

Распределение запаса зелёных кормов на участках выпаса оленей по материалам спутниковых съёмок разной детальности

В. В. Елсаков¹, С. М. Зуев², Т. А. Мыльникова¹

¹ *Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, 167610, Россия
E-mail: elsakov@ib.komisc.ru*

² *Научный центр изучения Арктики, Салехард, 629008, Россия*

Материалы спутниковых съёмок использованы для характеристики пространственно-временных особенностей распределения запаса зелёных кормов участка, выделенного под изгородное северное оленеводство (7,48 тыс. га). Для участка выпаса (Тазовский р-н Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО)) построены и сопоставлены модели расчёта запаса фитомассы по спутниковым изображениям разного пространственного разрешения в комбинации с полевыми исследованиями. Снижение детальности снимков (от 10 м для Sentinel-2 до 250 м для MODIS) существенно изменяет структуру профиля распределения величин запаса (смещение низких и высоких значений при смешивании формируют рост значений области средних величин). На уровне пикселей одного размера (Sentinel генерализован до MODIS) между моделями наблюдали наличие заметной связи ($r = 0,60$; $r_s = 0,53$; $n = 850$; $p < 0,001$) с наибольшими расхождениями в области низких и высоких величин для модели Sentinel. При усреднении показателя до площадей отдельных хозяйственно-геоботанических контуров характеристики запасов демонстрируют высокую степень сходимости ($r^2 = 0,92$; $n = 65$). Построенная по съёмкам MODIS модель была экстраполирована на пастбища всей тундровой зоны. Сопоставление снимков Landsat разных лет (1973–2014) дифференцировало травянистые сообщества, сформированные на месте спущенных озёр (хасыреи), по времени их образования. Отмечена возможность искусственного осушения каскадов озёр для формирования участков летнего выпаса оленей. При суммарной площади покрытия в 11,1 % участки формировали от 16,1 % (по MODIS) до 20,0 % (по Sentinel) всего валового запаса зелёных кормов территории при средних величинах запаса зелёных кормов на участках хасыреев в диапазоне 10,2–15,4 ц/га. Рассчитанные показатели стали основой для анализа величин оленеёмкости при построении хозяйственных проектов использования растительных ресурсов.

Ключевые слова: северное оленеводство, зелёные корма, Тазовский район ЯНАО, термокарстовые озёра, хасыреи, спутниковые методы исследований, съёмка MODIS и Sentinel, изгородное оленеводство

Одобрена к печати: 26.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-155-168

Введение

В сфере информационного обеспечения традиционного природопользования в Институте биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН разработана, защищена патентом и внедрена в практику проведения землеустроительных работ «Технология ресурсной оценки пастбищных угодий северного оленя по спектрально-зональным спутниковым данным» (Елсаков, 2014). В 2014–2020 гг. привлечение разработки позволило провести инвентаризацию и актуализацию проектов использования пастбищ оленеводческих хозяйств Нечернозёмной зоны России. Преимущество использования материалов спутниковых съёмок заключается в возможности построения количественных моделей для оценки распределения валового запаса кормовых ресурсов и расчёта показателей оленеёмкости на основании комбинированного использования материалов инструментальных полевых измерений и спектральных величин.

Растительные ресурсы оленьих пастбищ включают зелёные и лишайниковые корма. Лишайники — основные корма зимнего периода — имеют высокое содержание углеводов (72–95 % от сухого вещества). Для небольших территорий с развитым лишайниковым по-

кровом возможна оценка распределения проективного покрытия и валового запаса (Елсаков и др., 2017) с привлечением детальной спутниковой съёмки (World View, Quick Bird и др.). Для крупных территориальных массивов и с привлечением снимков меньшей детальности выполнение такой оценки затруднено, так как лишайники не являются основными эдификаторами запаса пигментов в фитоценозах вследствие низкого их содержания в талломах. Современные тундровые сообщества редко содержат запас напочвенных лишайников выше 100 г/м^2 . Даже на участках лишайниковых тундр с развитыми матами массой до $1,5\text{--}1,8 \text{ кг/м}^2$ наибольшие величины содержания хлорофилла не превышали $0,16\text{--}0,19 \text{ г/м}^2$ (горные тундры Кольского п-ова, заповедник «Пасвик»). Для сравнения, низкорослый ерник северных тундр Тимана содержал запас пигментов в интервале $0,66\text{--}0,78 \text{ г/м}^2$ (Елсаков, Щанов, 2019). Участие в составе лишайниковых сообществ даже небольшого числа сосудистых растений существенно изменяло суммарные спектральные величины.

Зелёные корма — наиболее важные поставщики протеинов и легкопереваримых углеводов, микро- и макроэлементов в летний период выпаса северных оленей. Находясь в тесном взаимодействии с климатическими и погодными условиями, межгодовые изменения запаса зелёных кормов выступают в качестве индикаторов сезонных и климатогенных изменений фитоценозов, смен мерзлотных и гидрологических условий, величин пастбищной нагрузки. Для большинства растительных сообществ это основные эдификаторы пигментного состава, поэтому при построении моделей распределения суммарного валового запаса зелёных кормов не возникает существенных сложностей. Высокая мозаичность почвенно-растительных условий тундровых сообществ затрудняет процедуру верификации материалов спутниковых съёмок при сопоставлении с подспутниковыми инструментальными наблюдениями. Полевые наблюдения представляют собой преимущественно точечные измерения, в то время как материалы спутниковых измерений имеют площадной характер, поэтому часто не удаётся достичь точных согласий между ними. Сходимость величин может быть повышена при увеличении количества инструментальных измерений в пределах площади пикселя.

Отсутствие возможностей для привлечения дополнительных земельных ресурсов под выпас северных оленей, высокая численность отдельных стад и конкурентные отношения между хозяйствами оленеводов, интенсивное промышленное использование земель диктуют необходимость в создании информационных инструментов, решающих вопросы инвентаризации, организации и обеспечения системы мониторинга земель сельскохозяйственного назначения Арктического региона.

Задачи настоящей работы включали: 1) сопоставление моделей валового запаса зелёных кормов на модельный участок тундровых пастбищ (Тазовский р-н Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО)), построенных с применением спутниковых съёмок различного разрешения (Sentinel и MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)); 2) анализ сходимости и экстраполяция данных точечных полевых измерений, рассчитанных запасов полигональных (площадных) участков по разным источникам; 3) прогнозная оценка возможности расширения запасов кормовых ресурсов за счёт участков зарастающих разновременных хасыреев, сформированных на месте дренированных озёр.

