

Применение наземного лазерного сканера при изучении годовой и межгодовой изменчивости термокарста в Центральной Якутии

В. М. Лыткин^{1,2}, Н. И. Башарин^{1,2}, А. Ф. Жирков¹,
А. Р. Кириллин¹, М. А. Сивцев^{1,2}

¹ *Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН
Якутск, 677010, Россия
E-mail: gidro1967@mail.ru*

² *Институт гуманитарных исследований и проблем малочисленных народов
Севера СО РАН, Якутск, 677027, Россия*

Происходящие изменения климатических параметров влияют на температурный режим верхних горизонтов многолетнемерзлых пород, что приводит к развитию опасных криогенных процессов, в особенности к усилению термокарста на территориях с сильнольдистыми грунтами. Изменение ландшафтных условий оказывает негативное влияние на хозяйственную деятельность местных сообществ Арктической зоны, поэтому всестороннее изучение термокарста становится актуальной задачей современных геокриологических исследований. В статье представлены результаты применения наземного лазерного сканера при изучении годовой и межгодовой динамики термокарста на ключевом участке исследования вблизи с. Чапчылган Амгинского р-на Республики Саха (Якутия). Полученные результаты на основе сравнительного анализа разновременной цифровой модели рельефа показали, что поверхность в пределах исследуемого участка, охваченная первичными формами термокарста (былларами), опускается в среднем на 6,7 см в год. На участках, где застаиваются весенние талые воды, просадки могут достигать до 20 см в год. Данные, полученные с помощью наземного лазерного сканера, были сопоставлены с результатами нивелирной съёмки по 19 точкам и показали относительную погрешность в 32 % для годового цикла наблюдений. Кроме расчёта вертикальных деформаций поверхности с помощью применённого метода можно получить данные об объёмах вытаявшего льда, глубине межбылларных западин и цифровую модель местности наблюдаемого участка с сантиметровым разрешением.

Ключевые слова: термокарст, наземный лазерный сканер, многолетнемерзлые породы, деградация мерзлоты, ледовый комплекс, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 18.09.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-130-139

Введение

В зоне распространения многолетнемерзлых толщ сильнольдистые породы занимают значительную территорию, основная часть которой приурочена к полярным и приполярным районам Восточной Сибири (Konishchev, 2011). В Республике Саха (Якутия) такие отложения (с объёмной льдистостью 0,4–0,8) занимают 39,8 % от общей территории региона (Shestakova et al., 2021). В условиях современного потепления арктического климата сильнольдистые породы в первую очередь чувствительны к изменениям и являются наиболее уязвимыми к трансформации. Быстрое увеличение температуры воздуха за последние десятилетия негативно сказывается на их температурном режиме и на глубине деятельного слоя (Anisimov, Reneva, 2006; Biskaborn et al., 2019; Fischer et al., 2006; Jin et al., 2021; Smith et al., 2022), что приводит к развитию опасных криогенных процессов (Dixon, 2022; Günther et al., 2013; Jorgenson, 2013; Lewkowicz, Way, 2019; Liljedahl et al., 2016; Morgenstern et al., 2021; Rowland et al., 2010; Runge et al., 2022; Tananaev, Lotsari, 2022; Veremeeva et al., 2021). Одним из таких процессов выступает термокарст, в результате которого происходит сильное проседание поверхности, могут образоваться и расширяться термокарстовые озёра, нарушается растительно-почвенный покров, что может привести к развитию высокодинамичной эрозии.

Развитие криогенных процессов, в том числе термокарста, к середине XXI в. затронет 33,6 % инфраструктуры в Якутии, что повлечёт за собой большие социальные и экономические издержки для региона (Streletskiy, 2019; Zhirkov et al., 2023). Вследствие этого в зону риска попадают многочисленные населённые пункты, промышленные объекты и сельскохозяйственные земли, которые расположены в пределах распространения сильнольдистых мёрзлых пород и ледового комплекса (Lytkin et al., 2021; Osterkamp et al., 2009). Поэтому изучение опасных криогенных процессов и наблюдение за ними — актуальная задача геокриологических исследований.

В большинстве исследований при изучении скорости просадок термокарста применяют данные дистанционного зондирования Земли различного пространственного разрешения (Kokelj, Jorgenson, 2013). В некоторых случаях — для спутниковых снимков, имеющих длительные ряды наблюдений, из-за их относительно низкого пространственного разрешения затруднено дешифрирование мельчайших топографических особенностей термокарстового рельефа, а снимки с высоким разрешением порой имеют высокую стоимость. Вследствие этого для более детальных наблюдений на локальных участках начинают использовать различные альтернативные методы исследований, с помощью которых можно получить подробные ортофотопланы и цифровые модели рельефа (Saito et al., 2018). Цель данного исследования заключается в оценке применения наземного лазерного сканирования при измерении годовой и межгодовой скорости просадок первичных форм термокарстового рельефа.

