

## Деграляция мерзлоты как фактор поддержания биоразнообразия тундровых экосистем

Н. Н. ЛАЦИНСКИЙ<sup>1, 2</sup>, А. А. КАРТОЗИЯ<sup>2, 3</sup>, А. Н. ФАГЕ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центральный сибирский ботанический сад СО РАН  
630090, Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101  
E-mail: nnl630090@gmail.com

<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3

<sup>3</sup>Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3  
E-mail: andrei.kartozia@igm.nsc.ru

Статья поступила 05.02.2020

После доработки 14.02.2020

Принята к печати 16.02.2020

### АННОТАЦИЯ

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для высокдетальной съемки местности позволило выявить структурные особенности одного из типов термокарстовых котловин, развивающихся на ледовом комплексе в дельте р. Лены в южной части подзоны типичных тундр. Для описания особенностей геоморфологического строения и растительного покрова модельной котловины использованы методы ГИС-анализа в сочетании с данными наземного обследования. ГИС-анализ аэрофотоснимков и цифровой модели рельефа, полученных посредством съемки местности БПЛА, а также натурные наблюдения позволили выявить на дне исследуемой термокарстовой котловины (аласа) поверхность, представленную байджараховым микрорельефом, и описать ее морфометрические параметры. По данным геоботанического картирования растительный покров исследуемого аласа образован комплексом высокопродуктивных сообществ с доминированием злаков и граминоидов. Сравнение разновременных спутниковых снимков и топографических карт позволило установить, что котловина сформировалась на месте неглубокого термокарстового озера, спущенного не более 40 лет назад. Особенности рельефа термокарстовой котловины связаны с процессом ее образования и характером поверхностных отложений. Растительный покров резко контрастирует с зональным тундровым окружением по флористическому составу и структуре сообществ и содержит ряд видов, отличающихся более южным распространением. Подобные участки служат кормовой базой для травоядных животных и, вероятно, могли быть важной составляющей пищевого рациона представителей плейстоценовой мегафауны в прошлом. Процессы термокарста присущи породам ледового комплекса на всех этапах его формирования, вне зависимости от климатической обстановки. Климат конкретной эпохи определяет лишь интенсивность и площадь проявления этих процессов. В современных условиях размеры и длительность существования термокарстовых озер зависят от их положения в рельефе и интенсивности различных термоденудационных процессов. Термокарст играет важную роль в образовании новых местообитаний и поддержании биоразнообразия растительного и животного мира тундрового ландшафта.

**Ключевые слова:** БПЛА, едома, ледовый комплекс, термокарст, биоразнообразие, ГИС-анализ, дельта р. Лены.

© Лацинский Н. Н., Картозия А. А., Фаге А. Н., 2020

В настоящее время общепризнана ценность биологического разнообразия как одного из важнейших свойств экосистем различного уровня, обеспечивающего их устойчивость, эволюцию и нормальное функционирование в изменяющихся условиях среды [Лебедева и др., 2004; McGill, 2010; Гелашвили и др., 2013]. Среди экологических факторов, определяющих видовое и ценотическое разнообразие наземных экосистем, рельеф занимает одну из главных позиций [Абдурахманов и др., 2008]. Особенно ярко роль рельефа проявляется в экстремальных природных условиях, где даже незначительные изменения напряженности прямодействующих экологических факторов вызывают заметные сдвиги в составе и структуре наземных экосистем. Одной из подобных территорий является Арктика, комплексность и мелкоконтурность растительного покрова которой отмечалась многими исследователями [Матвеева, 2007; Matveyeva, 2008; Vohnlanthen et al., 2008; Walker et al., 2008].

Арктические экосистемы являются наиболее чувствительными к глобальным изменениям климата [Anisimov et al., 2002]. Учитывая значительное количество органики, накопленной в многолетнемерзлых грунтах [Tarnocai et al., 2009; Strauss et al., 2013; Hugelius et al., 2014], можно предположить, что изменения арктических экосистем будут иметь глобальные последствия планетарного масштаба. Этим во многом определяется интерес к изучению структуры и динамики высокоширотных ландшафтов.

Вместе с тем Арктика до сих пор остается труднодоступной и малоизученной территорией. Организация полевых наземных исследований в арктических районах сопряжена с большими трудностями и требует значительных материальных затрат. В таких условиях особое значение приобретают данные дистанционного зондирования Земли, в том числе и космические снимки. Однако для их наиболее полной и точной дешифровки необходимы опорные точки на местности, а для тундровых экосистем, в связи с их мелкоконтурностью, необходима детальная информация с разрешением, превышающим возможности доступных спутниковых систем. Этот пробел может быть восполнен путем использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), разнообразие и доступность которых

для проведения научных исследований резко возрастает в последние годы.

Тундровые экосистемы дельты р. Лены относятся к наименее изученным арктическим территориям. При создании циркумполярной классификации растительности Арктики отмечалось полное отсутствие доступной геоботанической информации по этой территории [Walker et al., 2018]. Создание научно-исследовательской станции “Остров Самойловский” ИНГГ СО РАН, расположенной в южной части дельты, дает прекрасные предпосылки для организации и проведения детальных исследований растительного покрова дельты, в том числе с использованием БПЛА.

Целью настоящего исследования было изучение пространственной структуры растительного покрова тундры и его динамики вследствие деградации мерзлоты.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В основу работы положено сочетание традиционных методов детального геоботанического обследования с ГИС-анализом данных, полученных с помощью фотосъемки с БПЛА, а также спутниковых данных.

Работы по аэрофотосъемке части о-ва Курунгах, на котором локализована изучаемая термокарстовая котловина, и подготовка цифровой модели рельефа (ЦМР) выполнены ООО “Беспилотные технологии”. Использовался геодезический беспилотный летательный комплекс российского производства Supercam S250G. Высота съемки составила 250 м, скорость ветра – не более 10 м/с. Съемка выполнена адаптированным фотоаппаратом Sony Alpha 6000 24.7 MP APS-C, фокусное расстояние объектива 20 мм. Привязка снимков осуществлялась геодезическим бортовым приемником Javad (двухчастотный L1/L2, GPS/ГЛОНАСС, с записью 5 раз в секунду). Дополнительно использовалось наземное геодезическое обеспечение с применением геодезического приемника Javad Triumph-2 (двухчастотный L1/L2, GPS/ГЛОНАСС, с записью 5 раз в секунду). Для повышения точности материалов были задействованы десять наземных контрольных точек. Итоговая точность геодезической привязки получилась не менее 10 см в плане и 15 см по высоте. Общее время полетов составило 4 часа 7 минут. За это время было снято 5755 снимков.

Обработка материалов аэрофотосъемки (АФС) выполнена в программах Justin (производство фирмы Javad) и Photoscan (производитель Agisoft). Фотограмметрическая обработка материалов велась с использованием программ Photoscan Pro и ЦФС Photomod. В качестве исходных данных для уравнивания использовались координаты центров фотографирования снимков и координаты наземных опознавательных точек. Ввиду отсутствия естественных и искусственных предметов, которые можно было бы выбрать в качестве неподвижных опорных точек, и с целью получения высокой точности пространственной модели местности равномерно по всей территории изысканий до проведения АФС выполнена маркировка опознавательных точек.