Материалы и методы

Модельный участок включал отведённую под сезонный загонный выпас северных оленей территорию, обнесённую сетчатой изгородью (7,8 тыс. га), расположенную в экотонной зоне «лес — тундра», водосборе среднего течения р. Юредейяха (Тазовский р-н ЯНАО) (*рис. 1*). На участке доминирует тундровая растительность (50,7 %), болотные комплексы (30,9 %) и лиственничные редколесья (5,8 %). Комплексы лугов и травяных ивняков вдоль крупных водотоков занимают 6,0 % территории. Ранее участок под выпас северных оленей не использовали, природные комплексы сохранили естественные характеристики. Исторические изменения территории (наибольшие трансформации отмечены на участках осушенных термокарстовых озёр с образованием хасыреев) наблюдали по съёмкам Landsat (1973–2020)

(источник: <http://www.glovis.usgs.gov>). В качестве источника данных по рельефу применяли цифровую модель рельефа (ЦМР) ArcticDEM (<https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem>, 2020). Данные по рельефу и однородные по составу геоботанические контуры стали основой для выделения хозяйственно-геоботанических выделов ($n = 65$), для которых рассчитывали показатели запасов кормовых растений и проводили оценку потенциальной оленеёмкости общепринятыми методами (Методические..., 2017). На модельном участке устойчивое содержание животных возможно при поддержании численности в пределах 100 (зимних) — 140 (июльских) голов.

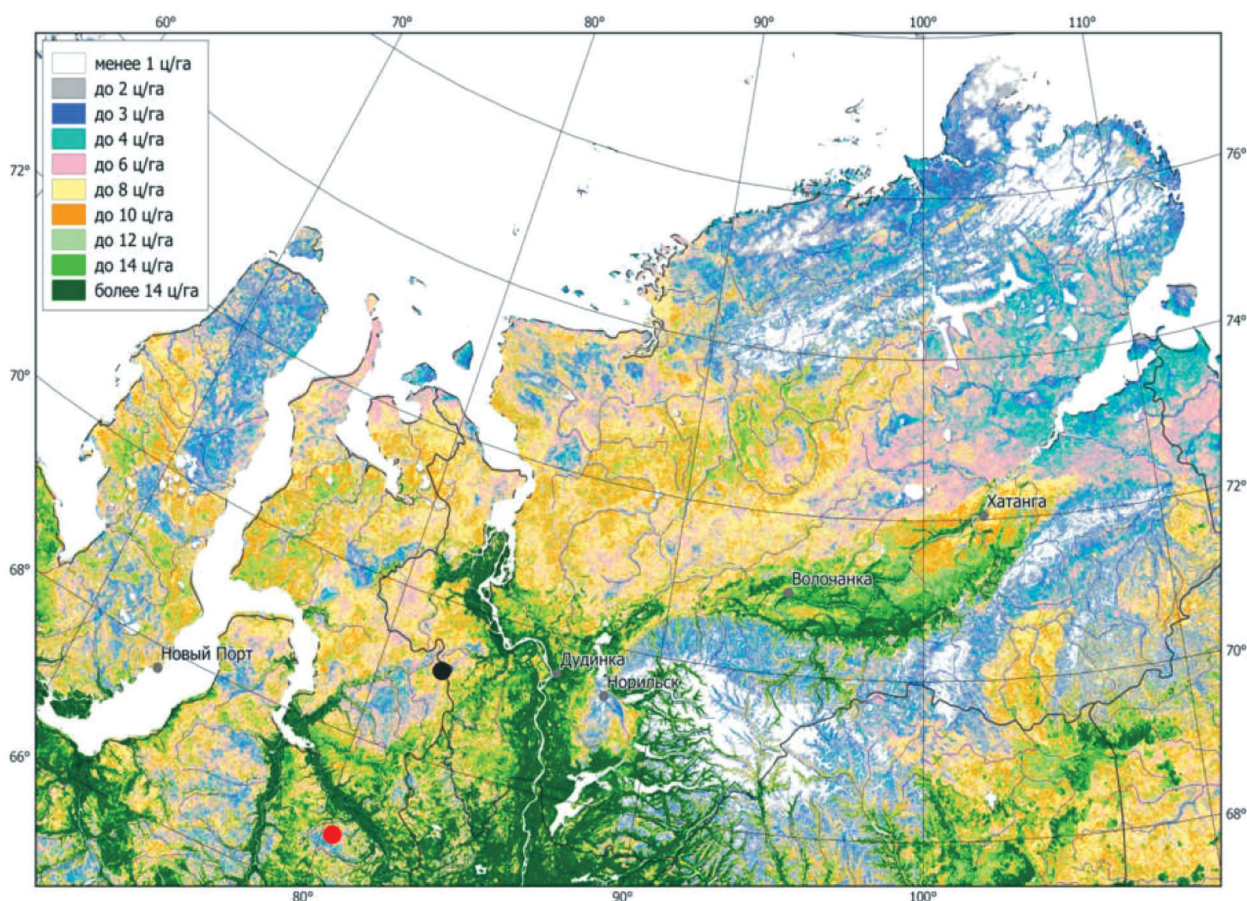


Рис. 1. Распределение запасов зелёных кормов (ц/га) на пастбищах Западной Сибири и Таймыра. Обработка данных MODIS. Красным кружком отмечен участок полевых измерений, чёрным кружком — материалы по запасам фитомассы, опубликованные в литературе (Янченко, Филатова, 2018)

Спутниковые изображения содержали абсолютные безразмерные значения коэффициентов отражения (*англ.* Spectral Reflectance — SRefl) и были радиометрически и атмосферно скорректированы. Материалы разносезонных спутниковых съёмок Sentinel использовали для картографирования доминирующих растительных сообществ (масштаб 1:100 000) методами управляемой классификации.

