

=====

Инновациялық технология және авиациялық техника
Инновационные технологии и авиационная техника
Innovative technology and aviation technics

=====

DOI 10.53364/24138614_2023_28_1_7
УДК 551.3:528.837

¹ Бекболатова А.Б*, ¹Ожигин Д.С., ¹Глеубекова Н.А.
¹ Карагандинский технический университет, г. Караганда, РК.

*E-mail: worldsocold09@gmail.com

**ПРОЦЕСС ИЗМЕРЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ВЫСОТЫ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ,
ПОДВЕРЖЕННОЙ ТАЯНИЮ И ТЕРМОКАРСТУ, С ПОМОЩЬЮ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫНЫҢ КӨМЕГІМЕН БАЛҚУ МЕН
ТЕРМОКАРСТҚА БЕЙІМ МӘҢГІ МҰЗ БИІКТІГІНІҢ ӨЗГЕРУІН ӨЛШЕУ
ПРОЦЕСІ**

**THE PROCESS OF MEASURING CHANGES IN THE HEIGHT OF PERMAFROST
EXPOSED TO DECAU AND THERMOKARST USING UNMANNED AERIAL
VEHICLES**

Аннотация: В данной статье представлены методы наземного и дистанционного зондирования для измерения изменений высоты вечной мерзлоты с различными уровнями точности и пространственного охвата.

Ключевые слова: термокастра, БПЛА, мерзлота, дрон, аэрофотосъемка.

Аңдатпа: Бұл мақалада дәлдік пен кеңістіктік қамтудың әртүрлі деңгейлері бар мәңгі мұз биіктігінің өзгеруін өлшеуге арналған жердегі және қашықтықтан зондтау әдістері берілген.

Түйін сөздер: термокастра, ұшқышсыз ұшу аппараттары, мұз, дрон, аэрофототүсірілім.

Abstract: This article presents methods of ground and remote sensing for measuring changes in permafrost height with different levels of accuracy and spatial coverage.

Keywords: thermocasta, UAVs, ice, drone, aerial photography.

Введение. Вечная мерзлота описывает почвы и другие грунтовые материалы, которые непрерывно промерзают в течение двух или более лет и находятся под зоной сезонно оттаивающих грунтов, называемой активным слоем. Рельеф вечной мерзлоты обычно испытывает циклические колебания высоты из-за ежегодных циклов замерзания-оттаивания в активном слое. Замерзание грунтовых вод их расширение осенью вызывают поднятие или пучение местности, в то время как таяние ледяных линз и пористого льда весной и летом вызывает проседание местности. Долгосрочные однонаправленные изменения высоты могут быть результатом таяния вечной мерзлоты, особенно в богатых льдом средах, оставляя после себя обрушившуюся поверхность земли из-за таяния подземного льда. Например, постепенное длительное таяние массивного подземного льда может привести к медленному и равномерному опусканию поверхности ландшафта, которое может быть не обнаружено как

утолщающийся активный слой.

Периоды аномальной летней жары или увеличения количества осадков могут также вызывать более быстрые формы деградации вечной мерзлоты, называемые термокарстом. Термокарст включает такие нарушения, как регрессивное оползание оттаивания, обрушение торфяных плато и оседающие сети ледяных жил. Важно иметь возможность отслеживать эти пространственно неравномерные изменения поверхности, вызванные оттаиванием, поскольку они могут негативно повлиять на северную инфраструктуру, экосистемы и качество воды.

Было разработано несколько методов наземного и дистанционного зондирования для измерения изменений высоты вечной мерзлоты с различными уровнями точности и пространственного охвата. Методы на месте включают использование стальных или стекловолоконных стержней, закрепленных в вечной мерзлоте, чтобы обеспечить стабильную точку отсчета, по которой можно измерить локальные изменения высоты.

Методы. Было разработано несколько методов наземного и дистанционного зондирования для измерения изменений высоты вечной мерзлоты с различными уровнями точности и пространственного охвата. Методы на месте включают использование стальных или стекловолоконных стержней, закрепленных в вечной мерзлоте, чтобы обеспечить стабильную точку отсчета, по которой можно измерить локальные изменения высоты. Модифицированные алюминиевые трубы для оттаивания, также закрепленные в вечной мерзлоте, можно использовать для определения годовых или сезонных уровней проседания грунта в отдельных местах. Более непрерывная регистрация подъема и опускания местности может производиться с помощью таких инструментов, как наклоняющие руки с каротажными инклинометрами, который может измерять изменения с временным разрешением от часового до дневного и с точностью до миллиметра. Повторные измерения с использованием приемников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и дифференциальной коррекции являются еще одним методом определения изменений высот вечной мерзлоты в нескольких точках. Родственным методом является интерферометрическая рефлектометрия GPS, которая может использовать отраженные сигналы базовой станции GPS для непрерывного измерения изменений высоты на площади около 1000 м², если поверхность земли относительно открытая, плоская и однородная. В целом, эти подходы к мониторингу на месте могут обеспечить высокую точность мониторинга изменений высот, но, как правило, ограничиваются отбором проб в небольшом количестве наземных точек, тем самым ограничивая понимание региональных и ландшафтных последствий в отношении стабильности рельефа из-за таяния вечной мерзлоты.