В результате фотограмметрической обработки получены цифровой ортофотоплан местности с разрешением 0,05 м и цифровая модель местности, сформированная в виде матрицы высот. Разрешение ЦМР в плане 0,5 м, по вертикальной оси – 0,25 м. Каждая ячейка матрицы имеет плановые координаты и высоту.

ГИС-анализ данных проводился с помощью программного пакета ArcGIS 10.2.2 от ESRI CIS Limited и QGIS 3.10.1 от Open Source Geospatial Foundation Project. Более подробно методика ГИС-анализа данных с БПЛА и процесс их получения приведены в [Kartozia, 2019].

Геоботаническое обследование проводилось методом взаимно пересекающихся трансект. На каждой трансекте закладывались пробные площади размером 10 × 10 м в каждом визуальном различимом контуре растительности. Описание пробных площадей выполнено по общепринятой методике с геопривязкой по 12-канальному GPS в системе координат WGS-84. Состав сосудистых растений в описаниях учитывался полностью; в мохово-лишайниковом ярусе отмечены только наиболее обильные виды. Все геоботанические описания внесены в единую базу данных и расклассифицированы по степени их флористического сходства на основе метода Браун – Бланке [Westhoff, van der Maarel, 1973] с использованием программного пакета IBIS 7.2 [Зверев, 2007].

Геоботаническая карта на ключевой участок выполнена на основе ортофотоплана, полученного путем синтеза снимков с БПЛА с использованием оригинальной легенды, разработанной на основе данных наземного обследования.

Названия сосудистых растений приводятся по С. К. Черепанову [1995], а мохообразных – по М. С. Игнатову [Ignatov et al., 2006].

#### ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований расположен в южной части дельты р. Лены – наиболее крупной речной дельты в Арктике и одной из крупнейших дельт мира. Дельта представлена тремя разновозрастными террасовидными надпойменными геоморфологическими уровнями [Григорьев, 1993; Schwamborn et al., 2002; Большианов и др., 2013]. Исследуемый нами алас располагается в юго-восточной части о-ва Курунгнах (72,41° с. ш. и 126.06° в. д.) на поверхности третьего геоморфологического уровня, который образован отложениями, датируемыми поздним неоплейстоценом – голоценом и имеет абсолютные высотные отметки 45–50 м над ур. м. По данным Wetterich et al. [2008], нижнюю часть разреза острова Курунгнах составляет песчаная толща флювиального генезиса с видимой мощностью около 20 м. Песчаная толща перекрывается отложениями ледового комплекса (ЛК) – песчаными и глинистыми алевритами с высоким содержанием органики с разной степенью разложения. Мощность этой толщи около 15 м. Верхняя часть разреза представлена относительно тонким слоем голоценовых образований (около 5 м), близких по литологическим характеристикам к породам ледового комплекса. Разрез пронизан крупными телами повторно-жильного льда шириной до 5 м и длиной около 20 м [Wetterich et al., 2008]. Содержание льда варьирует от слоя к слою разреза и может составлять от 50 до 90 %. Поверхность третьего надпойменного геоморфологического уровня представлена полигональным микрорельефом на самых высоких плоских участках, термокарстовыми котловинами разного возраста и масштаба, а также термоэрозионными долинами и оврагами.

Вся территория дельты относится к области сплошного распространения многолетнемерзлых пород, мощность которых может составлять до 600 м [Григорьев, 1960]. Климат района исследования, относящегося к Сибирской климатической области, резко-континентальный, засушливый [Атлас..., 1989].

Средняя температура января  $-32,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , июля  $+9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  Среднегодовая температура  $-12,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Годовое количество осадков около 300 мм. Постоянный снежный покров устанавливается в последней декаде сентября и разрушается в первой декаде июня. Максимальная мощность снежного покрова не превышает 40 см. Открытый ландшафт способствует интенсивному метелевому переносу снега. Протаивание активного слоя начинается в конце мая и длится до конца августа – начала сентября [Voike et al., 2019].

По растительному покрову территория относится к южной части подзоны типичных тундр. Зональная растительность представлена кустарничково-пушицево-зеленомошными тундрами с *Eriophorum vaginatum* L., доминирующим в травяно-кустарничковом ярусе, и *Hylocomium splendens* var. *obtusifolia* (Geh.) Paris – в мохово-лишайниковом. Однако зональная растительность занимает не более 20 % площади. Преобладают сырые варианты тундр с доминированием *Carex concolor* R. Br. в травяно-кустарничковом ярусе и значительным участием *Toментупнум nitens* (Hedw.) Loeske в мохово-лишайниковом покрове. На склонах термокарстовых котловин и озер развиваются кустарничковые тундры с доминированием *Cassiope tetragona* (L.)

D. Don, *Dryas punctata* Juz., *Empetrum nigrum* L. s. l. и др.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Изученная термокарстовая котловина, в которой ранее находилось озеро, имеет овальную форму размером  $350 \times 500$  м. Котловина соединена глубоким (12–15 м) термоэрозийным оврагом с Оленёкской протокой р. Лены. Дно котловины в настоящий момент равномерно покрыто возвышенностями правильной куполообразной формы высотой 1,5–2 м и диаметром основания 6–8 м (рис. 1). Исследовать рельеф такого масштаба на спутниковых снимках невозможно. Однако высокое пространственное разрешение аэрофотоснимков с БПЛА позволило детально изучить микрорельеф аласа. Более наглядно бугристый микрорельеф котловины выражен на ЦМР и производных схемах морфометрических показателей (рис. 2). Бугры расположены на равном удалении друг от друга, при этом расстояние между их вершинами было сравнимо с размерами полигональных структур на плоской поверхности, окружающей котловину. Судя по фототону изображения, растительный покров котловины резко отличался от ее окружения.

