

Анализ изменения торфяников северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья по дистанционным и наземным данным мониторинга

Р. Р. Хайруллин¹, А. В. Хомутов^{1,2,3}, Ю. А. Дворников¹,
Е. М. Бабкин¹, Е. А. Бабкина¹, Д. Д. Сощенко²

¹ *Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, 625000, Россия*
E-mail: rustam93-93@bk.ru

² *Тюменский государственный университет, Тюмень, 625003, Россия*
E-mail: akhomutov@gmail.com

³ *Тюменский индустриальный университет, Тюмень, 625000, Россия*
E-mail: akhomutov@gmail.com

Работа посвящена анализу изменений рельефа участка торфяника в северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья с 2005 по 2018 г. с использованием спутниковых снимков, а также ортофотопланов, построенных на основе съёмки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Кратко описаны доступные для проведения исследования материалы, процесс обработки изображений, получаемых при БПЛА-съёмке, для создания ортофотоплана и преимущества используемого подхода. Приведена подробная статистика по изменениям площадей исследованных торфяных полигонов и межполигональных понижений. По результатам анализа установлена нелинейность процесса деградации торфяных полигонов и разрушения межполигональных понижений. Несмотря на отсутствие данных между 2005 и 2016 гг., установлено, что темпы вытаивания полигонально-жильного льда и последующей деградации торфяника сильно различаются: количественные изменения, произошедшие с 2005 по 2016 г., практически сопоставимы с изменениями 2016–2018 гг. Также в работе сравниваются данные тахеометрической съёмки объекта исследования с данными, полученными с помощью БПЛА. Использование БПЛА для исследований такого рода признаётся более эффективным и точным за счёт ряда преимуществ перед традиционной тахеометрической съёмкой.

Ключевые слова: торфяник, вытаивание полигонально-жильных льдов (ПЖЛ), БПЛА, построение ортофотоплана, дистанционное зондирование, тахеометрическая съёмка

Одобрена к печати: 02.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-54-62

Введение

Мониторинг геосистем — важная составляющая исследования их изменений, в особенности в криолитозоне (Мельников и др., 2010). Средством для наиболее полного взгляда на территорию и выявления закономерностей, причин и следствий того или иного пути развития ландшафта является дистанционный мониторинг. В последние годы всё большее развитие получает применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для съёмки земной поверхности. Космические снимки в связи с непрерывностью съёмки обширных территорий дают возможность вести мониторинг и анализировать изменения в широком пространственном охвате. На локальном уровне при мониторинге конкретных природных объектов целесообразно дополнять данные космических съёмок и наземных исследований (тахеометрических съёмок) применением БПЛА. В качестве примера совместного применения всех вышеперечисленных инструментов в статье приведено исследование изменения поверхности торфяника за счёт вытаивания полигонально-жильных льдов (ПЖЛ). На первоначальном этапе была проведена оценка изменения рельефа этого торфяника (Бабкин и др., 2018) только на основе данных повторной тахеометрической съёмки.

Район исследований и предыстория изменений

Участок изучаемого торфяника расположен на севере Западной Сибири в северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья возле автомобильной дороги в 5 км к западу от с. Газ-Сале Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа (рис. 1).