Полевые исследования (5–12 сентября 2021 г.) включали набор геоботанических и флористических методов исследований с фиксированием GPS-координат (*англ.* Global Positioning System, система глобального позиционирования) для дальнейшего позиционирования и корректировки выделенных геоботанических контуров. Сбор надземной фитомассы зелёных кормов проведён в трёхкратной повторности (рамка 0,25×0,25 м) в пределах 13 разнесённых по территории площадок геоботанических описаний 10×10 м. Период исследований приурочен к началу желтения и листопада кустарников. Для анализа использованы монодоминантные по видовому составу фитоценозы с развитым травяным покровом (проективное

покрытие (ПП) боле 95 %). Укосы разобраны по видовому составу, высушены и взвешены. Экстраполяция полученного запаса на всю площадь пикселя представляла вариант для участка с проективным покрытием доминирующего вида травянистых растений в сообществе с ПП 90–100 %, поэтому при построении модели она скорректирована на реально наблюдаемый показатель ПП участка измерений. Общеизвестны различия в содержании пигментов в фитомассе разных жизненных форм растений и лишайников. Наименьшее содержание пигментов (хлорофилл $a + b$) в выборке отмечено для лишайников (собственные измерения): от 0,06 мг/г сухой массы у *Flavocetraria nivalis* и *Cladonia arbuscula* до 0,4 мг/г для *Cladina rangiferina*; наибольшее — у травянистых: от 2,28 мг/г у *Rubus chamaemorus* до 5,0 и 5,34 мг/г для *Calamagrostis purpurea* и *Carex aquatilis* (Головки и др., 2007). Мхи характеризуются средними показателями: 1,46–2,66 мг/г. Так как для построения моделей использовали участки с монодоминантными травяными сообществами, полученные величины запаса можно считать приведёнными к запасу по травянистым растениям.

Построение моделей оценки запаса зелёных кормов выполнено по спутниковым изображениям MODIS (250 м) (MOD13Q1.005, источник данных: <http://modis.gsfc.nasa.gov>) и Sentinel-2 (2020–2021) (детальность 10 м) (источник: <http://www.glovis.usgs.gov>). В основу построения модели по MODIS (размер пикселя изображений 0,25×0,25 км) легли закономерности связей нормализованного разностного индекса растительного покрова (англ. Normalized Difference Vegetation Index — NDVI) и обобщённые материалы инструментальных полевых измерений, выполненные для различных ботанико-географических зон Таймыра Р. П. Щелкуновой* (1982). Связь между усреднёнными для отдельных ботанико-географических зон показателями NDVI спутниковых изображений и величинами, полученными методом укосов, наиболее полно ($r^2 = 0,998$; $n = 9$; $p < 0,001$) описывает зависимость, представленная в виде экспоненциальной функции вида:

$$y = 0,0100e^{8,73x},$$

где x — рассчитанные по спутниковым изображениям величины NDVI. В качестве параметров NDVI взяты усреднённые за период 2000–2016 гг. максимальные годовые значения индекса (Елсаков, 2017). Полученные величины сопоставлены с результатами, построенными по съёмке Sentinel-2 модели, в комбинации с полевыми измерениями. Вычисление запаса проводили на основании анализа связи спектральных величин изображений и инструментально измеренных показателей с использованием метода многомерной линейной регрессии вида:

$$y = k + \sum_{i=1}^n ch_i \cdot a_i,$$

где y — запас зелёных кормов (г/м²); k — рассчитанный свободный коэффициент; a_i — коэффициент при i -м канале набора снимков (ch_i); n — общее количество использованных каналов снимков. В качестве основы для построений использованы летний (11.07.2021) и осенний (16.09.2020) снимки Sentinel и рассчитанные для них индексы NDVI. Для тундровых

* Раиса Павловна Щелкунова (12 марта 1927 г. — 2009 г.) — доктор биологических наук, геоботаник, сотрудник землеустроительных партий Росгипрозема, проводила исследования в различных регионах: на Камчатке, Таймыре, в Якутии. С 1971 г. Раиса Павловна — старший научный сотрудник НИИ сельского хозяйства Крайнего Севера (Норильск), с 1985 г. руководила лабораторией по изучению растительного покрова оленьих пастбищ при отделе оленеводства. Создатель региональных карт растительного покрова и запасов кормовых растений пастбищ северного оленя Якутии, Таймыра. В своих исследованиях активно использовала аэроспутниковые методы. Более подробно биография и основные публикации Р. П. Щелкуновой представлены А. Д. Мухачевым (2012).



и болотных сообществ участка работ между съёмками отмечены процессы сезонных изменений, связанные с усыханием, отмиранием и снижением содержания пигментов (в среднем по участку отмечен рост значений канала RED (красный) при среднем снижении индекса NDVI на 30 % и снижение значений канала NIR (*англ.* near infrared, ближний инфракрасный) на 8 %). Показатели связи величин инструментальных (отбор укосов) и спектральных измерений были максимально приближены для изображений летних съёмок. Отбор значимых каналов для расчёта коэффициента a_i уравнения линейной регрессии проведён на основании оценки величин значимой вероятности (p -value). Наиболее информативными для модели представляются переменные каналов RED и NIR летней съёмки (наиболее низкие величины p -value 0,015 и 0,022), в меньшей степени — осенней (0,047 и 0,057) и величины NDVI (0,065) осеннего изображения (*табл. 1*).

Таблица 1. Значимая вероятность модели расчёта запасов зелёных кормов ($n = 13$) для наиболее информативных спектральных переменных разносезонных снимков Sentinel

k		11.07.2021		16.09.2020		
		RED	NIR	RED	NIR	NDVI
11,5	a_i	−0,023	0,016	0,043	−0,037	167,8
0,204	p -value	0,022	0,015	0,057	0,047	0,065

Результаты использования моделей, построенных по разномасштабным снимкам, сопоставлены по величинам занимаемых площадей разных классов запаса надземной фитомассы, по доминирующим растительным сообществам и выделенным хозяйственным контурам.