Район и методы исследований

С целью изучения скорости просадок термокарста проведены натурные исследования на ключевом участке, который расположен вблизи с. Чапчылган (Амгинский р-н, Республика Саха (Якутия)) (рис. 1а, см. с. 132). Село находится в юго-восточной части Центральной Якутии на левобережье р. Амги на уровне абалахской террасы с абсолютными высотами 155–158 м. На поверхности ключевого участка исследований (рис. 1б) наблюдаются первичные формы просадочного термокарстового рельефа — быллары (Соловьев, 1959). Быллары — это слабо пониженные участки, деформированные просадочными воронками и ложбинками, на которых формируется бугристая поверхность (см. рис. 1б). На участке исследований глубина межбылларных ложбинок достигает 2,5 м. Со временем такие участки превращаются в котлоинообразные формы просадок — иё и дюеда. Иё — слабовыраженная западина среди бугристой поверхности, а дюеда — котловина с более или менее резко выраженными бортами, с бугристой поверхностью дна и бортов.

В геоморфологическом отношении исследуемый участок расположен в пределах Приленского плато на надпойменной террасе левого берега на поверхности пологого склона. Горные породы сложены суглинисто-супесчаной толщей с крупными повторно-жильными льдами мощностью до 15–20 м. Климат района исследований резко континентальный. Среднегодовая температура воздуха для метеостанции «Амга» составляет $-8,3$ °С. Средние январские значения достигают $-40,8$ °С, а июльские — $+17,6$ °С. Годовое количество осадков в регионе составляет в среднем 270 мм.

Согласно Мерзлотно-ландшафтной карте Якутии ключевой участок находится в пределах Амгино-Алданской полого-увалистой среднетаёжной провинции сплошного распространения многолетнемерзлых пород (Fedorov et al., 2018). На участке исследований развит склоновый делювиально-солифлюкционный тип местности с температурой грунтов от $-1,5$ до -1 °С и мощностью многолетнемерзлых грунтов от 200 до 300 м. Глубина сезонно-талого слоя на участке исследований изменяется от 2,2 до 2,8 м.

При изучении просадок первичного термокарстового рельефа нами использовано наземное лазерное сканирование с заверкой относительной ошибки с помощью нивелирной съёмки. Полевые исследования проводились в течение 2021–2022 гг. в периоды начала формирования сезонно-талого слоя (15 мая 2021 г. и 22 мая 2022 г.) и его максимальной мощности (24 сентября 2021 г. и 17 сентября 2022 г.).

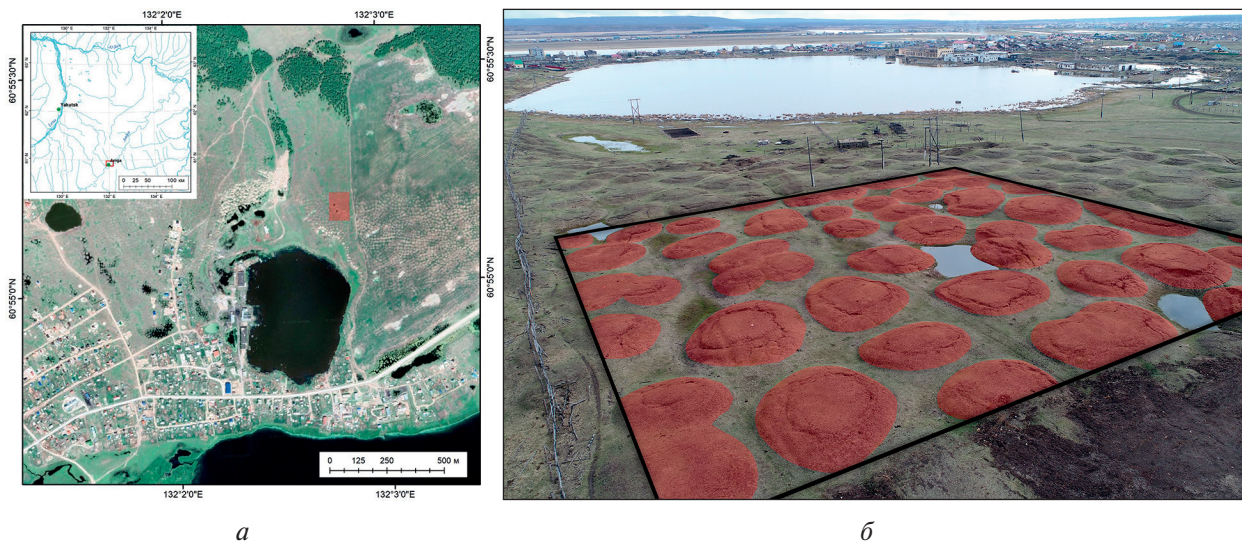


Рис. 1. Ключевой участок исследований: а — местоположение (красный прямоугольник); б — панорамный вид (красным выделена поверхность былларов)

Наземное лазерное сканирование выполнялось лазерным сканером Trimble TX8 Extended. Дальность сканирования данным прибором составляет 120 м, точность — 5 мм/120 м (<https://fieldtech.trimble.com/resources/i/1205199-datasheet-trimble-tx8-3d-laser-scanner/0?expanded=false&hubItemID=595107750&m4=>). Для перекрытия теневых областей, которыми становятся глубокие просадки между былларами, сканирование проводилось заложением 41 станции с шагом между ними в 6–10 м (рис. 2). Точки съёмки размещались на поверхности былларов. Для сшивки сканированных областей в единое облако точек были использованы восемь объёмных визирных марок, которые располагались в зоне перекрытия лазерного сканера.