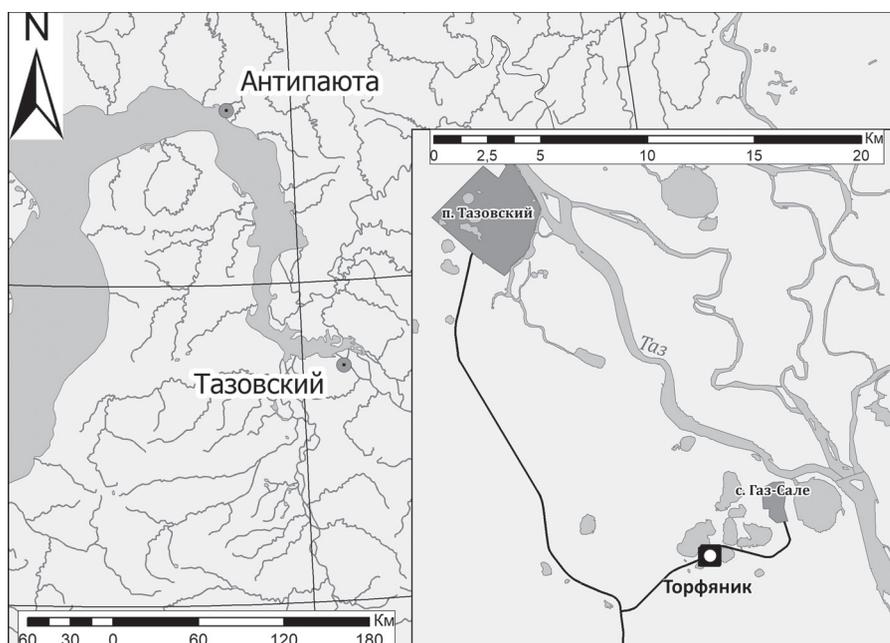


Рис. 1. Схема расположения участка исследования

Для района исследования характерна достаточно плоская, слаборасчленённая поверхность с сильной заболоченностью и заозёрностью, с широко развитыми плоско- и выпуклобугристыми торфяниками, относящаяся к Усть-Пур-Тазовской области Ныдинско-Тазовской подзоны Приполярной зоны Континентальной криолитологической провинции (Трофимов и др., 1987).

По схеме регионального районирования Западно-Сибирской плиты по распространению и среднегодовым температурам многолетнемерзлых и талых пород район исследования относится к Пур-Тазовской северной области Харасавэй-Новоуренгойской подзоны Заполярной зоны Континентальной провинции. Подзона отличается практически сплошным развитием многолетнемерзлых пород (ММП) с достаточно низкими температурами, особенно характерными для участков развития торфяников. Температура ММП для данного района составляет от -3 до -7 °С (Трофимов и др., 1987). По данным термометрической скважины, действующей с 2016 г. южнее пос. Тазовский, среднегодовая температура пород на глубине 8,7 м составляет $-2,7$ °С.

Район исследования характеризуется субарктическим климатом со среднегодовой температурой воздуха $-9,3$ °С. В зимний период постоянны обильные снегопады с метелями и оттепели, сменяющие периоды низких температур. Среднегодовое количество осадков составляет около 400 мм, при этом большая их часть (250–300 мм) выпадает в тёплое время. Снежный покров обычно формируется в первой декаде октября, сход снега завершается в конце мая – начале июня (Геокриология..., 1989). В период наблюдений 2016–2018 гг. среднегодовая температура воздуха составила $-5,7$ °С по данным метеостанции Тазовский (https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Тазовском).

С начала 1960-х гг. в Тазовском районе активно осваивается Тазовское нефтегазоконденсатное месторождение (<https://dvp.gazprom-neft.ru/projects/currents/tazovskiy>). Построены и эксплуатируются ветки газопроводов с месторождения в посёлки.

В 1994–1995 гг. построена связывающая с. Газ-Сале и пос. Тазовский дорога из бетонных плит, на одном из участков которой насыпью был частично перекрыт типичный для местности выпуклобугристый торфяник. На этом участке стало происходить значительное проседание межполигональных понижений и вытаивание ПЖЛ. На момент обнаружения нами объекта в сентябре 2016 г. просевшие понижения были частично заполнены водой (рис. 2).



Рис. 2. Фото заполненных водой понижений от 01.09.2016 (автор — А. В. Хомутов)

Материалы и методы исследования

Для расчёта площадей уменьшающихся торфяных полигонов были использованы космоснимки систем Quickbird-2, WorldView-2 и WorldView-3 за 2005, 2016 и 2017 гг. и ортофотопланы 2017–2018 гг. Их более подробные характеристики указаны в табл. 1.