Обсуждение результатов

Величины запаса зелёной фитомассы, рассчитанные по MODIS, отражают современные ценотические, зональные и долготные особенности её регионального распределения (см. *рис. 1, 2g* (см. с. 160)). Тундры и горные участки зоны полярных пустынь п-ова Таймыр характеризовались минимальными значениями (менее 1 ц/га). Максимальные величины (более 14 ц/га) отмечены в сообществах южных гипоарктических тундр, участках с преобладанием кустарников, что приближено к данным исследователей смежных регионов. По опубликованным литературным данным (Янченко, Филатова, 2018), на территории подзоны южных тундр междуречья рек Большая Хета и Мессояха максимальные запасы фитомассы зелёных растений (порядка 10,7 ц/га) отмечены для ивняков. Полевые инструментальные «точечные» измерения фитомассы, опубликованные различными исследователями и выполненные методом укосов, часто превышали величины спутниковых измерений. Так, выполненные для Западной Сибири обобщения (Сорочинская, Леонова, 2020) показывают превышения дистанционных оценок в 2–7 раз. При анализе расхождений инструментальных и спутниковых измерений необходимо принимать во внимание учтённый фракционный состав (соотношение одревесневающих и зелёных частей), возможное влияние вертикальной структуры сообществ. Нижние ярусы (мхи напочвенного покрова) включали до 57,3 % фитомассы кустарничково-мохового сообщества востока Большеземельской тундры (Елькина, Лаптева, 2013). Спутниковые измерения характеризуют преимущественно фотосинтетически активную часть фитомассы, содержащую пигменты (Елсаков, 2013), и непосредственно связаны с запасом зелёных кормов. В укосах кустарниковых сообществ Большеземельской тундры (район п. Сейда, Воркутинский р-н Республики Коми) зелёные части багульника составляли 35,3–45,3 % надземной массы, ивняков — 21,0 %. Полученные для различных сообществ укосы, выполненные в виде точечных измерений, чаще относились к крайним участкам диапазонов фитомассы. На спутниковых съёмках представлены усреднённые по всему участку значения, часто с комплексами сообществ.

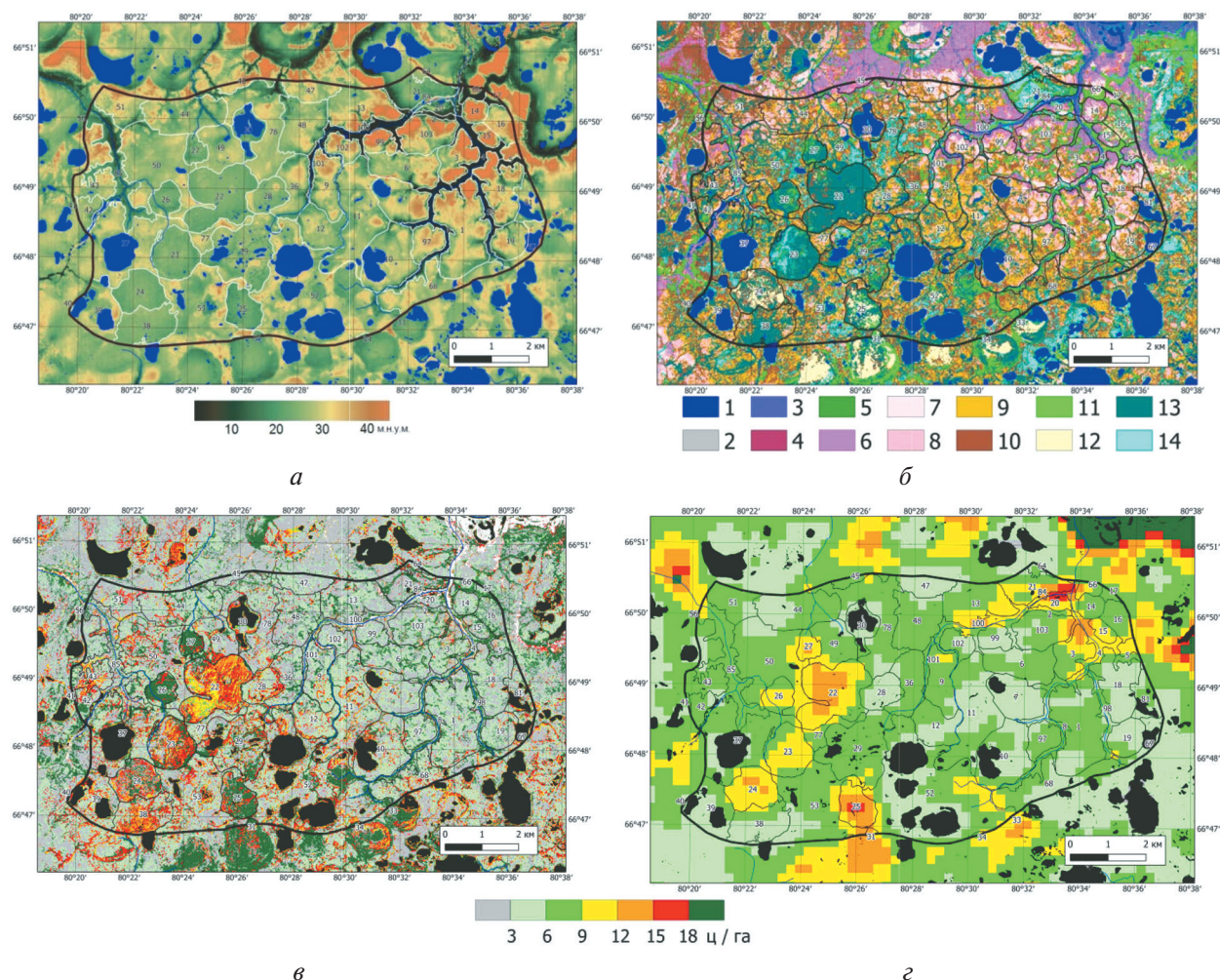


Рис. 2. Участок выполнения полевых инструментальных измерений. Цифровая модель рельефа (а), геоботаническая карта (б), распределение валового запаса по модели с использованием спутниковых съёмок Sentinel (в) и MODIS (г). Цифрами обозначены классы растительного покрова и земной поверхности (представлен процент их участия на участке): 1 — водные поверхности (6,6 %); 2 — территории без растительности (<0,5 %); 3 — сомкнутые еловые травяные леса (0,6 %); 4 — сомкнутые лиственничники лишайниковые (0,1 %); 5 — разреженные лиственные травяные леса (0,7 %); 6 — разреженные лиственничные лишайниковые леса (4,5 %); 7 — кустарничково-лишайниковые тундры (2,3 %); 8 — кустарничково-лишайниковые тундры (10,2 %); 9 — ерничково-моховые тундры (17,4 %); 10 — багульниково-моховые сообщества (20,8 %); 11 — травянистые луговые, ивняки травяные (5,9%); 12 — хасыреи; 13 — травяные, травяно-моховые болота (25,6 %); 14 — болота сфагновые (5,4 %)