Постобработка результатов съёмки наземного лазерного сканирования выполнена в программном обеспечении Trimble Real Works. В результате лазерной съёмки получено облако точек с 49 019 026 значениями для каждого этапа съёмки, которое в дальнейшем преобразовано в цифровую модель местности (ЦММ). В результате получена растровая поверхность с разрешением 1,2 см/пиксель. Дальнейшая обработка созданных ортофотопланов и ЦММ осуществлялась в программной среде ArcMap 10.1. С использованием встроенного в программное обеспечение инструмента алгебры раstra была рассчитана сезонная и годовая динамика термокарстовых процессов.

Нивелирная съёмка проводилась путём нивелировки установленных наблюдательных точек относительно опорного репера.

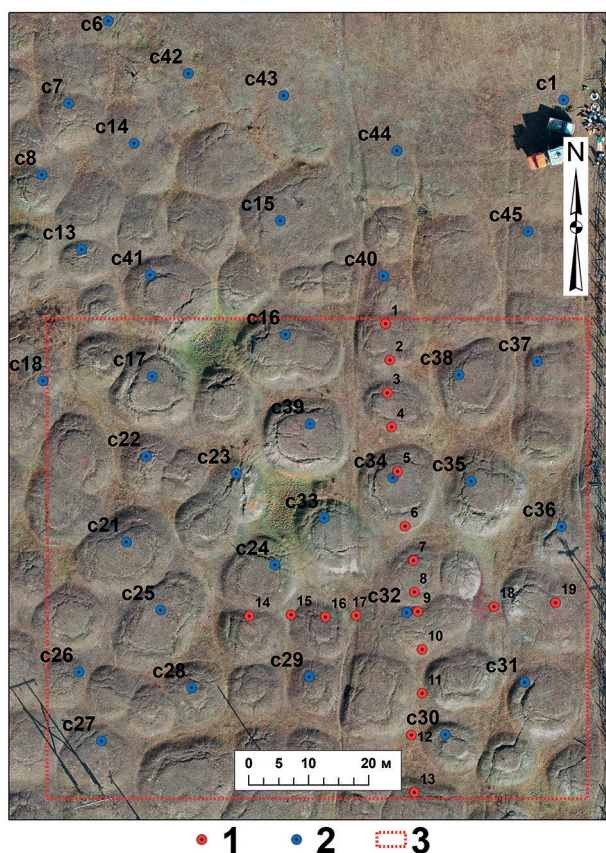


Рис. 2. Результаты проведённых работ: 1 — местоположение нивелирных точек; 2 — местоположение станций лазерного сканера; 3 — территория ключевого участка исследований

Последним служил кондуктор 15-метровой геотермической скважины — железной трубы диаметром 89 см. Нивелирные точки представляют собой забитые в почвенный покров на глубину 20 см деревянные бруски. Их местоположение было стационарным в течение всего периода наблюдений. Всего было установлено 19 точек, из них 9 были расположены на поверхности былларов, 10 — в ложбинках между былларами (см. *рис. 2*). При нивелировке нивелирная рейка устанавливалась с левой стороны деревянного бруска на поверхности почвенно-растительного слоя. Нивелировка проводилась с помощью оптического прибора производства немецкой компании Leica Camera AG, модель NA2. В результате нивелирной съёмки были получены данные сезонного и годового колебания поверхности для каждого репера.

Результаты исследований

Под годовой изменчивостью авторы понимают наблюдения, проведённые с сентября одного года по сентябрь следующего. Данный выбор связан с тем, что в середине или в конце сентября, в зависимости от приповерхностной температуры воздуха, наблюдается максимальная мощность сезонно-талого слоя, которая играет основную роль при формировании глубины просядок. С октября по апрель происходит процесс промерзания грунтов в зависимости от степени влажности и значений отрицательной зимней температуры и в результате поступления холода происходит промерзание сезонно-талого слоя. А в период с мая по сентябрь, в зависимости от приповерхностной температуры воздуха, влажности и температуры грунтов, в пределах деятельного слоя формируется толща сезонно-талого слоя, что отражается на годовой динамике первичных форм термокарстового рельефа. Кроме годовой изменчивости авторы выделяют сезонное изменение, которое фиксируется с мая по сентябрь каждого года.

Лазерное сканирование

На основе лазерного сканирования была рассчитана годовая и сезонная деформация термокарстовых процессов, общая глубина термокарстовых просядок и общий объём вытаявшего льда. Для этого был исследован полигон размером 80×90 м. Он охватил центральную часть ключевого участка (см. *рис. 2*). Максимальная глубина термокарстовой просядки в его пределах составляет 2,46 м (на *рис. 3* он отличается тёмным фототонном). В днище этой котловины в весенний период наблюдается застаивание талых весенних вод, к концу летнего сезона большая часть этих вод испаряется, а часть просачивается в грунты к фронту протаивания. Средняя глубина просядок равна 0,62 м, она была вычислена на основе 49 019 026 значений, полученных расчётом облака точек. С использованием полученных глубин термокарстовых просядок рассчитан общий объём вытаявшего льда для выделенного участка, равный 4464 м³.

