

УДК 551.345

## ИНДИКАТОРЫ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ

© 2020 г. Е. С. Королева<sup>1,\*</sup>, Р. Р. Хайруллин<sup>1</sup>, Е. А. Бабкина<sup>1</sup>, Е. А. Слагода<sup>1,3</sup>, А. В. Хомутов<sup>1,3</sup>, академик РАН В. П. Мельников<sup>1,2,3,4</sup>, Е. М. Бабкин<sup>1</sup>, Я. В. Тихонравова<sup>1,5</sup>

Поступило 26.12.2019 г.

После доработки 15.01.2020 г.

Принято к публикации 26.01.2020 г.

Дистанционные методы позволяют оценить реакцию криолитозоны и тундровых ландшафтов труднодоступных районов Арктики на основе индикаторов современных изменений климата. На севере Западной Сибири в 2016–2019 гг. на поверхности торфяников хасыреев южной тундры Пур-Тазовского междуречья обнаружены и изучены многочисленные органические пятна-медальоны. Установлено, что образование пятен-медальонов за счет инъекций органической массы происходит в летний период, и они являются показателем локального увеличения глубины сезонного протаивания. Появление пятен-медальонов на торфяниках в летний период впервые визуально установлено с помощью анализа съемок, выполненных беспилотным летательным аппаратом в 2019 г. Локальные изменения глубины сезонно-талого слоя полигональных торфяников за счет органических пятен-медальонов являются индикатором реакции многолетнемерзлых пород на современное потепление климата. Ключевые слова: торфяник, сезонно-талый слой, пятна-медальоны, беспилотные летательные аппараты, климатические условия.

*Ключевые слова:* торфяник, сезонно-талый слой, пятна-медальоны, беспилотные летательные аппараты, климатические условия.

DOI: 10.31857/S2686739720030093

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в Арктике, в том числе в южной тундре Западной Сибири, происходит активизация криогенных процессов. В торфяниках хасыреев Пур-Тазовского междуречья особенно широко распространены процессы термокарста по полигонально-жильным льдам и термоэрозия. В 2016–2019 гг. на поверхности торфяников были обнаружены и изучены органические пятна-медальоны. Причины и условия об-

разования органических пятен-медальонов отличаются от известного механизма образования минеральных пятен-медальонов, связанных с промерзанием сезонно-талого слоя (СТС) [1]. Был предложен новый механизм формирования органических пятен-медальонов в торфяниках, связанный с увеличением глубины СТС и накоплением газа в оттаявшем многолетнемерзлом торфе. Локальное понижение кровли многолетнемерзлых пород (ММП) и увеличение мощности СТС в полигональных торфяниках хасыреев, впервые зафиксированное в 2016 г., было спровоцировано теплым и сухим летним периодом. Инъекции органической массы на поверхность в теплый сезон были вызваны ростом давления в локальной замкнутой системе свежоттаявшего торфа, границы которой образуют верхняя реликтовая и нижняя современная границы СТС [2]. Полигональные торфяники занимают обширные пространства тундры Арктической зоны России, поэтому весьма актуален прогноз развития озерного термокарста за счет нарушений растительного покрова и локального увеличения СТС на фоне современных изменений климата.

<sup>1</sup> Институт криосферы Земли, Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Тюмень, Россия