Корректность построенной по MODIS модели оценена по результатам, полученным на модельный участок при использовании более детальной съёмки Sentinel в комбинации с привлечением полевых инструментальных измерений. По результатам анализа Sentinel и полевых исследований, на модельном участке (рис. 2б) доминируют кустарниковые сообщества (багульниково-моховые (20,9 %) и ерничково-моховые (17,3 %)), занимающие плоские и пологоволнистые водораздельные пространства, сложенные песчаными и супесчаными породами. В этой группе преобладают низкокустарниковые тундры (ерничково-ивняковые лишайниково-моховые, осоково-лишайниково-моховые, мохово-лишайниковые бугорковатые и пятнисто-бугорковатые).

Основное участие в сложении плакорных фитоценозов принимают кустарники (преимущественно *Betula nana*) со средней высотой не более 15–30 см. Среди болотных комплексов и участков с избыточным увлажнением (30,9 % площади) преобладают травяные и травяно-моховые заболоченные массивы (хасыреи или аласы). Часто хасыреи составлены комплексами травяно-сфагново-кустарничковых болот, мелких озерков и формирующихся бугров

пучения, сформированных в пределах заторфованных котловин, дренированных термокарстовых озёр. С течением времени наблюдаются сукцессионные преобразования в составе растительного покрова, связанные с изменениями мерзлотных и гидрологических условий (Kaverin et al., 2018). Фитомасса травяных растений по материалам инструментальных измерений (укос с площадки $0,25 \times 0,25$ м) достигала наибольших запасов на участках небольших по площади проточных мочажин (до $59,0\text{--}65,8$ ц/га²), на которых основными продуцентами выступали пушица многоколосковая и шейник пурпурный. Более низкие показатели наблюдали на участках мочажин, в болотных массивах и заболоченных пушицевых тундрах ($39,5\text{--}40,7$ ц/га²). В комплексах грядово-мочажинных болот показатель варьирует в интервале $30,5\text{--}41,5$ ц/га². В кустарничковых тундрах биомасса низкорослых кустарничков составила $33,6$ ц/га². Полученные величины привлечены в модель расчёта запаса по данным съёмки Sentinel с учётом проективного покрытия растений в сообществах (рис. 2в).

По материалам модели, построенной по Sentinel, наиболее низкие величины запаса зелёных растений (менее $0,5\text{--}1,0$ ц/га) отмечены в сообществах сфагновых болот и лишайниковых тундр, наибольшие — в травяно-моховых сообществах ($6\text{--}12$ ц/га), травянистых ивняках и склоновых лугах ($16\text{--}21$ ц/га). Однако сообщества с наиболее высоким запасом имели небольшую представленность (для ивняков не более $6,0$ % территории) и не были основными продуцентами зелёных кормов территории. Основной вклад в суммарный баланс вносили сообщества с низкими показателями, но широко представленные на модельном участке: багульниково-моховые, составляющие $1\text{--}4$ ц/га, $20,9$ % запаса. До $78,0$ % площади модельного участка образовывали четыре наиболее крупные класса растительности, влияющие на суммарный профиль распределения частот показателя (рис. 3а), которые в большей степени представлены в низких и высоких диапазонах значений. Профиль модели MODIS смещён в область средних величин, где наиболее представлены показатели интервала $5\text{--}8$ ц/га. При генерализации изображения Sentinel ход показателя приближался к профилю MODIS (см. рис. 3а). Для генерализованных Sentinel наблюдали рост представленности диапазона средних величин показателей при частичном сохранении диапазона полярных величин. Попиксельное сравнение доведённых до одного пространственного разрешения (MODIS) и усреднённых в пределах генерализованных пикселей величин запаса с использованием коэффициента Пирсона и коэффициента ранговой корреляции Спирмена обнаруживает наличие заметной связи ($r = 0,60$; $r_s = 0,53$, $n = 850$, $p < 0,001$) с наибольшими расхождениями в области низких и высоких величин модели Sentinel.

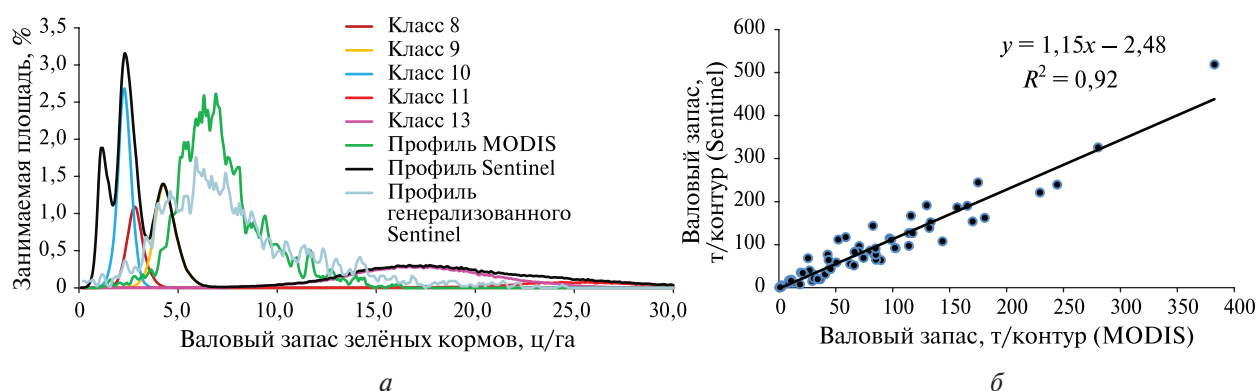


Рис. 3. Распределение классов валового запаса зелёных кормов в пределах модельного участка (а). Представлены суммарные запасы по съёмкам MODIS и Sentinel (сглажены с шагом 3) и распределение запасов в отдельных сообществах. Номера классов растительных сообществ соответствуют рис. 2б. Сравнение валовых величин запаса, полученных по разным моделям для хозяйственно-геоботанических выделов (б)

Сопоставление результатов использования моделей показывает расхождение с запасом по модельному участку порядка $10,7$ %. Общий запас зелёных кормов по оценкам спутни-

ка Sentinel и материалам полевых исследований составил 5,23 тыс. т (в среднем 7,05 ц/га), по MODIS — 5,86 тыс. т (7,90 ц/га). При усреднении показателя до площадей отдельных хозяйственно-геоботанических контуров значения демонстрируют высокую степень сходимости ($r^2 = 0,92$; $n = 65$) (рис. 3б).