Сезонное изменение поверхности ключевого участка исследований рассчитано для 2021 и 2022 гг. как разница ЦММ, созданных в начале формирования сезонно-талого слоя (15 мая 2021 г. и 22 мая 2022 г.) и в период его максимальной мощности (24 сентября 2021 г. и 17 сентября 2022 г.), а годовое — как разница ЦММ, созданных 24 сентября 2021 г. и 17 сентября 2022 г.

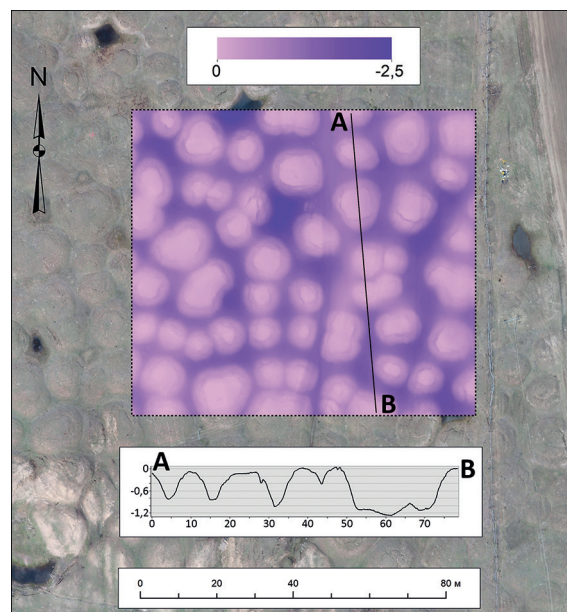


Рис. 3. Глубина термокарстовых просядок на ключевом участке исследований

При использовании наземного лазерного сканирования значения, полученные для поверхностей с водными объектами, были ошибочными из-за высокого преломления лучей лазера. Поэтому на участках, где в весенний период стояла талая вода (обозначены синим фототонном на *рис. 3*), значения оказались ошибочными и были исключены из выборки. Рассчитанные статистические параметры для указанного ключевого участка представлены в *табл. 1* и на *рис. 4*.

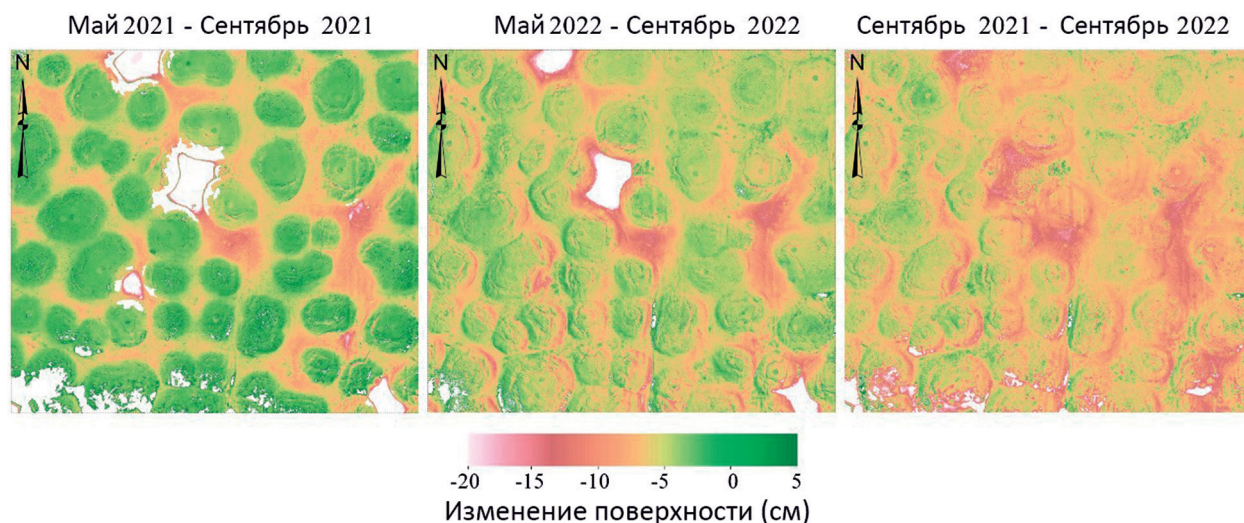


Рис. 4. Вертикальное смещение поверхности для ключевого участка исследований, полученное при помощи наземного лазерного сканера. Положительные и отрицательные значения соответствуют подъёму и опусканию поверхности. Белым указаны области без данных из-за ошибки при сканировании участков, на которых застаиваются весенние талые воды

Таблица 1. Результаты наземного лазерного сканирования

Значение	Май – сентябрь 2021 г., см	Май – сентябрь 2022 г., см	Сентябрь 2021 г. – сентябрь 2022 г., см
Среднее	–2,4	–4,1	–6,7
Минимальное	–17,0	–19,0	–20,0
Максимальное	2,0	1,0	5,0

Максимальная просадка за рассчитанные периоды составляет –20 см. Такие значения наблюдаются в пределах глубоких межбылларных западин, глубина которых может достигать 2,5 м. Наиболее низкие сезонные деформации отмечаются в вершинной части былларов, где большинство значений близко к 0 (см. *рис. 4*). В среднем за летние сезоны 2021 и 2022 гг. на ключевом участке исследований грунт осел на 2,4 и 4,1 см соответственно. В течение года поверхность в среднем оседает на 6,7 см. Объём вытаявшего льда за год наблюдений для выделенного участка составляет 482,4 м³, т. е. на каждый квадратный метр вытаяло 0,07 м³ льда.