Таблица 1. Параметры используемых материалов

Тип, ID	Тип сенсора / камера	Дата съёмки	Пространственное разрешение, м	Проекция
Космоснимок, 2005-058460601010_RGBN_16bit_R1C2	Quickbird-2	02.09.2005	0,5	UTM zone 44N
Космоснимок, 2016-058460634010_RGBN_16bit_R1C2	WorldView-2	15.07.2016	0,5	UTM zone 44N
Космоснимок, 2017-058460706010_RGBN_16bit	WorldView-3	18.07.2017	0,5	UTM zone 44N
Ортофотоплан-09-2017	DJI FC300X	17.09.2017	0,03	UTM zone 44N
Ортофотоплан-07-2018	DJI FC300X	19.07.2018	0,03	UTM zone 44N
Ортофотоплан-09-2018	DJI FC300X	06.09.2018	0,03	UTM zone 44N

Используемые космоснимки, включающие в себя полноценный набор каналов RGB+NIR, являются наиболее подходящими из всех доступных материалов сверхвысокого разрешения и позволяют достаточно точно оценить изменения на изучаемом участке в период до сентября 2017 г., пока не стали доступны более детальные ортофотопланы. В процессе изучения свойств поверхности при помощи космоснимков их дополнительных необратимых изменений или улучшений не происходило. Уточнение интерпретируемых данных стало возможным исключительно за счёт изменения порядка и сочетания каналов, подбора методов растяжки гистограммы и алгоритмов построения пирамидальных слоёв.

Ортофотопланы построены в программе Agisoft PhotoScan Professional. Благодаря встроенной в БПЛА системе GPS и определению положения камеры по трём осям для каждого изображения Agisoft автоматически определяет положение и наклон снимка относительно земной поверхности, с помощью нейросети сравнивает изображения и находит общие для них закономерности, по которым и набираются связующие точки, составляющие разреженное облако точек — первичный каркас 3D-модели. Ортогональное проецирование этой модели на плоскую поверхность позволило получить цифровую модель рельефа (ЦМР) и ортофотоплан (Agisoft, 2018). Однако для этого сначала было необходимо загустить облако точек, убрать некорректно включённые точки (на водной поверхности, антропогенных объектах и древесно-кустарниковой растительности) и построить сглаженную текстурированную модель (рис. 3).

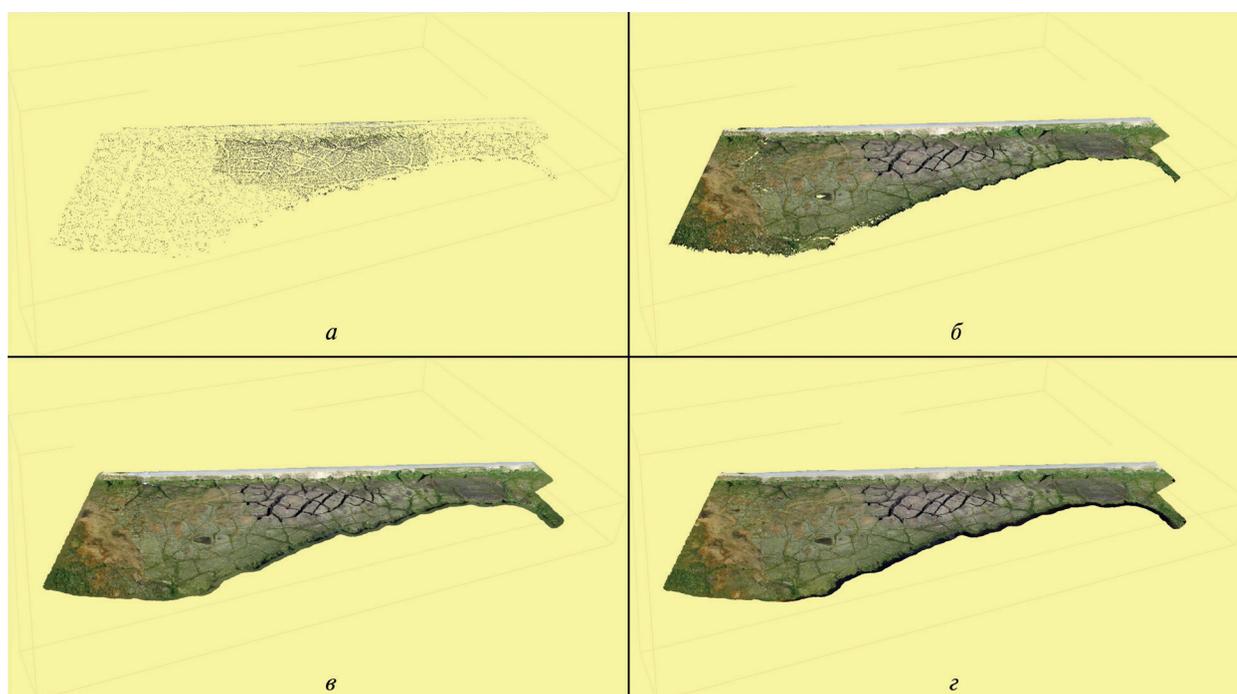


Рис. 3. Разные типы 3D-моделей, возникающие в процессе создания ортофотоплана: а — разреженное облако точек; б — густое облако точек; в — 3D-модель; г — текстурированная 3D-модель