Имеются методы дистанционного зондирования для наблюдения за проседанием грунта из-за таяния вечной мерзлоты на локальных или ландшафтных участках. Повторное лазерное сканирование с бортовых или наземных платформ, а также обычная фотограмметрическая обработка могут быть использованы для создания трехмерных облаков точек или цифровых моделей рельефа (ЦМР), изменения которых использовались для измерения оседания вечной мерзлоты в результате таяния. Основным ограничением этого подхода является его относительно высокая стоимость и усилия, особенно потому, что для измерения изменений высоты требуются повторные измерения. Эти ограничения снижают доступность данных по Арктике и субарктике, особенно за пределами населенных пунктов и инфраструктурных коридоров, и ограничивают временное разрешение повторных съемок для обнаружения термокарстовых процессов и форм рельефа.

В качестве альтернативы, спутниковый дифференциальный интерферометрический радар с синтезированной апертурой (D-InSAR) представляет собой метод дистанционного зондирования, который измеряет разность фаз радиолокационных волн между повторными спутниковыми наблюдениями. Эти разности фаз можно использовать для измерения смещений грунта на уровне сантиметра или выше в условиях вечной мерзлоты в региональном масштабе с пространственным разрешением от одного до нескольких метров. Несмотря на то, что измерения D-InSAR очень точны, они могут не всегда хорошо согласовываться с наблюдениями на месте или им могут мешать атмосферные влияния, потеря когерентности изображения на влажных, покрытых растительностью или снегом поверхностях, а также необходимость определения контрольных точек высоты. D-InSAR также имеет верхний предел обнаружения, за пределами которого фактические изменения высоты не регистрируются из-за фазовой декорреляции. В этих случаях большие величины оседания могут вызвать потерю когерентности, если временные наблюдения разнесены слишком далеко друг от друга. Более грубое разрешение более широкодоступных и свободно доступных продуктов D-InSAR по

сравнению с типичными элементами термокарста, такими как оттаивающие края обрушающихся торфяников или оседающие жилы льда, также может привести к затруднениям при интерпретации процессов проседания.

Таким образом, несмотря на достижения в традиционных аэронавигационных и спутниковых методах, необходимо решение для мониторинга с высокой воспроизводимостью, которое может быть связано с полевыми наблюдениями за изменением высоты вечной мерзлоты и дополнять другие методы, охватывающие большие площади.

В последнее десятилетие аэросъемка с помощью дронов в сочетании с фотограмметрией Structure-from-Motion (SfM) стала популярным средством для создания плотных трехмерных облаков точек и ЦМР для мониторинга высот в различных природных и антропогенных условиях, включая вечную мерзлоту. В нескольких исследованиях для измерения изменений высоты местности вечной мерзлоты, вызванных береговой эрозией, поднятием грунта, осадкой и оседанием, использовались повторные фотосъемки с дронов. Кроме того, стоимость инструментов LiDAR для дронов снижается, что делает их более практичной альтернативой фотограмметрии с дронов. В предыдущих исследованиях вечной мерзлоты с помощью дронов использовались самые разные дроны и камеры, от потребительских дронов с камерами со скользящими затворами, не предназначенными специально для картографических приложений, до геодезических дронов с предварительно откалиброванными камерами с глобальным затвором и бортовыми двухчастотными GNSS-приемниками, которые позволяют для точного кинематического позиционирования (Рисунок 1). Одна из проблем, связанных с съемкой дронами, особенно в условиях вечной мерзлоты, заключается в том, что обычно нельзя предполагать, что поверхность земли имеет стабильную высоту, что требует повторной съемки наземных контрольных точек и, возможно, местоположения базовой станции для выполнения повторных миссий.