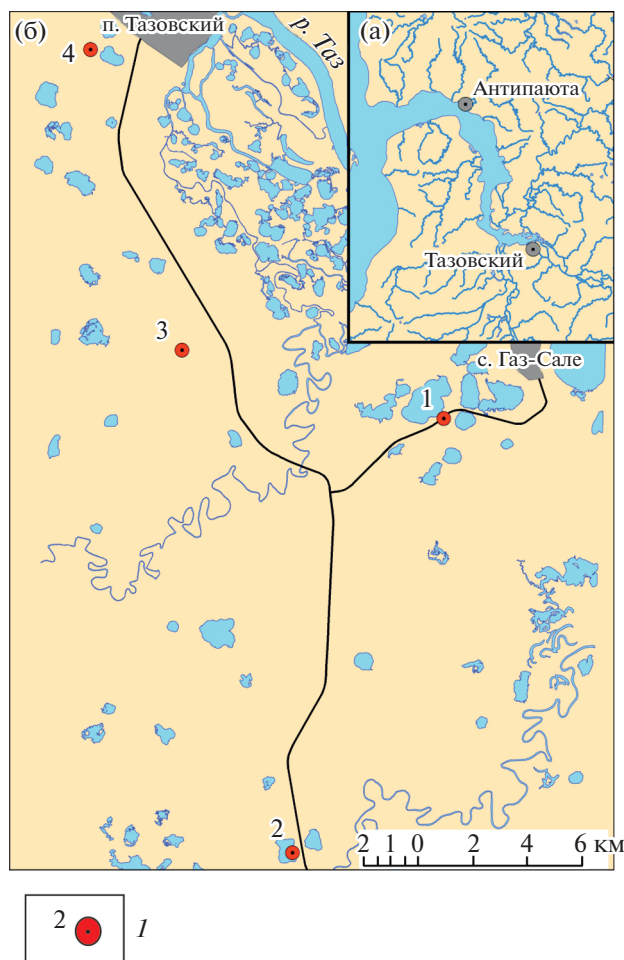
<sup>2</sup> Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

<sup>3</sup> Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

<sup>4</sup> Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Тюмень, Россия

<sup>5</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия

\*E-mail: koroleva\_katy@inbox.ru

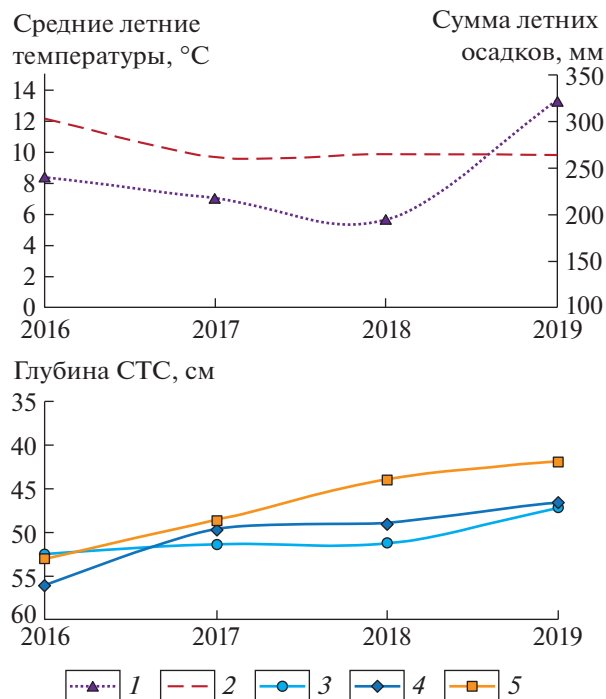


**Рис. 1.** Расположение района исследования (а), опорные участки исследований торфяников в хасыреях (б). 1 – опорные участки исследования.

Одним из методов изучения активности криогенных процессов является дешифрирование результатов аэро- и космосъемки разных лет [3], в настоящее время развивается дистанционный мониторинг с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [4]. Для детальной съемки БПЛА в летний период необходимо определение индикатора локальных изменений глубины сезонного протаивания торфяников.

### РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

В пределах III озерно-аллювиальной равнины изучены полигональные торфяники хасыреев, расположенных в северной части Пур-Тазовского междуречья (рис. 1а). Среднегодовая температура воздуха в районе исследования за период с 2005 по 2019 гг. составляла  $-6.7^{\circ}\text{C}$  [5], что на  $2.6^{\circ}\text{C}$  выше относительно холодного периода до 1989 г. [6]. Средние летние температуры воздуха за пери-



**Рис. 2.** Глубина СТС на разных элементах микро-рельефа торфяника. 1 – сумма летних осадков; 2 – средние летние температуры воздуха; Глубина СТС: 3 – в центральной части полигонов; 4 – в периферийной части полигонов; 5 – в межполигональных понижениях.