Также важной частью обработки и съёмки стала попутная фиксация координат XYZ опознаков. Их добавление к проекту и расположение на фотоизображениях в соответствии с реальным местоположением позволило подготовить более точные итоговые ортофотопланы.

Итоговые ортофотопланы имеют пространственное разрешение около $0,03 \text{ м}^2$, что обеспечило точное определение границ полигонов для дальнейшего анализа их изменений. Для сокращения временных затрат вычисление площадей полигонов проводилось средствами программы ArcGIS. Создаваемые в базах геоданных слои с полигональной геометрией имеют автоматически добавляющиеся и корректирующиеся поля со значениями площади и периметра объектов слоя, вычисляемыми в зависимости от используемой проекции.

Результаты и обсуждение

Для определения границ торфяных полигонов по имеющимся материалам в первую очередь использовалось визуальное дешифрирование, и эти границы проводились по контурам лишайниковой растительности, которая резко отличается от моховой растительности межполигональных понижений с ПЖЛ (за исключением жил более мелкой градации, не дешифрируемых по растительному покрову до момента их вскрытия и разрушения). Анализ спутниковых снимков способами, обозначенными в предыдущем разделе, позволил более точно определить пространственные изменения растительного покрова. Также из-за более низкого разрешения материалов спутниковой съёмки определение площадей шло в обратном порядке: от площадей, определённых в поздние года, происходил переход к более ранним с постепенным добавлением разрушенных частей. В случае отсутствия наблюдаемых разрушений межполигональных понижений и, как следствие, стабильности границы полигона, его площадь принималась за постоянную до текущего момента и переносилась в слои с прошлыми годами без изменений. Границы торфяных полигонов на крайние даты периода исследований показаны на *рис. 4*.