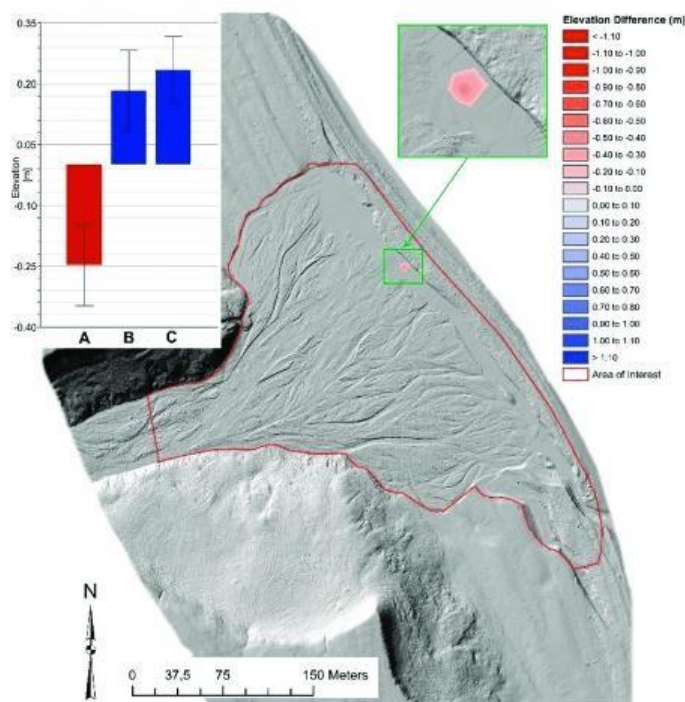


Рисунок 1. Цифровая модель перепада высот (июль 2010 года с MinLoD = 0.1. Описание стержней на диаграмме: (А) Средняя глубина опускания; (Б) Средняя глубина подъема; (В) Средняя общая разница в толщине.

Точность, с которой топографические изменения могут быть измерены с помощью повторяющихся ЦМР, чаще всего оценивается с использованием подхода бюджета ошибок (уравнение 1). Это определяет наименьший уровень изменения высоты, который может быть обнаружен (minLoD) с достоверностью 95 % путем распространения расчетных ошибок. Термин (reg) может быть включен для обозначения дополнительной потери точности изменения из-за ошибки

совмещения между двумя ЦМР.

$$\min\text{LoD}_{95\%}(d) = \pm 1.96(\sqrt{\text{RMSEz}_1^2 + \text{RMSEz}_2^2} + \text{reg}) \quad (1)$$

В уравнении 1 $\min\text{LoD}_{95\%}(d)$ — это наименьшее изменение высоты, которое может быть обнаружено с достоверностью 95%, RMSEz_i — среднеквадратическая ошибка высоты для i -й ЦМР, а reg представляет собой вертикальную ошибку несовпадения между двумя ЦМР.

Цель состоит в том, чтобы исследовать подходы к снижению $\min\text{LoD}$ измерений высоты с помощью дронов за счет повышения уровня точности, чтобы будущие временные ряды более точно соответствовали наблюдениям на месте и в то же время могли быть интегрированы с дополнительными методами, такими как как LiDAR и D-InSAR.

Заключение. Съемки с дронов с высоким разрешением (< 1 см), полученные с помощью картографического дрона с возможностью прямой геопривязки RTK/PPK, в сочетании с одной стабильной целью GCP, могут воспроизводить высоты со средним абсолютным отклонением в доли сантиметра. Этот уровень изменчивости подразумевает, что порог изменения высоты 1,4 см устранил 95% ложных изменений высоты, обнаруженных путем разности пары повторяющихся ЦМР. Совместное согласование съемок с дронов с использованием общих связующих точек может обеспечить эффективное средство обнаружения небольших (> 3 см) изменений высоты, когда не собираются опорные точки. Однако эту стратегию может быть рискованно применять в условиях вечной мерзлоты, если наблюдаются однородные изменения высоты на большой площади или внешний вид поверхности земли значительно изменился в областях, охватывающих несколько изображений с беспилотников.

Когда наземные цели имеют похожий внешний вид и свойства (например, относительно плоские участки голой почвы или асфальта), высота $\min\text{LoD}$ пространственно сгруппирована и, по-видимому, определяется в основном пространственной изменчивостью в управлении съемкой с помощью дронов и GCP GNSS.

Список литературы:

1. Антонова С., «Проседание оттаивания ландшафта Едома в Северной Сибири, измеренно на месте и оцененное с помощью интерферометрии», 2018 г, 49-54с.
2. Маховски П. «От потребительского до корпоративного уровня: как выбор четырех беспилотных летательных аппаратов влияет на качество облака точек. Земной прибор. Процесс. Формы рельефа», 2021г, 118-126с.

References:

1. Antonova S., "Thawing subsidence of the Edom landscape in Northern Siberia, measured on site and evaluated using interferometry", 2018, P.49-54с.
2. Makhovsky P. "From the consumer to the corporate level: how the choice of four unmanned aerial vehicles affects the quality of the point cloud. Earth surf. Process. Relief forms", 2021, 118-126с.

Материал поступил в редакцию 06.03.2023 г.