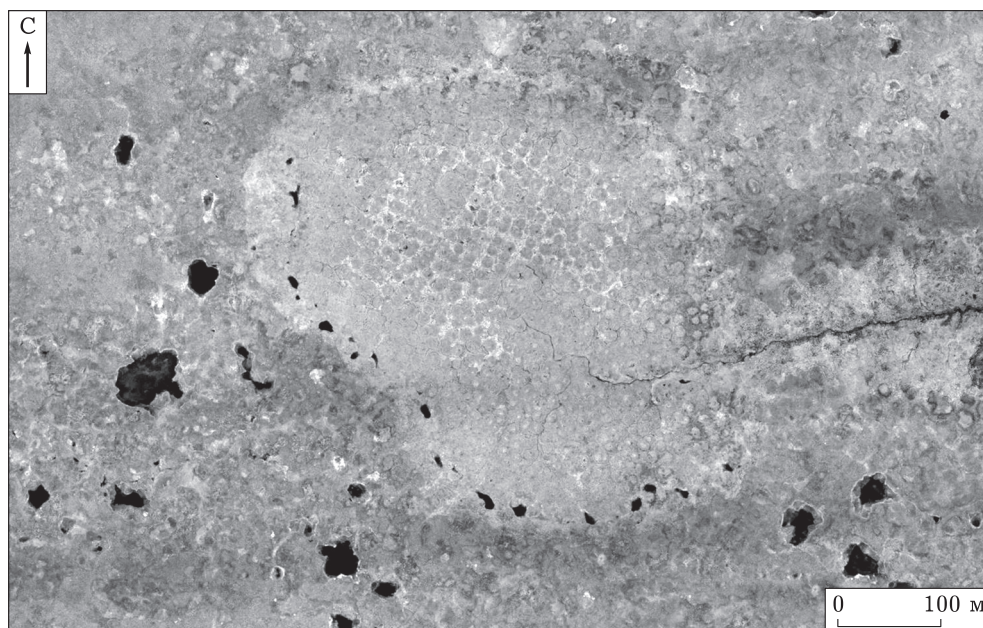


Рис. 1. Фрагмент ортофотоплана, построенного по данным беспилотной аэрофотосъемки, отображающий модельную термокарстовую котловину. Время съемки – начало августа 2016 г.

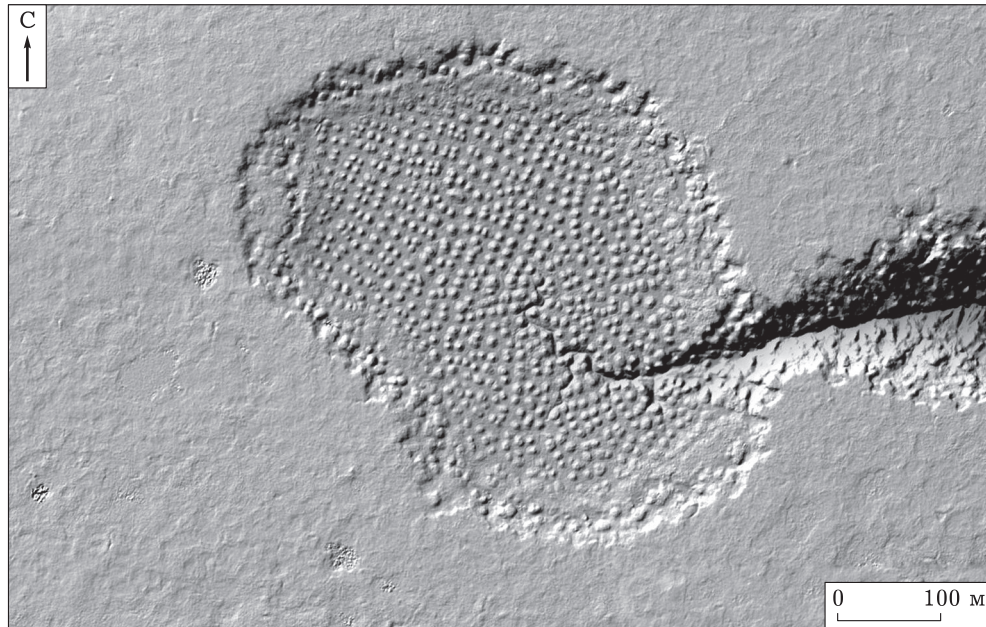


Рис. 2. Фрагмент цифровой модели рельефа с затенением, отображающий модельную термокарстовую котловину. Время съемки – начало августа 2016 г.

На снимках Landsat-1 за июль 1973 г. на месте котловины отчетливо наблюдается озеро (рис. 3, а). Озеро также изображено и на листе топографической карты м-ба 1 : 200 000, изданной в 1987 г. и отражающей состояние местности на 1981 г. Однако на снимках Landsat ETM+ за 2000 г. озеро в котловине уже отсутствует (рис. 3, б). Следовательно, спуск озера произошел между

1981 и 2000 годами, и котловина имеет возраст не более 40 лет. Глубина котловины составляет 8 м. С помощью ГИС-анализа ЦМР и натуральных наблюдений выделены: невысокий уступ, натечные микроформы рельефа и контуры современного днища котловины [Оленченко и др., 2019]. Это позволило предположить береговую линию спущенного озера. Затем путем ГИС-анализа рассчитан прибли-

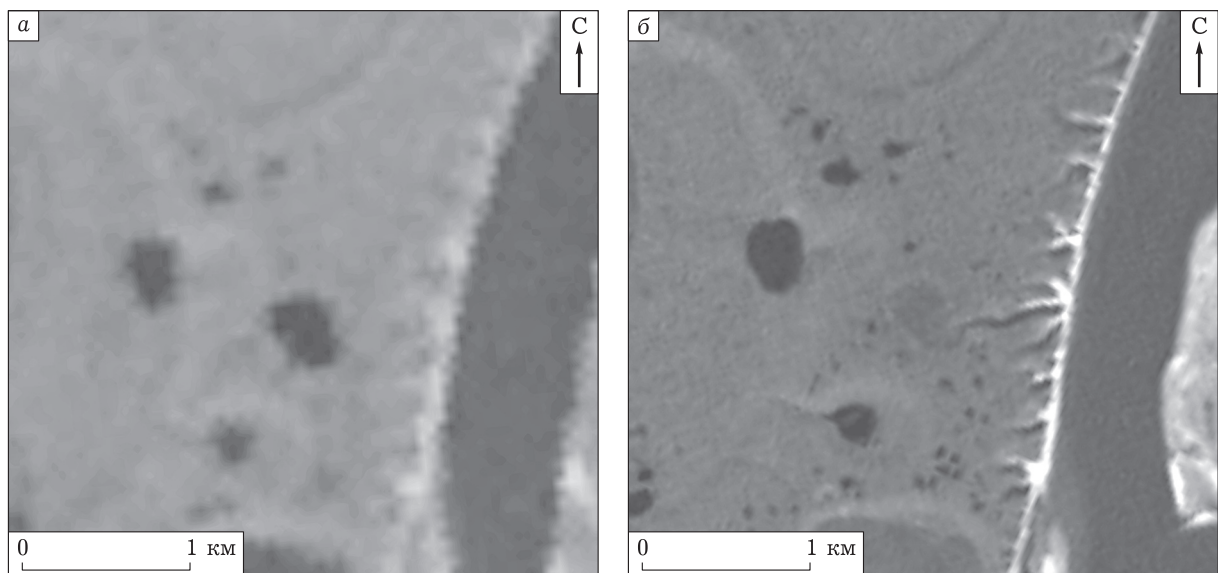


Рис. 3 Изучаемая территория на космоснимке Landsat-1 за июль 1973 г. (а) и космоснимке Landsat ETM+ за 2000 г. (б)

зительный объем воды в озере, составивший около 554 800 м<sup>3</sup> [Оленченко и др., 2019]. Дренаж озера произошел, скорее всего, одновременно в виде сброса воды по термоэрозионному оврагу в Оленёкскую протоку.