од 2016–2019 гг. были выше, чем в 1969–1989 гг. ( $9.3^{\circ}\text{C}$ ) на  $0.4$ – $2.9^{\circ}\text{C}$ , летняя сумма осадков незначительно уменьшилась на  $30$ – $150$  мм по сравнению с предшествующим периодом – около  $250$ – $350$  мм (рис. 2) [7]. Район относится к подзоне южной тундры с температурой многолетне-мерзлых пород от  $0$  до  $-1.0^{\circ}\text{C}$  и понижается до  $-1.5^{\circ}\text{C}$  на выпукло-бугристых торфяниках. Глубина СТС для торфяников в среднем составляет  $0.4$  м [6].

В северной части Пур-Тазовского междуречья изучено 4 хасырея с абсолютными отметками поверхности  $6$ – $9$  м и полигональными торфяниками (рис. 1б). В пределах хасыреев выделены зоны с четким полигональным рельефом и плоские, заболоченные ложбины стока, приуроченные к перегибам поверхности высокой террасы и плоских днищ, к насыпям дорог с водопропускными трубами. Черные органические пятна-медальоны на поверхности торфяников распространены неравномерно. На выпуклых и плоских полигонах они приурочены к понижениям между кочками или между мелкими бугорками на валиках. На краях полигонов черные органические пятна сползают вниз в межполигональные понижения.

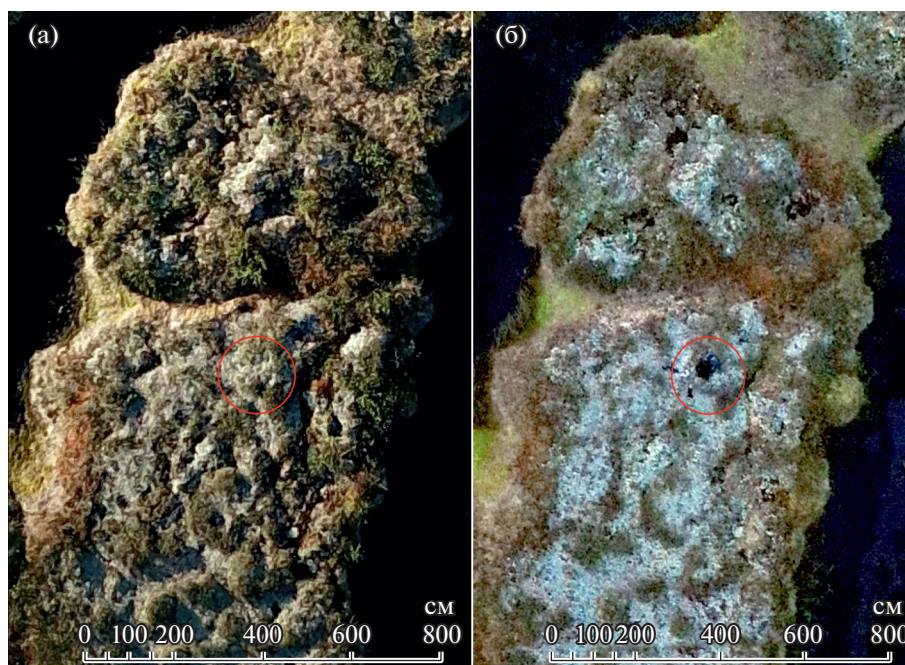


Рис. 3. Фрагменты ортофотопланов, построенных на основе съемок с БПЛА для Торфяника 4: а – 01.07.2019, б – 15.09.2019 г.

*Торфяник 1*, нарушенный дорожной насыпью, характеризуется активным термоэрозийным разрушением полигональной системы [8]. *Торфяник 2*, ограниченный автомобильной дорогой и озером, характеризуется участками плоскобугристого полигонального рельефа, которые разделены ложбинами стока; на полигонах преобладает кочковатый микрорельеф с полигональными ваннами и валиками по периферии, местами полигоны полностью заросли кустарником. *Торфяник 3* расположен на удалении от дорог, отличается интенсивными просадками поверхности над протаивающими ледяными жилами. *Торфяник 4* расположен на удалении от грунтовых насыпей в бессточном хасырее. Полигоны торфяника окружены глубокими промоинами с застойной водой над вытаивающими ледяными жилами. *Торфяники 3 и 4* не имеют техногенных нарушений и являются фоновыми для проведения мониторинга.