Остаётся актуальным вопрос о перспективах увеличения запаса зелёных кормов при росте площадей хасыреев за счёт искусственного или естественного осушения термокарстовых озёр. Изменение количества и площади поверхности озёр в областях распространения многолетнемёрзлых пород часто связывается с деградацией последних при климатических трансформациях и воспринимается исследователями в качестве одного из интегрирующих индикаторов (Елсаков, Марущак, 2011; Кравцова, Родионова, 2016; Полищук, Полищук, 2013 и др.). В пределах территории южных тундр региона Западной Сибири под действием глобального потепления отмечено сокращение суммарной площади озёр от 9 % (Smith et al., 2005) до 11 % (Брыксина, 2011). Основная фаза роста приземной температуры воздуха на территории Западной Сибири приходится на период второй половины 1980-х гг. (Shiryaev et al., 2019). Однако изменения температуры воздуха (за период 1965–2006 гг.) определяли вариабельность среднегодовой температуры почвогрунтов только на 5 % на севере Сибири, в отличие от Европейской России, где изменения включили 20–50 % вариабельности признака (Шерстюков, 2009). То есть рост климатогенных изменений озёр должен усиливаться с первой половины XXI в. Совместное использование ЦМР в сочетании с разновременными съёмками Landsat отчётливо выделило комплексы хасыреев на осушенных котловинах термокарстовых озёр (рис. 2а).

В пределах района исследований представлены группы хасыреев, однородные по времени формирования. В границах огороженного участка дренирование озёр относится к периоду ранее 1973 г. Южнее, на примыкающем к нему участке большинство осушенных озёр связано с периодом 1990–2014 гг. (рис. 4).

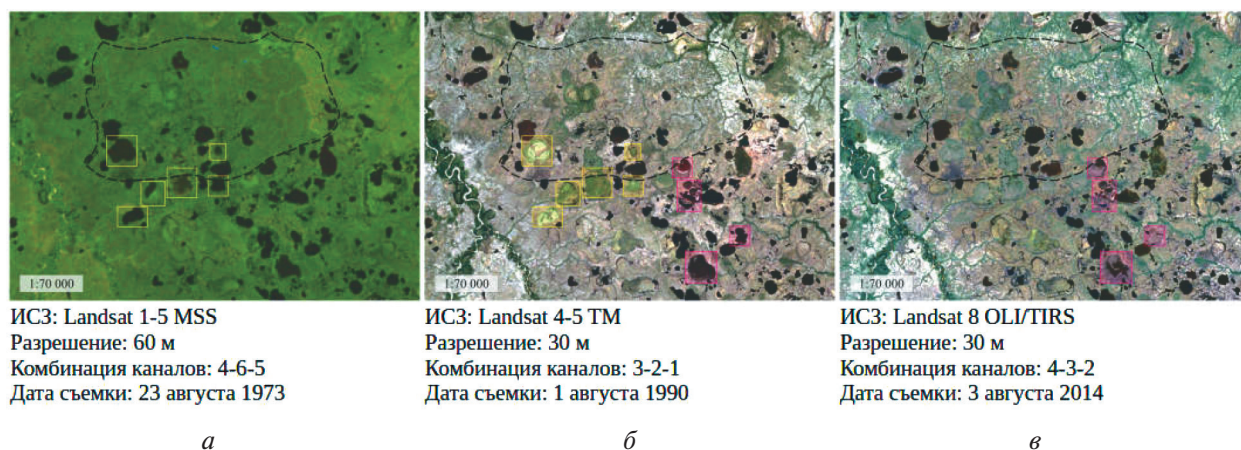


Рис. 4. Термокарстовые озёра участка работ на съёмках 1973 г. (а), 1990 г. (б) и 2014 г. (в).
Отмечены участки дренированных в различные временные периоды озёр

Период дренирования озёр модельного участка опережал фазы роста средней температуры воздуха, что указывает на преимущественно искусственные (антропогенные) причины их осушения. По данным опроса оленеводов, раньше в хозяйствах района ставилась задача проведения локальных земляных работ, направленных на ежегодный спуск одного из термокарстовых озёр для последующего формирования под летний выпас участков с богатым травостоем. Активное посещение стад оленей участков спущенных озёр отмечен и в Большеземельской тундре (рис. 5, см. с. 163). В связи с этим роль осушенных термокарстовых озёр как индикаторов климатогенных изменений в районах с развитым оленеводством может быть завышена.



Рис. 5. Дренажные каналы между каскадами термокарстовых озёр разных уровней на модельном участке (Тазовский р-н ЯНАО) (*а*). Заращение крестовником скученным (*Senecio congestus*) котловины термокарстового озера (период заселения — год) на участке пастбищ сельскохозяйственного производственного кооператива «Дружба народов» (Большеземельская тундра, НАО) (*б*)

Растительные сообщества современных хасыреев на отведённой под выпас северных оленей территории при суммарной площади покрытия в 11,1 % формировали до 16,1/20,0 % (MODIS/Sentinel) всего валового запаса зелёных кормов. Фитоценозы одной из осушенных в период 1973–1990 гг. озёрных котловин площадью 121 га (см. рис. 2, контур № 24) формировали от 133,2 до 151,8 ц (модели по MODIS и Sentinel) зелёной фитомассы, средняя продуктивность участка характеризуется как 10,1–13,0 ц/га (табл. 2). Осушение оставшихся на территории озёр при величине заозёрности в 6,5 % приведёт к росту продуктивности участка по зелёным кормам на 9,5/12,0 % (499/754 т) (MODIS/Sentinel). Полученные величины запаса растительного покрова хасыреев ниже показателей, отмеченных для Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия), где аласные луга составляют до 50 % площади естественных кормовых угодий. При очень низком видовом разнообразии (4 вида травянистых растений) продуктивность пояса прибрежно-водной растительности аласов достигала 37–39 ц/га, влажных лугов (до 20 видов) — 25–41 ц/га (Десяткин, 2006). При этом общая продуктивность таких лугов колебалась между годами более чем в 10 раз (Десяткин, Десяткина, 2000).