Расстояние между вершинами бугров на днище котловины соответствует расстоянию между центрами полигонов на поверхности террасы, окружающей котловину. Судя по глубине котловины (около 8 м), днище ее расположено в толще едомных отложений, пронизанных ледяными жилами. Форма и размеры бугров позволяют диагностировать их как байджарахи – инверсионный рельеф, возникший на месте полигональной поверхности при деградации и протаивании ледяных жил.

Растительный покров котловины резко отличается от растительности недеградировавшей террасовидной поверхности. В отличие от тундровых сообществ водоразделов, борта котловины заняты кустарниковыми сообществами с доминированием *Salix glauca*, где высота кустов достигает 1–1,2 м. В травяном покрове под пологом кустарников преобладают злаки *Arctagrostis arundinacea* (Trin.) Beal

и *Calamagrostis holmii* Lange in Holm; мохово-лишайниковый ярус часто не выражен или представлен преимущественно *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwagr., типичные тундровые мхи (*Hylocomium splendens* var. *obtusifolia*, *Tomentypnum nitens* и *Aulacomnium turgidum* (Wahlenb.) Schwagr.) практически отсутствуют.

В юго-западной части котловины в основании бывшего берегового уступа озера, отчетливо читающегося на склоне котловины (рис. 4), расположена цепочка мелких озерков, зарастающих водно-болотной растительностью с доминированием *Arctophyla fulva* (Trin.) Andersson и *Eriophorum scheuchzeri* Норре. Аналогичные сообщества встречаются и по днищу термоэрозионного оврага, соединяющего котловину с протокой реки. Крутые борта этого оврага покрывают пионерные травяные сообщества с доминированием *Equisetum arvense* L. ssp. *boreale* (Bong.) Rupr.

Днище котловины занято двумя комплексами растительности с отчетливой приуроченностью их компонентов к определенным элементам рельефа. Периферическая часть

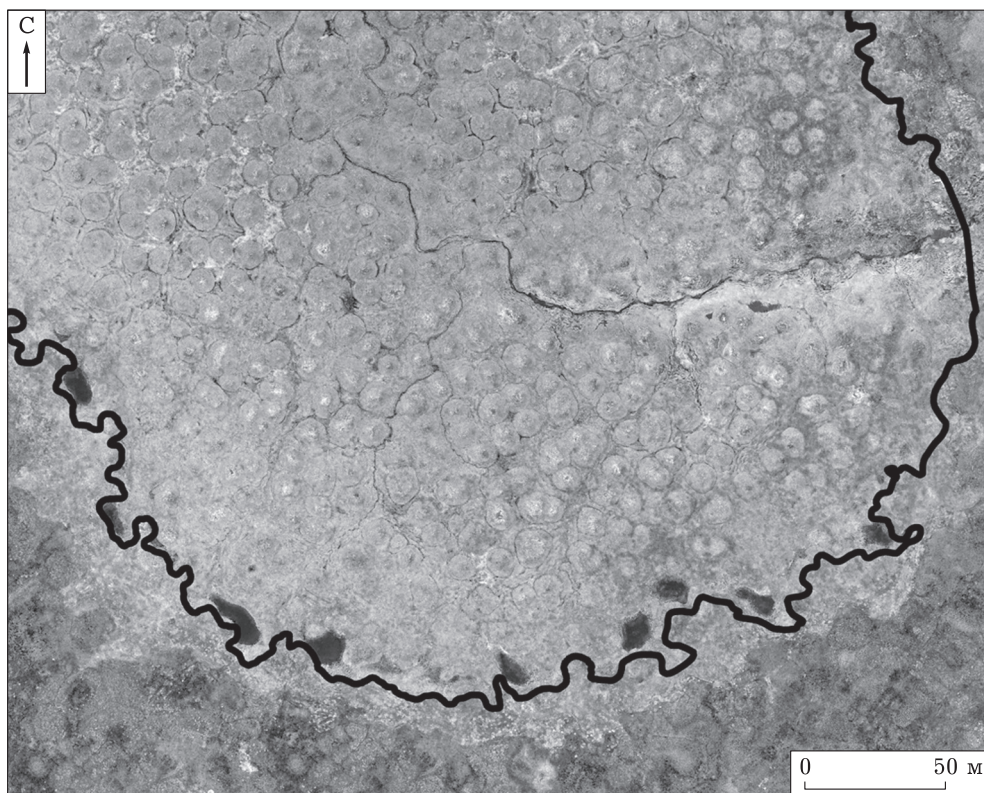


Рис. 4. Южная часть аласа на фрагменте аэрофотоснимка с БПЛА. Черной линией обозначен предполагаемый контур спущенного озера

Сравнительная таблица флористического состава сообществ в термокарстовой котловине  
(представлены только виды со встречаемостью более чем в двух описаниях хотя бы в одном фитоценоне)

Вид растений	Фитоценон				
	1 (10)	2 (5)	3 (4)	4 (9)	5 (4)
<i>Descurainia sophioides</i> (Fisch. ex Hook.) O. E. Schulz	40	–	–	–	–
<i>Draba cana</i> Rydb.	30	–	–	–	–
<i>Draba glacialis</i> Adams	30	–	–	–	–
<i>Ranunculus lapponicus</i> L.	–	100	–	22	–
<i>Polytrichum juniperinum</i> Hedw.	10	80	25	–	–
<i>Saxifraga hirculus</i> L.	–	60	–	–	–
<i>Saxifraga hieracifolia</i> Waldst. & Kit.	10	60	–	–	–
<i>Betula exilis</i> Sukaczew	–	60	25	–	–
<i>Salix pulchra</i> Cham.	–	–	100	–	–
<i>Dupontia pelligera</i> (Rupr.) A. Love & Ritchie	–	–	–	33	–
<i>Saxifraga cernua</i> L.	90	100	100	78	100
<i>Arctagrostis arundinacea</i> (Trin.) Beal	100	100	100	22	25
<i>Stellaria peduncularis</i> Bunge in Ledeb.	90	100	100	33	25
<i>Carex concolor</i> R. Br.	10	60	100	67	25
<i>Polemonium acutiflorum</i> Willd. ex Roem. & Schult.	80	100	75	78	–
<i>Saxifraga nelsoniana</i> D. Don	70	100	100	22	–
<i>Poa arctica</i> R. Br.	100	100	100	67	–
<i>Calamagrostis holmii</i> Lange in Holm	20	100	100	44	–
<i>Salix glauca</i> L.	70	60	100	11	–
<i>Aulacomnium palustre</i> (Hedw.) Schwagr.	30	100	75	33	–
<i>Rumex arcticus</i> Trautv. in Middend.	10	80	25	89	–
<i>Eriophorum polystachyon</i> L.	–	20	–	100	50
<i>Arctophila fulva</i> (Trin.) Andersson	–	–	–	78	100
<i>Caltha arctica</i> Rob. Brown	–	–	–	78	100
<i>Calliergon giganteum</i> (Schimp.) Kindb.	–	–	–	78	100
<i>Cardamine pratensis</i> L.	–	–	–	44	100
<i>Stellaria humifusa</i> Rottb.	–	–	–	44	100
<i>Eriophorum scheuchzeri</i> Hoppe	–	–	–	33	25
<i>Cochlearia arctica</i> Schldl. ex DC.	70	40	–	11	75
<i>Epilobium palustre</i> L.	30	40	–	56	25
<i>Chrysosplenium sibiricum</i> (Ser. ex DC.) Kharkev.	40	–	100	22	25
<i>Delphinium chamissonis</i> Pritz. ex Walp.	40	60	–	22	–
<i>Luzula tundricola</i> Gorodkov ex V. N. Vassil.	30	20	50	–	–
<i>Luzula confusa</i> Lindeb.	30	–	25	–	–
<i>Polytrichum</i> sp.	30	–	25	–	–