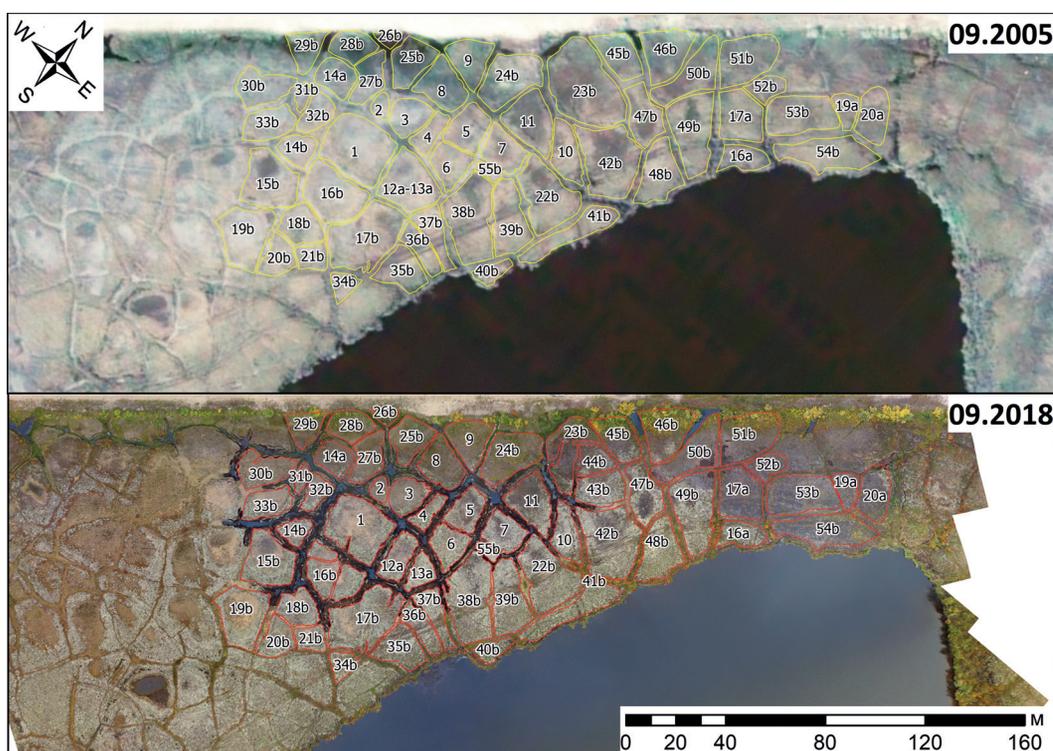


Рис. 4. Границы полигонов по самым ранним и самым поздним доступным материалам

При исследовании была собрана статистика по 57 полигонам, для которых в сентябре 2018 г. дополнительно сделана тахеометрическая съёмка, что позволило обновить информацию тахеометрических съёмок 2016–2017 гг., которые без сопровождающих материалов с БПЛА проводились со значительными неточностями. Из 57 полигонов в той или иной степени изменения площади за счёт вытаивания ПЖЛ были замечены у 35. Подробная статистика представлена в *табл. 2*.

Двойные и тройные ID появились в связи с наличием упомянутых ранее ПЖЛ более мелкой градации, которые при вытаивании разделили единые по дешифровочным признакам полигоны. За анализируемый период максимальными в абсолютном выражении стали разрушения полигонов 1 и 12а–13а на величину более чем 100 м², а в относительном — полигонов 14b и 32b на более чем 34 % от изначальной площади каждого.

Таблица 2. Изменение площади торфяных полигонов

ID полигона	Площадь на дату съёмки, м ²						Итоговое изменение	
	02.09.2005	15.07.2016	18.07.2017	17.09.2017	19.07.2018	06.09.2018	в м ²	в %
1	541,3	525,7	491,8	459,9	454,1	435,3	105,9	19,6
2	54,2	54,2	54,2	53,0	51,5	50,9	3,3	6,1
3	180,2	178,9	178,9	171,7	167,8	162,8	17,4	9,7
4	119,4	119,4	119,1	104,2	98,3	84,9	34,5	28,9
5	218,5	215,8	204,5	182,7	176,2	166,6	52,0	23,8
6	194,2	194,2	187,5	184,6	176,8	169,2	25,0	12,9
7	200,9	200,9	196,4	190,6	187,1	177,9	23,0	11,5
8	253,4	243,6	231,5	231,5	231,5	230,3	23,1	9,1
10	213,4	213,4	207,7	192,7	190,8	177,9	35,5	16,6
11	318,8	318,8	291,5	271,9	266,1	258,2	60,6	19,0
12a–13a	368,9	368,9	362,0	320,6	298,8	265,0	103,9	28,2
14a	170,6	156,2	148,1	134,0	134,0	134,0	36,6	21,4
14b	136,5	107,4	97,3	92,8	91,3	88,9	47,6	34,8
15b	378,4	368,8	367,8	339,7	334,5	321,8	56,6	15,0
16b	393,0	393,0	379,8	349,2	337,6	296,8	96,2	24,5
17b	530,1	530,1	530,1	515,0	507,6	473,1	57,0	10,7
18b	197,3	197,3	197,3	182,7	179,1	172,4	25,0	12,6
19b	372,7	372,7	372,7	370,3	362,3	354,9	17,8	4,8
21b	106,0	106,0	106,0	106,0	106,0	100,6	5,4	5,1
22b	423,1	423,1	423,1	423,1	423,1	419,4	3,7	0,9
23b–43b–44b	711,7	711,7	704,6	693,6	690,8	670,7	41,0	5,8
24b	357,6	344,1	332,8	328,6	324,8	324,8	32,8	9,2
25b	228,4	208,8	201,6	201,6	201,6	201,6	26,8	11,7
27b	178,5	178,5	178,5	178,5	178,5	174,7	3,9	2,2
29b	158,7	149,4	139,3	139,3	139,3	139,3	19,4	12,2
30b	232,8	230,4	229,2	227,6	219,7	210,8	22,0	9,5
31b	44,6	44,6	35,8	35,8	35,8	35,8	8,8	19,8
32b	141,2	108,7	102,6	92,7	92,7	92,7	48,5	34,3
33b	206,1	195,5	178,5	176,6	176,6	173,7	32,4	15,7
36b	137,9	137,9	137,9	137,9	137,9	135,2	2,8	2,0
37b	169,9	169,9	169,9	169,9	162,9	148,1	21,8	12,8
38b	493,8	493,8	493,8	493,8	493,2	476,7	17,1	3,5
39b	319,3	319,3	319,3	319,3	319,3	318,8	0,5	0,2
42b	513,2	513,2	513,2	512,4	512,4	510,5	2,8	0,5
55b	41,9	41,9	41,9	41,9	41,0	35,6	6,3	15,0