Нивелирная съёмка

По результатам нивелирной съёмки вертикальная деформация поверхности с сентября 2021 г. по сентябрь 2022 г. на реперах варьируется от –5 до –12 см. Средняя величина составляет –8 см. Величины просадки грунта на поверхности былларов (реперы P1, P3, P5, P7, P9, P13, P14, P16, P19) за год исследований оказались ниже средней величины для всех наблюдаемых точек, минимальные значения составили –5 см, максимальные были –8 см (*табл. 2*). Для реперов, расположенных в ложбинках былларов (P2, P4, P6, P8, P10, P11, P12, P15, P17, P18), величина просадок варьируется от –7 до –12 см.

Таблица 2. Результаты нивелирной съёмки и наземного лазерного сканирования по нивелирным точкам

	Нивелирная съёмка, см			Лазерное сканирование, см		
	Май – сентябрь 2021 г.	Май – сентябрь 2022 г.	Сентябрь 2021 г. – сентябрь 2022 г.	Май – сентябрь 2021 г.	Май – сентябрь 2022 г.	Сентябрь 2021 г. – сентябрь 2022 г.
Среднее значение	–3	–6	–8	–2	–3	–5
Минимальное значение	–9	–11	–12	–7	–10	–13
Максимальное значение	1	–3	–5	3	1	–1
Относительная погрешность относительно нивелирной съёмки, %				61	50	32

Сезонное изменение поверхности первичных форм термокарстового рельефа изучено для 2021 и 2022 гг., средние их значения составляют –3 и –6 см соответственно. В 2021 г. с мая по сентябрь изменения варьируются от 1 до –9 см. Минимальные значения зафиксированы у реперов, расположенных на поверхности былларов, и их значение не превышает –1 см, а для реперов Р7, Р9, Р13 и Р14 наблюдается пучение на 1 см. Для реперов, расположенных на ложбинках былларов, значения проседания выше средних. Максимальные показатели составляют –9 см (репер Р18). В 2022 г. с мая по сентябрь для всех реперов наблюдается проседание грунтов. Максимальное значение равно –11 см (репер Р18). Для реперов, расположенных на поверхности былларов, в отличие от 2021 г. выявлено проседание грунтов от –1 до –3 см.

Обсуждение и выводы

При проведении нивелирной съёмки погрешность измерений в 100-метровом квадрате не превышала 2 мм и строго контролировалась. Для наземного лазерного сканирования существуют некоторые неопределённости, которые влияют на точность измерений. Главные из них — это инструментальные и технические ошибки, отражательная способность и шероховатость поверхности, густота растительного покрова и геометрия сканирования (Calders et al., 2017; Soudarissanane et al., 2011).

Для определения точности измерений динамики термокарстовых процессов с помощью наземного лазерного сканера полученные результаты были сопоставлены с данными нивелирной съёмки точек (используется как модельная) за циклы наблюдений. Максимальная разница в полученных измерениях не превышает 6 см. Доля точных совпадений или близких к ним (не более 1 см) от общего количества измерений составляет 43,8 %. Погрешность использованного метода относительно нивелирной съёмки указана в *табл. 2*. Она рассчитывалась умножением на процент деления абсолютного значения разницы измерений между значениями нивелирной съёмки и лазерного сканирования на модуль значения измерений нивелирной съёмки.

Полученные результаты годовой и сезонной изменчивости начальных форм термокарстового рельефа методом наземного лазерного сканирования для ключевого участка исследований согласуются с опубликованными ранее работами для Центральной Якутии. Так, на площадке Юкэчи нивелирная съёмка, которая проводилась на протяжении 1992–2012 гг., показала, что средний темп просадок термокарста составляет 5–10 см в год (Fedorov et al., 2014). Рассчитанные средние скорости оседания термокарста вблизи с. Чурапча на заброшенной пашне составляют 2,1 см в год, а на заброшенном аэродроме — 3,9 см в год (Saito et al., 2018). Для исследованного ключевого участка средние годовые значения проседания составили: для нивелирного хода — 8 см (сезонные — 3 см в 2021 г., 4 см в 2022 г), лазерного сканирования — 6,7 см (сезонные — 2,4 см в 2021 г., 4,1 см в 2022 г.).