Таблица 2. Показатели продуктивности разновозрастных хасыреев в районе исследований (номера соответствуют рис. 2)

Контур №	Дренировано	Площадь <i>S</i> , га	Валовый запас, т/контур		Продуктивность, ц/га	
			MODIS	Sentinel	MODIS	Sentinel
22	ранее 1973 г.	249,3	280,3	325,9	11,2	13,1
23	ранее 1973 г.	139,2	129,8	191,0	9,3	13,7
24	1973–1990 гг.	121,1	133,2	151,8	11,0	12,5
25	ранее 1973 г.	90,2	116,0	167,1	12,9	18,5
26	ранее 1973 г.	60,3	58,7	117,1	9,7	19,4
27	ранее 1973 г.	38,1	42,8	76,8	11,2	20,2
38	ранее 1973 г.	133,8	82,5	143,7	6,1	10,7
	Итого:	832,0	843,3	1173,4	10,2	15,4

Заключение

Зелёная фитомасса — основной продуцент органического вещества, выступает в качестве индикатора изменений экосистем, связанных с природными или антропогенными влияниями, что актуально ввиду наблюдаемых масштабных экосистемных трансформаций. Под влиянием климатических флуктуаций в период 1982–2000 гг. рост первичной продукции фитомассы в Северной Евразии составил 1,17 % в год (Второй..., 2014). К середине XXI в. прогнозируется увеличение продуктивности растительных сообществ отдельных зон Арктики до 30 % от её современной величины (Анисимов и др., 2015). Это неизбежно скажется на изменениях в сфере пастбищного оленеводства и требует развития инструментальных методов учёта изменений.

Для сообществ тундровой зоны с упрощённой вертикальной структурой растительного покрова материалы спутниковых съёмок достаточно полно характеризуют распределение фотосинтетически активной биомассы. На основании установленных коррелятивных связей между спектральными величинами спутниковых изображений Sentinel и инструментальными измерениями фитомассы получены пространственно-временные зависимости распределения валового запаса зелёных кормов на сообщества модельного участка. Генерализация изображений до уровня среднего пространственного разрешения (MODIS) существенно изменяет структуру профиля распределения запаса (смещение низких и высоких значений при смешивании увеличивает область средних значений), однако на уровне средних показателей изображения хорошо сопоставимы.

Для анализа вариабельности сообществ по показателям продуктивности (особенно мозаичных фитоценозов тундровой зоны) наиболее приемлемым представляется привлечение материалов детальной съёмки и высокого разрешения. Различия суммарного запаса зелёных кормов (приведены к запасу травянистых), рассчитанные по разномасштабным моделям по общему участку, составили 8,3 %: по модели Sentinel — 5,23 тыс. т (в среднем 7,05 ц/га), по модели MODIS — 5,86 тыс. т. (7,90 ц/га). Исходя из ориентировочного суточного норматива потребления животными кормов (5 кг сухой массы в сутки) (Сыроватский, 2000), общий запас кормовых растений для территории составил около 1172 тыс. оленедней, что при численности стада в 1000 голов приведёт к истощению участка в течение 3–4 лет (при круглогодичном использовании). При этом следует отметить, что сезонное использование оленьих пастбищ внутри изгородей (только летний период) стадом не более 500 голов, применение практик спущенных озёр (с целью увеличения зелёных кормов) и расширения границ участка выпаса оленей за пределами изгороди (по мере адаптации животных к данной территории), а также применение технологий сдерживания оленьих стад, характерных для таёжного типа оленеводства (теневые навесы, оленьи сараи, отсекающие изгороди, двухлетнее чередование огороженных пастбищ, использование подкормки животных с целью повышения доместикации оленей и др.), увеличат срок использования оленьих пастбищ внутри изгородей.

Сходимость результатов использования разномасштабных моделей даёт возможность расширения модели оценки величин запаса, полученных по съёмкам MODIS, для всех тундровых пастбищ северного оленя (рис. 6, см. с. 165). Наиболее высокие показатели среднего запаса зелёных кормов отмечены в пределах кустарниковых тундр востока Большеземельской тундры (окрестности Воркуты) и составили 14 ц/га (по данным MODIS). Сравнение с опубликованными результатами показывает возможное занижение показателя. На севере Восточно-Европейской равнины из общего запаса летних кормов на долю листьев кустарников приходится более 60 % (Сенокосы..., 1969), в зарослях кустарника запас листьев на высоте до 1,5 м составляет 25–30 ц/га.

Исходными данными для построения модели запаса зелёных кормов выступают величины сухой массы, что позволяет подойти к анализу аккумуляции углерода надземной фитомассой тундровых сообществ. При содержании углерода в сухом веществе надземной фитомассы для растений и лишайников в течение периода вегетации 42,3–50,4 мг/г сухого веса (Елсаков, 2003) общий запас углерода тундровой зоны может быть оценён в половину от воздушно-сухого веса. Полученные результаты позволяют более полно визуализировать закономерности

распределения показателей биологической продуктивности экосистем тундровой зоны для подтверждения ранее полученных обобщений (Базилевич, 1993).