Характер и процесс разрушения торфяных полигонов сильно различаются. Наименее пострадавшими от вытаивания стали наиболее близкие к дороге, что связано, скорее всего, с их частичным перекрытием материалом, сносимым с дорожной насыпи. Их разрушение выражается в первую очередь в просадке краёв и медленном образовании трещин и разрывов в теле полигона. При этом на расстоянии более 25–30 м от подошвы насыпи заметно отсутствие пологих задернованных просадок краёв полигонов при подавляющем наличии почти отвесных стенок высотой 2,0–2,5 м. На *рис. 5* (см. с. 60) проиллюстрирована эта разница при удалении от дороги.

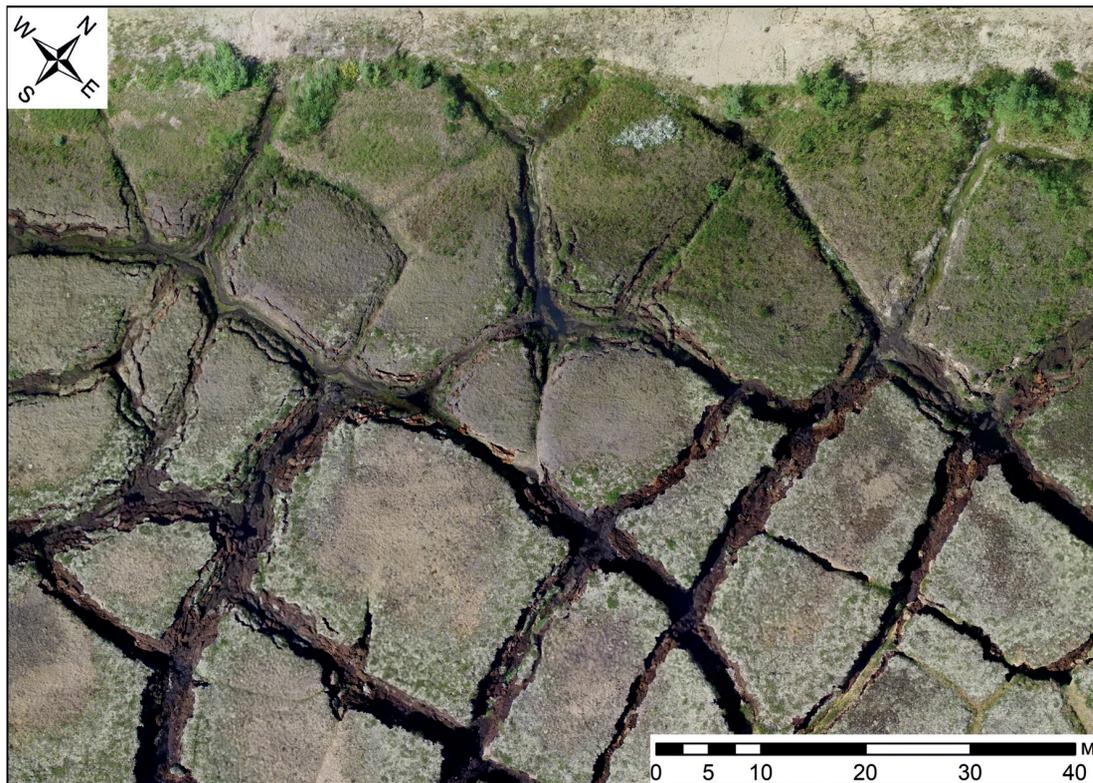


Рис. 5. Различия в просадке межполигональных понижений при удалении от дорожной насыпи

При рассмотрении процесса разрушения межполигональных понижений с 2005 по 2018 г. заметно следующее. На первом доступном снимке (QuickBird-2 от 02.09.2005, см. табл. 1) небольшие просадки в основном встречаются не более чем в 10 м от дороги и заполнены водой, а на следующем (WorldView-2 от 15.07.2016) спустя 11 лет площадь увеличилась почти в шесть раз (рис. 6). Следует отметить, что по большей части эти разрушения являются продолжениями просадок, наблюдаемых в 2005 г. Выявленные новые «независимые» от предыдущих лет просадки за 2016 г. так и не получают большого развития за оставшиеся годы.