На всех элементах микрорельефа торфяников в 2016–2019 гг. была измерена глубина СТС: в центральных и периферийных частях полигонов, под органическими пятнами-медальонами, в увлажненных, переувлажненных и затопленных водой межполигональных понижениях. Глубина СТС на нарушенном *торфянике 1* изменялась от 42 см в межполигональных понижениях до 56 в периферийных частях полигонов. Наибольшие значения отмечены летом 2016 г., характеризующимся аномально высокими температурами воздуха. В периферийных частях полигонов СТС был на 6%

глубже, чем на других поверхностях, поскольку межполигональные понижения не были заполнены водой. В 2017–2019 гг. уменьшение глубины СТС выявлено для всех элементов микрорельефа торфяника. В особенности, в межполигональных понижениях уменьшение составило до 16% за счет уплотнения слоев торфа, что связано с относительным понижением средней летней температуры (рис. 2). На *торфяниках 3 и 4*, не подвергшихся техногенному влиянию, глубина СТС в 2018–2019 гг. на поверхностях полигонов и их периферийных частях была выше на 12–14% относительно полигональных понижений.

При сравнении глубины СТС на фоновых и нарушенных полигональных торфяниках выявлено, что она отличается в среднем на 4%. Наименьшее протаивание выявлено на полигонах, наибольшее – в периферийных частях полигонов, что приводит к оползанию торфа и расширению межполигональных промоин.

Черные органические пятна-медальоны на поверхности полигонов перекрывают мохово-травянистый и лишайниковый растительный покров по наблюдениям в 2016–2019 гг. Глубина СТС под органическими пятнами в эти годы была меньше на 5–10 см – до 20% по сравнению с окружающей поверхностью полигонов [2]. Увеличение темнокрашенной поверхности, за счет образования новых пятен-медальонов на торфяниках, приводит к неравномерному прогреву [9] и увеличению глубины СТС на полигонах и, вместе с расшире-

нием межполигональных промоин, способствует развитию просянок и термокарста.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для полигональных торфяников опорных участков получены оптические данные дистанционного зондирования с использованием съемки с БПЛА за два временных среза (1–7 июля и в период максимального протаивания 12–15 сентября 2019 г.). Материалы съемок обработаны в программе Agisoft Metashape Professional и представлены в виде ортофотопланов с разрешением ~0.02 м. Общая площадь пересечения летних и осенних съемок 4 отдельных площадок торфяных массивов составила около 0.4 км<sup>2</sup>. Для каждого участка в результате наблюдений на местности выявлены черные пятна-медальоны, что позволило выполнить сравнительный анализ полученных разновременных ортофотопланов.

В результате по сентябрьским ортофотопланам было выявлено 14 новых пятен-медальонов: 7 – на нарушенном и 7 – на фоновых участках; а по июльским данным пятна-медальоны в этих точках отсутствовали. Наиболее однозначно пятна выделены на поверхности *торфяника 4*, благодаря их большим размерам и отсутствию техногенных нарушений. Пятна имеют округло-овальную форму и размеры: 40 × 47, 50 × 80, 12 × 16, 24 × 25 см (рис. 3). Наличие пятен на сентябрьских данных с БПЛА и их отсутствие на более ранних июльских однозначно указывают на формирование органических пятен-медальонов именно в летний период между датами съемки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате 4-летних наблюдений за изменением поверхности полигональных торфяников в южной тундре Пур-Тазовского междуречья выявлено образование черных органических пятен-медальонов, перекрывающих растительный покров. Установлено, что образование черных пятен-медальонов сопровождается локальным увеличением глубины сезонного протаивания до 20% на фоне увеличения летних температур воздуха. С помощью разновременных съемок с БПЛА доказано, что органические пятна-медальоны образуются в летний период. Органические пятна-медальоны на поверхности и инъекции в разрезах полигональных торфяников обусловлены повышением летних температур воздуха и являются следствием неравномерного локального понижения кровли многолетнемерзлых пород. Пятна-медальоны могут служить дистанционным индикатором (при мониторинге с БПЛА) увеличения глубины СТС в полигональных торфяниках на фоне современного потеп-