П р и м е ч а н и е. В столбцах цифрами обозначены фитоценоны: 1 – злаковники с доминированием *Arctagrostis arundinacea*, 2 – злаковники с доминированием *Poa arctica*, 3 – кустарниковые заросли, 4 – низинные пушицевые болота, 5 – околотовная растительность. В скобках указано количество описаний в данном фитоценоне. В ячейках таблицы приводится встречаемость вида в процентах от числа описаний, соответствующих фитоценону.

днища состоит из злаковников с доминированием *Arctagrostis arundinacea* на байджарахах и злаково-зеленомошных сообществ с доминированием *Poa arctica* R. Br. в травяном ярусе и *Aulacomnium palustre* – в моховом, расположенных в промежутках между байджарахами. В микрорельефе поверхности, особенно между байджарахами, отчетливо читаются многочисленные мелкие солифлюкционные микроформы рельефа.

Центральная, наиболее глубокая часть аласа покрыта равномерно распределенными байджарахами с плоскодонными понижениями между ними шириной 5–7 м. На поверхности байджарахов развиваются сомкнутые высокорослые (40–60 см) злаковники с доминированием *Arctagrostis arundinacea*, а понижения заняты травяными низинными болотами с доминированием *Eriophorum polystachyon* L. Если в злаковниках напочвенный моховой покров практически не выражен, то в низинных пушицевых болотах он варьирует от полного отсутствия до хорошо выраженного яруса с покрытием до 80 %, образованного преимущественно или исключительно *Calliergon giganteum* (Schimp.) Kindb. Часто моховой покров в низинных болотах находится в плавающем или полупогруженном состоянии. Глубина воды в этом случае составляет от 10 до 20 см.

Во флористическом составе сообществ котловины присутствуют многолетние травянистые растения, редкие или отсутствующие в составе зональных тундр (*Artemisia tilesii* Ledeb., *Delphinium chamissonis* Pritz. ex Walp., *Draba glacialis* Adams, *Polemonium acutiflorum* Willd. ex Roem. & Schult.); виды водно-болотной флоры (*Epilobium palustre* L., *Rumex arcticus* Trautv. in Middend., *Saxifraga foliolosa* R. Br. и др.) и однолетники-эрозиофиты (*Cochlearia arctica* Schtdl. ex DC., *Descurainia sophioides* (Fisch. ex Hook.) O. E. Schulz, *Epilobium davuricum* Fisch. ex Hornem.). В то же время совершенно отсутствуют тундровые кустарнички (*Cassiope tetragona*, *Dryas punctata*, *Empetrum nigrum* s. l. и др.) и основной доминант зональных тундр *Eriophorum vaginatum*. Сравнение видового состава растительных сообществ котловины (таблица) показало наличие группы активных видов, общих для всех выделенных фитоценонов (*Arctagrostis arundinacea*, *Saxifraga cernua* L., *Stellaria peduncularis* Bunge

in Ledeb.), видов, объединяющих водно-болотные сообщества (*Arctophila fulva*, *Caltha arctica* Rob. Brown, *Eriophorum polystachyon* и др.), а также видов, характерных для каждого из выделенных фитоценонов (за исключением околородных сообществ с *Arctophila fulva*). Особо следует отметить высокую активность *Arctagrostis arundinacea* – вида, имеющего более южный ареал по сравнению с близкородственным *Arctagrostis latifolia* (R. Br.) Griseb., широко представленным в зональных тундрах [Ребристая и др., 1964]. Преобладание многолетних злаков и граминоидов в сообществах термокарстовой котловины, высота и сомкнутость травостоя обеспечивают высокую продуктивность наземной фитомассы сообществ по сравнению с окружающими тундрами и питательную ценность для травоядных животных, что косвенно подтверждается многочисленными следами активности леммингов и овцебыков.

На геоботанической карте аласа хорошо отображается пространственное распределение описанных выше комплексов растительности в виде почти концентрических микропоясов, повторяющих очертания котловины (рис. 5).

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Термокарстовые котловины (аласы, хасырей) с озерами на поверхности их днища, буграми пучения (пинго, булгунняхи), а также с другими формами рельефа, которые связаны с различными термоденудационными процессами, активизирующимися при спуске этих озер, являются характерной чертой районов распространения многолетнемерзлых пород на территории Арктики [French, 2007; Кравцова, 2009]. Глубина термокарстовых озер на островах третьего надпойменного террасовидного уровня дельты р. Лены составляет до 15 м, причем под днищем озерных котловин обычно развивается талик на несколько десятков метров в глубину [Morgenstern et al., 2011, 2013]. Зачастую при образовании термокарстовых котловин изучаемой местности деградирует вся толща ЛК, вплоть до кровли флювиальных песков, подстилающих ее и не оттаивающих в силу своих литологических и геокриологических характеристик.