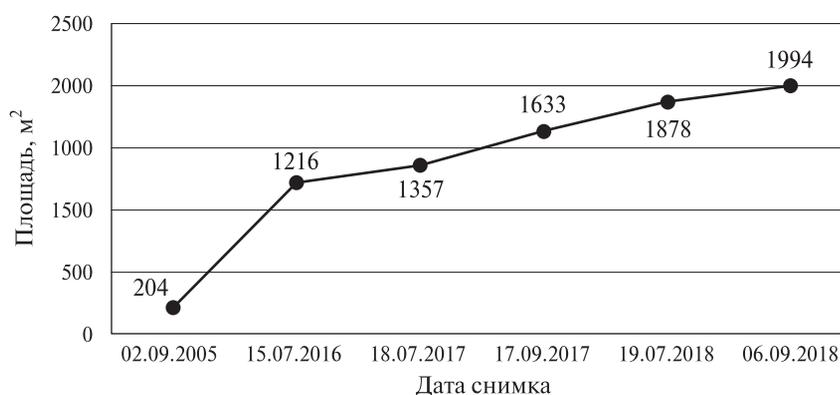


Рис. 6. Изменения площади разрушенных межполигональных понижений по датам доступных материалов

Для тундровых и лесотундровых территорий из-за особенностей растительного, почвенного покрова, характера увлажнения, дифференцированного микрорельефа и пород осложнено передвижение по местности, вследствие чего снижается продуктивность классических геодезических съёмок. Проведёнными в 2016 и 2017 гг. тахеометрическими съёмками охваче-

но 11 полигонов, но были допущены ошибки при определении их границ. В 2018 г. благодаря построенным ортофотопланам были согласованы площадь и объекты съёмки, при проведении которой всё же не удалось достичь точности определения границ полигонов, как при дешифрировании ортофотопланов. Для исследуемого объекта всё усложняется ещё и тем, что из-за проседания и углубления понижений некоторые полигоны становятся недоступны для наземной съёмки. Время проведения тахеометрической съёмки также несопоставимо с БПЛА-съёмкой. Для съёмки GPS-приёмником опознаков и выполнения залётов необходимо всего несколько часов. В то же время для проведения тахеометрической съёмки равной площади в 2018 г. потребовалось около трёх дней при условии, что количество снимаемых точек было уменьшено с учётом дальнейшего дешифрирования границ по дистанционным данным.

Площади полигонов, полученные разными способами, различались следующим образом. При сравнении результатов тахеометрической и БПЛА-съёмки в сентябре 2017 г. было определено, что значения площадей полигонов по ортофотоплану отличаются на 2,5–14,5 м² (в среднем 8,1 м²) в абсолютных значениях или на 1–8 % относительно значений, полученных при обработке данных тахеометрической съёмки. Практически все значения площадей полигонов по ортофотоплану больше, чем по данным тахеометрической съёмки. Сравнение тех же полигонов по результатам съёмки 2018 г. показало, что различие площадей стало в среднем меньше (всего 5,0 м²) при возросшем разбросе значений: от 0,5 до 18,0 м² (0,2–9,0 %).

Выводы

Совместное использование космических снимков сверхвысокого разрешения и ортофотопланов показало свою состоятельность для мониторинга изменения поверхности полигональных торфяников. При обеспечении высокой точности наземной привязки также возрастает возможность использования материалов БПЛА-съёмки, например для анализа изменения рельефа по ЦМР, полученным в ходе обработки изображений. При возрастающей изрезанности рельефа поверхности за счёт вытаивания ПЖЛ проведение тахеометрической съёмки на таких объектах становится более трудоёмким и менее информативным инструментом. Различия в показателях площадей торфяных полигонов при тахеометрической съёмке и вычислении по ортофотоплану обусловлены низкой информативностью и точностью материалов тахеометрической съёмки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) в рамках научного проекта № 18-45-890013. В 2016–2017 гг. полевые работы организованы при поддержке Департамента по науке и инновациям ЯНАО и НП «Российский центр освоения Арктики».

