2015. pp. 39-44.

10. Anisimov O.A., Beloluckaja M.A. Ocenka vlijanija izmenenija klimata i degradacii vечноj merzloty na infrastrukturu v severnyh regionah Rossii // Meteorologija i gidrologija. 2002. № 6. pp. 15-22.

11. Gridnevskij A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1946.



12. Novozhenin V.P., Karlina I.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 4.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2068.