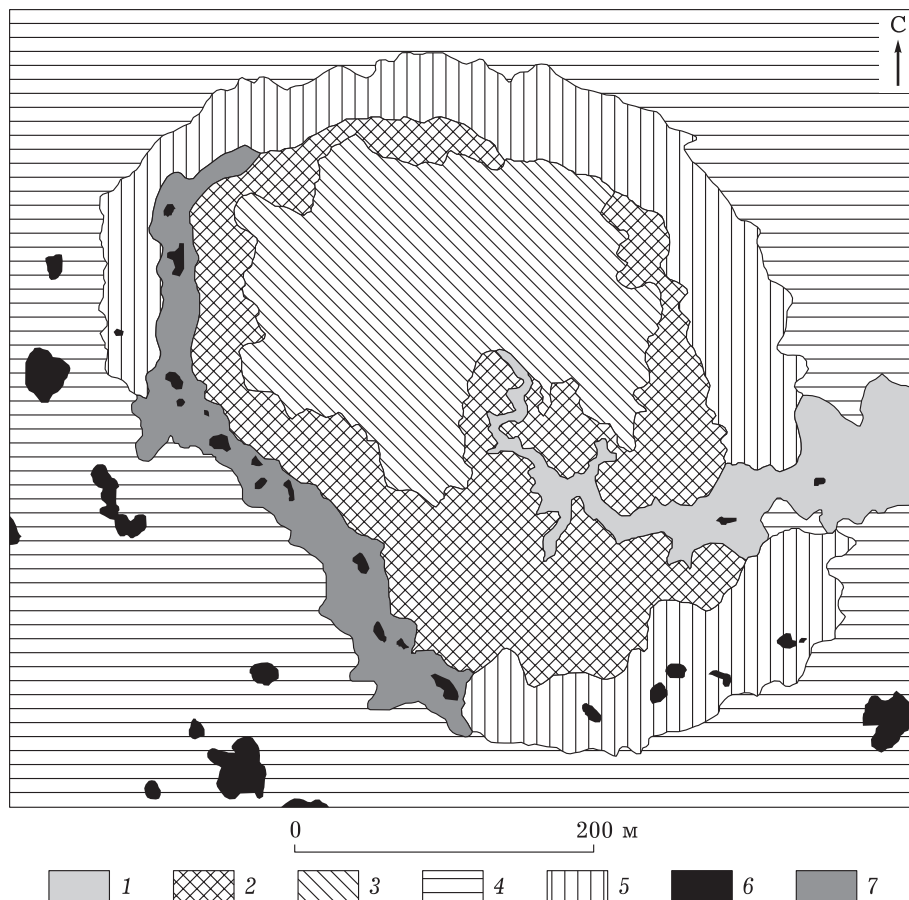


Рис. 5. Карта растительности термокарстовой котловины.

1 – травяные сообщества на эрозионно активных склонах вдоль водотоков (с *Equisetum arvense* ssp. *boreale*); 2 – злаково-зеленомошные сообщества на деградирующих байджарахах по шлейфам склонов в аласную котловину с активной солифлюкцией (с *Poa arctica*); 3 – комплекс злаковников на байджарахах (с *Arctagrostis arundinacea*) с низинно-болотными сообществами в ложбинах между ними; 4 – зональная полигональная тундра с *Eriophorum vaginatum* и *Carex concolor*; 5 – кустарниковые заросли с развитым травяным покровом (с *Salix glauca*); 6 – открытые незаросшие водоемы; 7 – околородные сообщества с *Eriophorum scheuchzeri* и *Arctophyla fulva*

На дне озер в этом случае накапливается слой озерных отложений с высоким содержанием органических веществ. При спуске таких озер происходит повторное промерзание как с поверхности, так и по всей границе талика. В данном случае наблюдается формирование современного полигонального рельефа, обусловленного повторным ростом ледяных жил.

Плоский рельеф дна озерной котловины и прогрессирующее промерзание способствуют развитию процессов заболачивания. В итоге формируются полигональные болота или тундрово-болотные комплексы в зависимости от степени дренированности дна котловины. Дренирующиеся донные отложения, обогащенные органикой, высвобождают элементы

минерального питания, доступные для растений, но малая мощность отложений в совокупности с проградацией мерзлоты минимизируют эффект дополнительного питания.

В описанном нами случае талик под дном озера сформировался на небольшую глубину, не превышавшую мощности ЛК. При спуске озера произошла протайка ледяных жил и сформировался рельеф дна, обусловленный полигональной структурой ЛК. Многочисленные байджарахи, образовавшиеся на месте полигонов, обеспечивают хороший дренаж и дополнительный прогрев субстрата. В этих условиях разложение органики, ранее законсервированной в едомных отложениях, идет быстрее и полнее. Хорошая аэрация суб-

страта на байджарахах в совокупности с богатым минеральным питанием способствовали формированию высокопродуктивных злаковников на байджарахах и кустарниковых зарослей с богатым травяным ярусом по бортам котловины. Возникновение новых местообитаний способствовало поселению растений, не типичных для зональных тундровых и болотных сообществ, и, как следствие, увеличению биоразнообразия ландшафта как на видовом уровне, так и на уровне растительных сообществ. Более того, высокопродуктивные сообщества с доминированием злаков и граминоидов являются хорошей кормовой базой для травоядных животных, поддерживая процветание последних.

Возникновение крупных термокарстовых котловин относят ко времени термического максимума голоцена [Romanovskii et al., 2000; Walter et al., 2007; Morgenstern et al., 2013], однако термокарстовые процессы остаются активными и в настоящее время. Изученная котловина имеет относительно малые размеры по сравнению с соседними, возраст которых оценили наши предшественники [Morgenstern et al., 2011, 2013]. Это позволяет нам сделать вывод о ее сравнительно недавнем возникновении и более молодом возрасте. Длительность нахождения водных масс внутри термокарстовой котловины напрямую зависит от интенсивности термоденудационных процессов, которым подвергается геоморфологическая поверхность. Спуск озера был предопределен развитием термоэрозионного оврага. В свою очередь скорость его развития и увеличения зависит не только от процессов, связанных непосредственно с протаиванием пород, но и с расстоянием от протоки. Таким образом, можно сказать, что для озер, расположенных на одной геоморфологической поверхности, справедливо утверждение, что чем дальше от активного речного русла располагается озеро, тем больше времени пройдет до момента его дренирования за счет роста термоэрозионных оврагов.

Формирование ЛК происходило в течение достаточно длительного геологического отрезка времени. За этот период климатические условия, несомненно, претерпевали значительные колебания. Процессы локальной деградации мерзлых пород имели место на протяжении всего времени их формирования

[Катасонов, 1979; Васильчук, 1999]. Источником тепла, необходимого для запуска процесса, в этом случае могли быть крупные реки, направление течения которых на территории Сибири на протяжении всего четвертичного периода в целом сохранялось с юга на север. Учитывая высокую теплоемкость воды, эти потоки сопровождалась значительным переносом тепла в северном направлении и не могли не воздействовать на береговые экосистемы. Дополнительным источником можно рассматривать подземное тепло. Дельта Лены имеет сложное тектоническое строение и до настоящего времени является областью активных тектонических движений [Avetisov, 1999; Are, Reimnitz, 2000]. Для таких районов характерны температурные аномалии в приповерхностных отложениях, обусловленные их прогревом в местах дизъюнктивных дислокаций фундамента и осадочного чехла. Также причиной локальной деградации мерзлоты могли быть геоморфологические особенности территории.

В суровых климатических условиях периодов оледенений конца плейстоцена термокарстовые процессы были не столь интенсивны, а, следовательно, формировавшиеся аласы не отличались большой протяженностью и глубиной, т. е. их параметры могли быть сходны с котловиной, описанной нами. Высокопродуктивные злаковники, покрывавшие днища подобных котловин, являлись важным пищевым ресурсом для представителей плейстоценовой мегафауны. С потеплением климата термокарстовые процессы усиливались и размеры котловин увеличивались. При протаивании ЛК до подстилающих отложений прекращалось формирование байджараховых полей на месте спущенных озер, и процесс первичной сукцессии шел в сторону заболачивания. Сокращение пищевой базы, связанное с потеплением климата и интенсификацией термокарстовых процессов, могло быть одной из важных причин вымирания комплекса плейстоценовой мегафауны.