Литература

1. Бабкин Е. М., Хомутов А. В., Дворников Ю. А., Хайруллин Р. Р., Бабкина Е. А. Изменение рельефа торфяника с вытаивающим полигонально-жильным льдом в северной части Пур-Тазовского междуречья // Проблемы региональной экологии. 2018. № 4. С. 115–119.
2. Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Ершова Э. Д. М.: Недра, 1989. 454 с.
3. Мельников В. П., Хименков А. Н., Брушков А. В., Власов А. Н., Волков-Богородский Д. Б., Самсонова В. В. Криогенные геосистемы: проблемы исследования и моделирования. Новосибирск: Академ. изд-во «Гео», 2010. 390 с.
4. Руководство пользователя Agisoft PhotoScan. Professional Edition, версия 1.4. 2018. 142 с. URL: https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_ru.pdf.
5. Трофимов В. Т., Баду Ю. Б., Васильчук Ю. К. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты. М.: Наука, 1987. 219 с.

Analysis of peatland changes in the northeastern part of the Pur-Taz interfluvium based on remote sensing and ground monitoring data

R. R. Khairullin¹, A. V. Khomutov^{1,2,3}, Yu. A. Dvornikov¹,
E. M. Babkin¹, E. A. Babkina¹, D. D. Soshchenko²

¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen 625000, Russia
E-mail: rustam93-93@bk.ru

² Tyumen State University, Tyumen 625003, Russia
E-mail: akhomutov@gmail.com

³ Tyumen Industrial University, Tyumen 625000, Russia
E-mail: akhomutov@gmail.com

This paper is dedicated to the analysis of 2005 to 2018 relief changes of the peatland in the northeastern part of the Pur-Taz interfluvium. The work is performed using satellite imagery and orthophotomaps derived from unmanned aerial vehicle (UAV) surveys. Available research materials, processing of the UAV data for orthophotomap compilation and advantages of the used techniques are briefly described. Detailed statistics on changes of peat polygons area and area of troughs in between ice wedges is provided. The analysis has established nonlinearity of peatland degradation and inter-polygonal depression destruction processes. Despite the absence of data between 2005 and 2016, it is found that the rates of polygonal-wedge ice melting and the subsequent degradation of the peatland strongly differ: the quantitative changes from 2005 to 2016 are almost comparable to the changes from 2016 to 2018. In addition, the data obtained during tacheometric survey are compared with the data obtained during UAV survey. In such studies, UAV survey is considered more effective and accurate due to a number of advantages over conventional tacheometric survey.

Keywords: peatland, polygonal-wedge ice melting, UAV, orthophotomap compilation, remote sensing, tacheometric survey

Accepted: 02.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-54-62

References

1. Babkin E. M., Khomutov A. V., Dvornikov Yu. A., Khairullin R. R., Babkina E. A., *Izmenenie rel'efa torfyanika s vytaivayushchim poligonal'no-zhil'nym l'dom v severnoi chasti Pur-Tazovskogo mezhdurech'ya* (Relief changes of the peat plateau with melting of polygonal-wedge ice in the northern part of the Pur-Taz interfluvium), *Problemy regional'noi ekologii*, 2018, No. 4, pp. 115–119.
2. *Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir'* (Geocryology of the USSR. Western Siberia), Ershov E. D. (ed.), Moscow: Nedra, 1989, 454 p.
3. Melnikov V. P., Khimenkov A. N., Brushkov A. V., Vlasov A. N., Volkov-Bogorodsky D. B., Samsonova V. V., *Kriogennyye geosistemy: problemy issledovaniya i modelirovaniya* (Cryology Geosystems: Investigation problems and modeling), Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2010, 390 p.
4. https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_ru.pdf.
5. Trofimov V. T., Badoo Yu. B., Vasilchuck Yu. K., *Geokriologicheskoe raionirovanie Zapadno-Sibirskoi plity* (Geocryological zoning of the Western Siberian plate), Moscow: Nauka, 1987, 219 p.