Сравнительный анализ использованных методов показал, что точные измерения проводятся прямым наблюдением (нивелирование). Но применение их для площадных измерений представляется не совсем объективным. Для данных измерений выполнение качественного анализа зависит от частоты и количества заложенных пунктов наблюдений. Использование методов лазерного сканирования для оценки динамики термокарстовых процессов даёт исследователю более широкий спектр данных, позволяющий провести анализ на более качественном уровне с большим количеством данных. Однако в настоящее время методика исследований и широкий диапазон инструментальных ошибок не дают возможности с уверенностью выполнять подобные наблюдения.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда, проект № 19-78-10088 «Антропология холода: естественные низкие температуры в системе жизнеобеспечения сельских сообществ Якутии (традиционные практики, вызовы современности и стратегии адаптации)» (проведение полевых исследований — Лыткина В. М., Башарина Н. И. и Сивцева М. А. в 2022 г.), гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 21-55-15013 (проведение полевых исследований — Жиркова А. Ф., Кириллина А. Р., Сивцева М. А. в 2021 и 2022 гг., Лыткина В. М., Башарина Н. И. в 2021 г., анализ данных наземного лазерного сканирования и нивелирной съёмки), научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКТР) 122011800064-9 «Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене» (анализ и обобщение результатов исследований) и НИОКТР АААА-А20-120111690009-6 (проведение наземного лазерного сканирования и нивелирной съёмки).

Литература

1. Соловьев П. А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 143 с.
2. Anisimov O., Reneva S. Permafrost and changing climate: The Russian perspective // *AMBIO*. 2006. V. 35. No. 4. P. 169–175.
3. Biskaborn B. K., Smith S. L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale // *Nature Communications*. 2019. V. 10. P. 2041–2723. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
4. Calders K., Disney M. I., Armston J. et al. Evaluation of the range accuracy and the radiometric calibration of multiple terrestrial laser scanning instruments for data interoperability // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2017. V. 55. P. 2716–2724. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2652721.
5. Dixon J. C. Response of Periglacial Geomorphic Processes to Global Change // *Treatise on Geomorphology*. 2nd ed. 2022. V. 9. P. 440–457. DOI: 10.1016/B978-0-12-818234-5.00012-2.
6. Fedorov A. N., Gavriliev P. P., Konstantinov P. Y. et al. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia // *Ecohydrology*. 2014. V. 7. No. 2. P. 188–196. DOI: 10.1002/eco.1378.
7. Fedorov A. N., Vasilyev N. F., Torgovkin Y. I. et al. Permafrost-Landscape Map of the Republic of Sakha (Yakutia) on a Scale 1:1 500 000 // *Geosciences*. 2018. V. 8. Article 465. DOI: 10.3390/geosciences8120465.
8. Fischer L., Käab A., Huggel C., Noetzli J. Geology, glacier retreat and permafrost degradation as controlling factors of slope instabilities in a high-mountain rock wall: the Monte Rosa east face // *Nature Hazards Earth System Sciences*. 2006. No. 6. P. 761–772. DOI: 10.5194/nhess-6-761-2006.
9. Günther F., Overduin P. P., Sandakov A. V. et al. Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region // *Biogeosciences*. 2013. V. 10. P. 4297–4318. DOI: 10.5194/bg-10-4297-2013.
10. Jin H., Wu Q., Romanovsky V. E. Editorial: Degrading permafrost and its impacts // *Advances in Climate Change Research*. 2021. V. 12. No. 1. P. 1–5. DOI: 10.1016/j.accr.2021.01.007.
11. Jorgenson M. Thermokarst terrains // *Treatise on Geomorphology*. San Diego, California: Academic Press, 2013. P. 313–324. DOI: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00215-3.
12. Kokelj S. V., Jorgenson M. T. Advances in thermokarst research // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2013. V. 24. No. 2. P. 108–119. DOI: 10.1002/ppp.1779.
13. Konishchev V. N. Permafrost response to climate warming // *Earth's Cryosphere*. 2011. V. 15. No. 4. P. 15–18.