В современной климатической обстановке мелкие термокарстовые котловины, подобные описанной в настоящей статье, встречаются редко, но в предшествовавшие более холодные эпохи их частота и роль в поддержании биоразнообразия ландшафта могли быть существенно выше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате использования высокодетальных снимков с БПЛА в сочетании с методами ГИС-анализа описан алас с необычным микро-рельефом дна, сложенным полем невысоких байджарахов. Растительный покров котловины представлен комплексом сообществ, распределение и сочетание которых обусловлено особенностями рельефа и характером поверхностных отложений. В целом растительность котловины резко контрастирует с зональным окружением по составу и структуре сообществ. Основу ее составляют высокопродуктивные сообщества с доминированием злаков и граминоидов, являющихся кормовой базой для травоядных животных. Формирование котловины, ее рельефа и растительности связано со специфическим сочетанием термокарстовых и термоэрозийных процессов, обусловивших непродолжительную фазу озерного развития котловины и относительно неглубокую деградацию пород ЛК.

Термокарстовые процессы в многолетнемерзлых грунтах являются не только следствием изменения климата, но постоянно протекают локально вследствие местных причин различного рода и представляют неотъемлемую часть динамики многолетнемерзлых грунтов на протяжении всего времени их формирования. В течение четвертичного периода проявления этих процессов имели большое значение для формирования рельефа, поддержания разнообразия местообитаний и связанного с ними биоразнообразия растительного и животного мира ландшафта. Высокопродуктивные злаковники, формирующиеся на поверхности байджарахов, могли служить важной кормовой базой для представителей плейстоценовой мегафауны в прошлом.

Настоящее исследование выполнено в рамках государственного задания Центрального сибирского ботанического сада СО РАН № ААА-А-17-117012610052-2 и государственного задания Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН при частичной финансовой поддержке интеграционного проекта Сибирского отделения РАН “Интегральная характеристика криолитозоны по данным дистанционного зондирования, геолого-геофизических, геоботанических и почвенных исследований, проводимых на базе НИС “Остров Самойловский” (2018–2020 гг.) и гранта РФФИ 18-

55-11003 АФ\_т “Оценка циркумполярного баланса N<sub>2</sub>O”.

## ЛИТЕРАТУРА

- Абдурахманов Г. М., Кривошук Д. А., Мяло Е. Г., Огуреева Г. Н. Биogeография. М.: Академия, 2008. 480 с.
- Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. М.: ГУТК, 1989. 115 с.
- Большакинов Д. Ю., Макаров А. С., Шнайдер В., Штоф Г. Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: АНИИ, 2013. 268 с.
- Васильчук Ю. К. Модель циклически-пульсирующего формирования сингенетических толщ с мощными повторно-жильными льдами // Криосфера Земли. 1999. Т. 3, № 2. С. 3–12.
- Гелашвили Д. Б., Розенберг Г. С., Иудин Д. И., Якимов В. Н., Солнцев Л. А. Фрактальные аспекты структурной устойчивости биотических сообществ // Междисциплинар. науч. и прикл. журн. “Биосфера”. 2013. Т. 5, № 2. С. 143–159.
- Григорьев М. Н. Криоморфогенез устьевой области р. Лены. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1993. 174 с.
- Григорьев Н. Ф. Температура многолетнемерзлых пород в бассейне дельты р. Лены // Условия залегания и свойства многолетнемерзлых пород на территории Якутской АССР. Якутск, 1960. Вып. 2. С. 97–101.
- Зверев А. А. Информационные технологии в исследованиях растительного покрова. Томск, 2007. 303 с.
- Катасонов Е. М. О времени образования термокарстовых котловин // Строение и абсолютная геохронология аласных отложений Центральной Якутии. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. С. 66–72.
- Кравцова В. И. Распространение термокарстовых озер в России в пределах зоны современной мерзлоты // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 2009. № 3. С. 33–42.
- Лебедева Н. В., Дроздов Н. Н., Кривошук Д. А. Биологическое разнообразие. М.: Владос, 2004. 399 с.
- Матвеева Н. В. Гетерогенность растительного покрова в Арктике и подходы к ее типизации // Актуальные проблемы геоботаники: III Всерос. шк.-конф. Лекции. Петрозаводск: Карельск. НЦ РАН, 2007. С. 212–225.
- Оленченко В. В., Цибизов Л. В., Картозия А. А., Есин Е. И. Электротомография чаши дренированного термокарстового озера на о. Курунгнах в дельте р. Лены // Пробл. Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65, № 1. С. 92–104.
- Ребристая О. В., Скворцов А. К., Толмачев А. И., Цвелев Н. Н., Юрцев Б. А. Арктическая флора СССР. Вып. 2. Семейство Gramineae. М.; Л., 1964. С. 40–42.
- Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья-95, 1995. 992 с.
- Anisimov O. A., Velichko A. A., Demchenko P. F., Eliseev A. V., Mokhov I. I., Nechaev V. P. Effect of climate change on permafrost in the past, present, and future // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2002. Vol. 38 (1). P. 25–39.
- Are F. E., Reimnitz E. An overview of the Lena River Delta setting: geology, tectonics, geomorphology, and hydrology // J. Coastal Res. 2000. Vol. 16. P. 1083–1093.
- Avetisov G. P. Geodynamics of the zone of continental continuation of Mid-Arctic earthquakes belt (Laptev