ления климата в труднодоступных районах Арктики.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 18–55–11005 АФ\_т “Механизмы, траектории и пятнистость изменений арктических экосистем, вызванных потеплением климата (КлимЭко), 18–05–60222 Арктика “Криогенные рельефообразующие процессы Арктических равнин с подземными льдами в условиях современных климатических колебаний вдоль Карской субширотной трансекты”, 19-45-890011 “Оценка устойчивости полигональных торфяников северной части Пур-Тазовского междуречья к антропогенному воздействию на фоне климатических изменений”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общее мерзлотоведение (геокриология) / Учебник. Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ. 1978. 464 с.
2. Королева Е.С., Тихонравова Я.В., Мельников В.П. и др. Формирование пятен-медальонов в полигональных торфяниках Пур-Тазовского междуречья на фоне современного потепления // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 6. С. 42–51.
3. Cunliffe A.M., Tanski G., Radosavljevic B., et al. Rapid Retreat of Permafrost Coastline Observed with Aerial Drone Photogrammetry // The Cryosphere. 2019. V. 13. № 5. P. 1513–1528.
4. Lousada M., Pina P., Vieira G., et al. Evaluation of the Use of Very High Resolution Aerial Imagery for Accurate Ice-Wedge Polygon Mapping (Adventdalen, Svalbard) // Sci. Total Environ. 2018. V. 615. P. 1574–1583.
5. Архив погоды в Тазовском // Расписание погоды rp5.ru: сайт. URL: [http://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Тазовском](http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Тазовском)
6. Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 454 с.
7. База данных гидрометеорологических наблюдений суточного разрешения URL://<https://ib.komisc.ru/climat/viewdata.php>
8. Бабкин Е.М., Хомутов А.В., Дворников Ю.А. и др. Изменение рельефа торфяника с вытаивающим полигонально-жильным льдом в северной части Пур-Тазовского междуречья // Проблемы региональной экологии. 2018. № 4. С. 115–119.
9. Общая геокриология / Учебник. Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ. 2002. 682 с.

## SEASONAL THAWING LOCAL CHANGES INDICATORS FOR UAV-BASED CRYOLITHOZONE MAPPING

**E. S. Koroleva<sup>a,#</sup>, R. R. Khairullin<sup>a</sup>, E. A. Babkina<sup>a</sup>, E. A. Slogoda<sup>a,c</sup>, A. V. Khomutov<sup>a,c</sup>,  
Academician of the RAS V. P. Melnikov<sup>a,b,c,d</sup>, E. M. Babkin<sup>a</sup>, and Ya.V. Tikhonravova<sup>a,e</sup>**

<sup>a</sup> *Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Tyumen, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation*

<sup>c</sup> *Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation*

<sup>d</sup> *Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation*

<sup>e</sup> *Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: koroleva\_katy@inbox.ru*

Remote sensing methods allow to estimate cryolithozone and tundra landscapes reaction to climate change in hard-to-reach areas of Arctic region. In the northern part of West Siberia (specifically Pur-Taz interfluvium) numerous organic frost boils were discovered on the drained lake peatland surfaces and studied in 2016–2019. Formation of frost boils caused by organic mass injection in summertime has been established. Frost boils were determined as indicator of local deepening of seasonal thaw layer. Frost boils emerging at peatlands in summertime was identified after analysis of UAV survey in 2019. Local deepening of seasonal thaw layer at polygonal peatlands caused by organic mass injection is one of the evidences of permafrost reaction to the global warming.

*Keywords:* peatland, seasonal thaw layer, frost boils, UAV, climate conditions