14. *Lewkowicz A. G., Way R. G.* Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a High Arctic environment // *Nature Communications*. 2019. V. 10. Article 1329. DOI: 10.1038/s41467-019-09314-7.
15. *Liljedahl A., Boike J., Daanen R. et al.* Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // *Nature Geoscience*. 2016. V. 9. P. 312–318. DOI: 10.1038/ngeo2674.
16. *Lytkin V., Suleymanov A., Vinokurova L. et al.* Influence of permafrost landscapes degradation on livelihoods of Sakha Republic (Yakutia) rural communities // *Land*. 2021. V. 10. No. 2. Article 101. DOI: 10.3390/land10020101.
17. *Morgenstern A., Overduin P. P., Günther F. et al.* Thermo-erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2021. V. 32. No. 1. P. 59–75. DOI: 10.1002/ppp.2087.
18. *Osterkamp T. E., Jorgenson M. T., Schuur E. A. G. et al.* Physical and ecological changes associated with warming permafrost and thermokarst in Interior Alaska // *Permafrost Periglacial Processes*. 2009. V. 20. No. 3. P. 235–256. DOI: 10.1002/ppp.656.
19. *Rowland J. C., Jones C. E., Altmann G. et al.* Arctic landscapes in transition: responses to thawing permafrost // *EOS, Trans. American Geophysical Union*. 2010. V. 91. No. 26. P. 229–230. DOI: 10.1029/2010EO260001.
20. *Runge A., Nitze I., Grosse G.* Remote sensing annual dynamics of rapid permafrost thaw disturbances with LandTrendr // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 268. Article 112752. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112752.
21. *Saito H., Iijima Y., Basharin N. I. et al.* Thermokarst development detected from high-definition topographic data in Central Yakutia // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. No. 10. Article 1579. DOI: 10.3390/rs10101579.
22. *Shestakova A. A., Fedorov A. N., Torgovkin Y. I. et al.* Mapping the Main Characteristics of Permafrost on the Basis of a Permafrost-Landscape Map of Yakutia Using GIS // *Land*. 2021. V. 10. No. 5. Article 462. DOI: 10.3390/land10050462.
23. *Smith S. L., O'Neill H. B., Isaksen K. et al.* The changing thermal state of permafrost // *Nature Reviews Earth Environment*. 2022. V. 3. P. 10–23. DOI: 10.1038/s43017-021-00240-1.
24. *Soudarissanane S., Lindenbergh R., Menenti M., Teunissen P.* Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 2011. V. 66. P. 389–399. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.01.005.
25. *Streletskiy D. A., Suter L. J., Shiklomanov N. I. et al.* Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the russian regions on permafrost // *Environmental Research Letters*. 2019. V. 14. No. 2. Article 25003. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6.
26. *Tananaev N., Lotsari E.* Defrosting northern catchments: Fluvial effects of permafrost degradation // *Earth-Science Reviews*. 2022. V. 228. Article 103996. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103996.
27. *Veremeeva A., Nitze I., Günther F. et al.* Geomorphological and climatic drivers of thermokarst lake area increase trend (1999–2018) in the Kolyma lowland yedoma region, North-Eastern Siberia // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. No. 2. Article 178. DOI: 10.3390/rs13020178.
28. *Zhirkov A., Sivtsev M., Lytkin V. et al.* An Assessment of the Possibility of Restoration and Protection of Territories Disturbed by Thermokarst in Central Yakutia, Eastern Siberia // *Land*. 2023. V. 12. No. 1. Article 197. DOI: 10.3390/land12010197.

Application of a terrestrial scanning laser in the study of annual and interannual variability of thermokarst in Central Yakutia

V. M. Lytkin^{1,2}, N. I. Basharin^{1,2}, A. F. Zhirkov¹, A. R. Kirillin¹, M. A. Sivtsev^{1,2}

¹ *Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk 677010, Russia*
E-mail: gidro1967@mail.ru

² *Institute for Humanities Research and Indigenous Studies of the North SB RAS*
Yakutsk 677027, Russia

The ongoing changes in climatic parameters influence the temperature regime of near-surface permafrost, leading to the development of hazardous surficial processes such as enhanced thermokarst activity in ice-rich permafrost terrain. Changes in the landscape can have adverse impacts on local communities in the Arctic. Understanding thermokarst development patterns is therefore critical. This article

presents the results of terrestrial laser scanning (TLS) for investigating the annual and interannual dynamics of thermokarst at a key study site near the village of Chapchylgan, Amga District, Republic of Sakha (Yakutia). The data derived from the point clouds with 1.2 cm/pixel resolution indicate that the surface of the study area covered by bylars (incipient thermokarst forms) has been settling at an average rate of 6.7 cm per year. Subsidence rates can be as high as 20 cm per year where the surface is covered by meltwater in spring. The TLS data were verified by a leveling survey at 19 points which showed an absolute error of 32 % for the annual observation cycle. In addition to surface subsidence, TLS can be used to obtain data on volume of thawed ground ice, depth of inter-bylar depressions and a digital terrain model in 1 cm resolution.

Keywords: thermokarst, terrestrial laser scanning, permafrost, permafrost degradation, ice complex, remote sensing