- Sea) // *Phys. of the Earth and Planet. Interi.* 1999. Vol. 114. P. 59–70.
- Boike J., Nitzbon J., Anders K., Grigoriev M., Bolshiyarov D., Langer M., Lange S., Bornemann N., Morgenstern A., Schreiber P., Wille Ch., Chadburn S., Gouttevin I., Burke E., Kutzbach L. A 16-Year Record (2002–2017) of Permafrost, Active-Layer, and Meteorological Conditions at the Samoylov Island Arctic Permafrost Research Site, Lena River Delta, Northern Siberia: An Opportunity to Validate Remote-Sensing Data and Land Surface, Snow, and Permafrost Models // *Earth Syst. Sci. Data.* 2019. Vol. 11. P. 261–299.
- French H. M. *The Periglacial Environment*, 3rd. ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2007. 458 p.
- Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J. W., Schuur E. A. G., Ping C.-L., Schirrmeister L., Grosse G., Michaelson G. J., Koven C. D., O'Donnell J. A., Elberling B., Mishra U., Camill P., Yu Z., Palmtag J., Kuhry P. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // *Biogeosciences.* 2014. Vol. 11. P. 6573–6593.
- Ignatov M. S., Afonina O. M., Ignatova E. A. with contributions on regional floras from: Abolina A., Akatova T. V., Baisheva E. Z., Bardunov L. V., Baryakina E. A., Belkina O. A., Bezgodov A. G., Boychuk M. A., Cherdantseva V. Ya., Czernyadjeva I. V., Doroshina G. Ya., Dyachenko A. P., Fedosov V. E., Goldberg I. L., Ivanova E. I., Jukoniene I., Kannukene L., Kazanovsky S. G., Kharzinov Z. Kh., Kurbatova L. E., Maksimov A. I., Mamatkulov U. K., Manakyan V. A., Maslovsky O. M., Napreenko M. G., Otnyukova T. N., Partyka L. Ya., Pisarenko O. Yu., Popova N. N., Rykovsky G. F., Tubanova D. Ya., Zheleznova G. V., Zolotov V. I. Checklist of mosses of East Europe and North Asia // *Arctoa.* 2006. Vol. 15. P. 1–130. <https://doi.org/10.15298/arctoa.15.01>
- Kartozia A. Assessment of the Ice Wedge Polygon Current State by Means of UAV Imagery Analysis (Samoylov Island, the Lena Delta) // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11 (13). 1627. P. 1–15.
- Matveyeva N. V. Scales and levels of vegetation cover heterogeneity in the Arctic // *Abhandlungen aus dem Westfälischen Museum für Naturkunde.* 2008. Bd. 706 N 3/4. S. 325–334.
- McGill B. J. Towards a unification of unified theories of biodiversity // *Ecol. Lett.* 2010. N 13 (5). P. 627–642.
- Morgenstern A., Grosse G., Günther F., Fedorova I. V., Schirrmeister L. Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta // *The Cryosphere.* 2011. Vol. 5. P. 849–867.
- Morgenstern A., Ulrich M., Günther F., Roessler S., Fedorova I. V., Rudaya N. A., Wetterich S., Boike J., Schirrmeister L. Evolution of thermokarst in East Siberian ice-rich permafrost: A case study // *Geomorphology.* 2013. Vol. 201. P. 363–379.
- Romanovskii N. N., Hubberten H.-W., Gavrilov A. V., Tumskoy V. E., Tipenko G. S., Grigoriev M. N., Siegert C. Thermokarst and land-ocean interactions, Laptev Sea Region, Russia // *Permafrost Periglac.* 2000. Vol. 11. P. 137–152.
- Strauss J., Schirrmeister L., Grosse G., Wetterich S., Ulrich M., Herzschuh U., Hubberten H.-W. The deep permafrost carbon pool of the Yedoma region in Siberia and Alaska // *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40. P. 6165–6170.
- Schwamborn G., Rachold V., Grigoriev M. N. Late quaternary sedimentation history of the Lena Delta // *Quaternary International.* 2002. Vol. 89. P. 119–134.
- Tarnocai C., Canadell J. G., Schuur E. A. G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochem. Cycles.* 2009. Vol. 23 (GB 2023). P. 1–11.
- Vohnlanthen C. M., Walker D. A., Raynolds M. K., Kade A. N., Kuss P., Daniëls F. J. A., Matveyeva N. V. Patterned-ground plant communities along a bioclimatic gradient in the high Arctic // *Phytocoenologia.* 2008. Vol. 38, N 1–2. P. 23–63.
- Walker D. A., Epstein H. E., Romanovsky V. E., Ping C. L., Michaelson G. J., Daanen R. P., Shur Y., Peterson R. A., Krantz W. B., Raynolds M. K., Gould W. A., Gonzalez G., Nickolsky D. J., Vohnlanthen C. M., Kade A. N., Kuss P., Kelley A. M., Munger C. A., Tarnocai C. T., Matveyeva N. V., Daniels F. J. A. Arctic patterned-ground ecosystems: a synthesis of field studies and models along a North American Arctic transect // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. G03S01. P. 1–17.
- Walker Donald A., Daniëls Fred J. A., Matveyeva Nadezhda V., Šibík Jozef, Walker Marilyn D., Breen Amy L., Druckenmiller Lisa A., Raynolds Martha K., Bültmann Helga, Hennekens Stephan, Buchhorn Marcel, Epstein Howard E., Ermokhina Ksenia, Fosaa Anna M., Heiðmarsson Starri, Heim Birgit, Jónsdóttir Ingibjörg S., Koroleva Natalia, Lévesque Esther, MacKenzie William H., Henry Greg H. R., Nilsen Lenart, Peet Robert, Razzhivin Volodya, Talbot Stephen S., Telyatnikov Mikhail, Thannheiser Dietbert, Webber Patrick J., Wirth Lisa M. Circumpolar Arctic Vegetation Classification // *Phytocoenologia.* 2018. Vol. 48, N 2. P. 181–201.
- Walter K. M., Edwards M. E., Grosse G., Zimov S., Chapin III F. S. Thermokarst lakes as a source of atmospheric CH<sub>4</sub> during the last deglaciation // *Science.* 2007. Vol. 318. P. 633–636.
- Westhoff V., van der Maarel E. The Braun-Blanquet Approach // *Handbook of Vegetation Science.* P. S. Ordination and classification of communities. The Hague, 1973. P. 617–726.
- Wetterich S., Kuzmina S., Andreev A. A., Kienast F., Meyer H., Schirrmeister L., Kuznetsova T., Sierralta M. Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, Northeast Siberia, Russia // *Quat. Sci. Rev.* 2008. Vol. 27. P. 1523–1540.

# Permafrost degradation as supporting factor for the tundra ecosystems biodiversity

N. N. LASHCHINSKIY<sup>1, 2</sup>, A. A. KARTOZIYA<sup>2, 3</sup>, A. N. FAGUET<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Central Siberian Botanical Garden of SB RAS  
630090, Novosibirsk, Zolotodolinskaya str., 101  
E-mail: nnl630090@gmail.com*

<sup>2</sup>*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS  
630090, Novosibirsk, Academician Koptyug ave., 3*

<sup>3</sup>*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of SB RAS  
630090, Novosibirsk, Academician Koptyug ave., 3*

High-detailed images acquired by means of unmanned aerial imaging allowed for description of certain type of thermokarst depression structural features. These depressions developed in yedoma deposits in southern part of typical tundra subzone in Lena Delta. Geomorphology and vegetation of the model depression were characterized by the combination of GIS-analysis and ground survey. Detailed mapping showed that the surface of the depression bottom consists of “baidjarakh” field covered by the complex vegetation of highly productive plant communities dominated by grasses and graminoids. Comparison of satellite images and topographic maps from different years showed that depression appeared from the shallow thermokarst lake drained not later than 40 years ago. Depression terrain and vegetation are determined by its origin and the composition of surface geological substrate. Depression vegetation is quite contrast to zonal tundra by its structure and floristic composition. It contains few species which tend to be more typical for southern distribution. Such spots serve as feeding places for herbivorous animals and in the past could be an important part of the Pleistocene megafauna forage. Thermokarst events were typical for the ice-complex through the whole period of its formation, but might differ in intensity and area depending on climate conditions. Nowadays size and lifetime of thermokarst lakes depends on their position in terrain and thermoerosion intensity. In tundra landscape thermokarst plays an important role in creation of new habitats and plants and animals biodiversity support.

**Key words:** UAV, yedoma, ice-complex, thermokarst, biodiversity, GIS-analysis, Lena Delta.