Accepted: 18.09.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-130-139

References

1. Soloviev P. A., *Kriolitizona severnoi chasti Leno-Amginskogo mezhdurech'ya* (Permafrost Zone of the Northern part of the Lena-Amga Interfluve), Moscow: Izd. AN SSSR, 1959, 143 p. (in Russian).
2. Anisimov O., Reneva S., Permafrost and changing climate: The Russian perspective, *AMBIO*, 2006, Vol. 35, No. 4, pp. 169–175.
3. Biskaborn B. K., Smith S. L., Noetzli J. et al., Permafrost is warming at a global scale, *Nature Communications*, 2019, Vol. 10, pp. 2041–2723, DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
4. Calders K., Disney M. I., Armston J. et al., Evaluation of the range accuracy and the radiometric calibration of multiple terrestrial laser scanning instruments for data interoperability, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2017, Vol. 55, pp. 2716–2724, DOI: 10.1109/TGRS.2017.2652721.
5. Dixon J. C., Response of Periglacial Geomorphic Processes to Global Change, *Treatise on Geomorphology*, 2nd ed., 2022, Vol. 9, pp. 440–457, DOI: 10.1016/B978-0-12-818234-5.00012-2.
6. Fedorov A. N., Gavriliev P. P., Konstantinov P. Y. et al., Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia, *Ecohydrology*, 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 188–196, DOI: 10.1002/eco.1378.
7. Fedorov A. N., Vasilyev N. F., Torgovkin Y. I. et al., Permafrost-Landscape Map of the Republic of Sakha (Yakutia) on a Scale 1:1 500 000, *Geosciences*, 2018, Vol. 8, Article 465, DOI: 10.3390/geosciences8120465.
8. Fischer L., Käab A., Huggel C., Noetzli J., Geology, glacier retreat and permafrost degradation as controlling factors of slope instabilities in a high-mountain rock wall: the Monte Rosa east face, *Nature Hazards Earth System Sciences*, 2006, No. 6, pp. 761–772, DOI: 10.5194/nhess-6-761-2006.
9. Günther F., Overduin P. P., Sandakov A. V. et al., Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region, *Biogeosciences*, 2013, Vol. 10, pp. 4297–4318, DOI: 10.5194/bg-10-4297-2013.
10. Jin H., Wu Q., Romanovsky V. E., Editorial: Degrading permafrost and its impacts, *Advances in Climate Change Research*, 2021, Vol. 12, No. 1, pp. 1–5, DOI: 10.1016/j.accre.2021.01.007.
11. Jorgenson M., Thermokarst terrains, *Treatise on Geomorphology*, 2013, pp. 313–324, DOI: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00215-3.
12. Kokelj S. V., Jorgenson M. T., Advances in thermokarst research, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2013, Vol. 24, No. 2, pp. 108–119, DOI: 10.1002/ppp.1779.
13. Konishchev V. N., Permafrost response to climate warming, *Earth's Cryosphere*, 2011, Vol. 15, No. 4, pp. 15–18.
14. Lewkowicz A. G., Way R. G., Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a High Arctic environment, *Nature Communications*, 2019, Vol. 10, Article 1329, DOI: 10.1038/s41467-019-09314-7.
15. Liljedahl A., Boike J., Daanen R. et al., Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology, *Nature Geoscience*, 2016, Vol. 9, pp. 312–318, DOI: 10.1038/ngeo2674.
16. Lytkin V., Suleymanov A., Vinokurova L. et al., Influence of permafrost landscapes degradation on livelihoods of Sakha Republic (Yakutia) rural communities, *Land*, 2021, Vol. 10, No. 2, Article 101, DOI: 10.3390/land10020101.
17. Morgenstern A., Overduin P. P., Günther F. et al., Thermo-erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2021, Vol. 32, No. 1, pp. 59–75, DOI: 10.1002/ppp.2087.

18. Osterkamp T. E., Jorgenson M. T., Schuur E. A. G. et al., Physical and ecological changes associated with warming permafrost and thermokarst in Interior Alaska, *Permafrost Periglacial Processes*, 2009, Vol. 20, No. 3, pp. 235–256, DOI: 10.1002/ppp.656.
19. Rowland J. C., Jones C. E., Altmann G. et al., Arctic landscapes in transition: responses to thawing permafrost, *EOS, Trans. American Geophysical Union*, 2010, Vol. 91, No. 26, pp. 229–230, DOI: 10.1029/2010EO260001.
20. Runge A., Nitze I., Grosse G., Remote sensing annual dynamics of rapid permafrost thaw disturbances with LandTrendr, *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 268, Article 112752, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112752.
21. Saito H., Iijima Y., Basharin N. I. et al., Thermokarst development detected from high-definition topographic data in Central Yakutia, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No. 10, Article 1579, DOI: 10.3390/rs10101579.
22. Shestakova A. A., Fedorov A. N., Torgovkin Y. I. et al., Mapping the Main Characteristics of Permafrost on the Basis of a Permafrost-Landscape Map of Yakutia Using GIS, *Land*, 2021, Vol. 10, No. 5, Article 462, DOI: 10.3390/land10050462.
23. Smith S. L., O'Neill H. B., Isaksen K. et al., The changing thermal state of permafrost, *Nature Reviews Earth Environment*, 2022, Vol. 3, pp. 10–23, DOI: 10.1038/s43017-021-00240-1.
24. Soudarissanane S., Lindenbergh R., Menenti M., Teunissen P., Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, Vol. 66, pp. 389–399, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.01.005.
25. Streletskiy D. A., Suter L. J., Shiklomanov N. I. et al., Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost, *Environmental Research Letters*, 2019, Vol. 14, No. 2, Article 25003, DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6.
26. Tananaev N., Lotsari E., Defrosting northern catchments: Fluvial effects of permafrost degradation, *Earth-Science Reviews*, 2022, Vol. 228, Article 103996, DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103996.
27. Veremeeva A., Nitze I., Günther F. et al., Geomorphological and climatic drivers of thermokarst lake area increase trend (1999–2018) in the Kolyma lowland yedoma region, North-Eastern Siberia, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 2, Article 178, DOI: 10.3390/rs13020178.
28. Zhirkov A., Sivtsev M., Lytkin V. et al., An Assessment of the Possibility of Restoration and Protection of Territories Disturbed by Thermokarst in Central Yakutia, Eastern Siberia, *Land*, 2023, Vol. 12, No. 1, Article 197, DOI: 10.3390/land12010197.