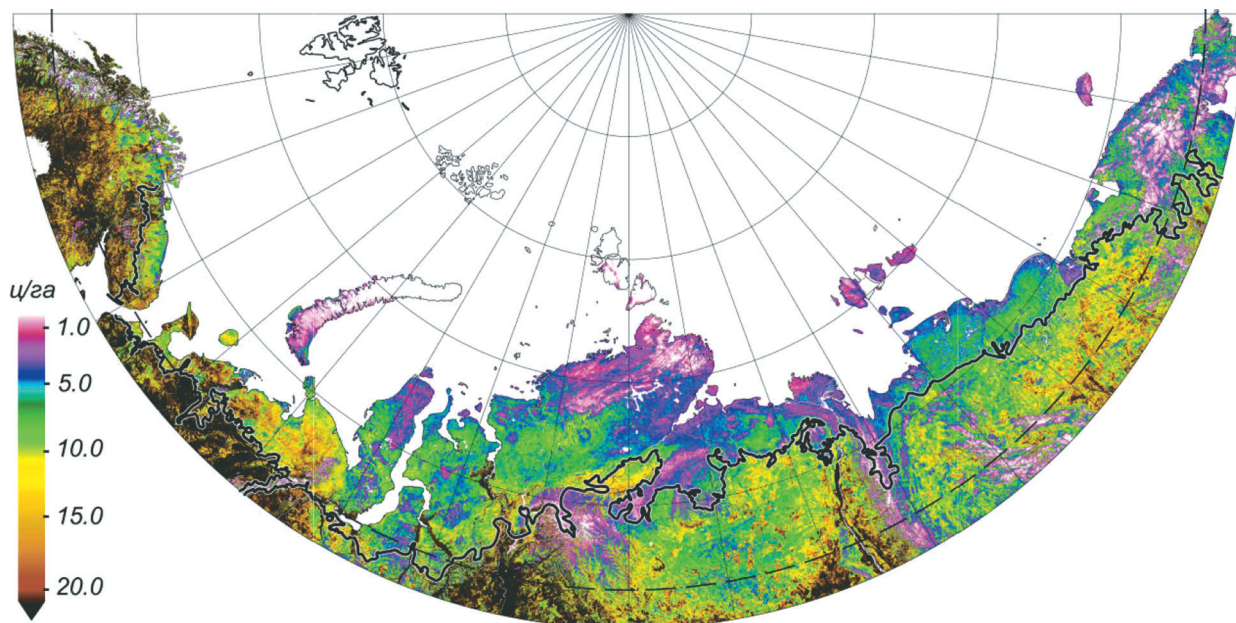


Рис. 6. Распределение валового запаса зелёных кормов на пастбищах северного оленя (ц/га). Обработка многолетних данных MODIS. Линией отмечена граница леса

Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы госбюджетной темы № 122040600026-9.

Литература

1. Анисимов О. А., Жильцова Е. Л., Разживин В. Ю. Моделирование биопродуктивности в арктической зоне России с использованием спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 3. С. 60–70. DOI: 10.7868/S0205961415030021.
2. Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 295 с.
3. Брыксина Н. А. Научно-методические основы применения данных дистанционного зондирования при исследовании динамики термокарстовых ландшафтов Западно-Сибирской равнины: дис. ... канд. геогр. наук. Ханты-Мансийск, 2011. 192 с.
4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1007 с.
5. Головки Т. К., Табаленкова Г. Н., Дымова О. В. Пигментный комплекс растений Приполярного Урала // Ботанич. журн. 2007. Т. 92. № 11. С. 1732–1740.
6. Десяткин Р. В. Почвообразование в термокарстовых котловинах-аласах криолитозоны: дис. ... д-ра биол. наук. Улан-Удэ, 2006. 396 с.
7. Десяткин Р. В., Десяткина Л. И. Динамика продуктивности аласных лугов // Проблемы северного земледелия: селекция, кормопроизводство, экология. Новосибирск: СО РАСХН, 2000. С. 157–163.
8. Елсаков В. В. Аккумуляция азота и углерода надземной массой растений в сообществах Большеземельской тундры. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2003. Вып. 461. 28 с.
9. Елсаков В. В. Использование материалов спутниковых съемок для анализа значений хлорофилльного индекса тундровых фитоценозов // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 1. С. 60–70. DOI: 10.7868/S0205961413010016.
10. Елсаков В. В. Технология ресурсной оценки пастбищных угодий северного оленя по спектрально-спутниковым данным. Патент РФ 2521755. Рег. 10.07.2014.
11. Елсаков В. В. Пространственная и межгодовая неоднородность изменений растительного покрова тундровой зоны Евразии по материалам съемки MODIS 2000–2016 гг. // Современные

- проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 56–72. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-56-72.
12. Елсаков В. В., Марущак И. О. Межгодовые изменения термокарстовых озер северо-востока Европейской России // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 45–57.
 13. Елсаков В. В., Щанов В. М. Современные изменения растительного покрова пастбищ северного оленя Тиманской тундры по результатам анализа данных спутниковой съёмки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 128–142. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-128-142.
 14. Елсаков В. В., Щанов В. М., Поликарпова Н. В. Анализ валового запаса и проективного покрытия лишайников в напочвенном покрове фитоценозов Государственного природного заповедника «Пасвик» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 72–83. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-72-83.
 15. Елькина Г. Я., Лаптева Е. М. Запасы макроэлементов в кустарниково-лишайниково-моховой тундре // 2-я Всерос. науч. конф. «Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана»: сб. докл. Сыктывкар, 3–7 июня 2013. Сыктывкар: Ин-т биологии Коми НЦ УрО РАН, 2013. С. 48–53.
 16. Кравцова В. И., Родионова Т. В. Исследование динамики площади и количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 1. С. 81–89.
 17. Методические рекомендации по комплексному обследованию, оценке и использованию земель районов северного оленеводства, включая территории традиционного природопользования коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации / под ред. В. И. Куракина. М.: АПР, 2017. 268 с.
 18. Мухачев А. Д. Геоботаника, преданный крайнему северу // Традиционное природопользование и научное обеспечение АПК на крайнем севере. СПб.: Санкт-Петербургский гос. ун-т аэрокосмич. приборостроения, 2012. С. 157–163.
 19. Полищук В. Ю., Полищук Ю. М. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты. Ханты-Мансийск: ЮГУ, 2013. 128 с.
 20. Сенокосы и пастбища / под ред. И. В. Ларина. Л.: Колос, 1969. 704 с.
 21. Сорочинская Д. А., Леонова Н. Б. Структура и распределение надземной фитомассы тундровых сообществ Западной Сибири // Экосистемы: экология и динамика. 2020. Т. 4. № 3. С. 5–33. DOI: 10.24411/2542-2006-2020-10063.
 22. Сыроватский Д. И. Организация и экономика оленеводческого производства. Якутск: Ин-т проблем малочисленных народов Севера, 2000. 407 с.
 23. Шерстюков А. Б. Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2009. С. 127.
 24. Шелкунова Р. П. Зональное распределение кормовой фитомассы на Таймыре // Ботанич. журн. 1982. Т. 67. С. 479–492.
 25. Янченко З. А., Филатова С. Н. Кормовая ценность оленьих пастбищ левобережья р. Енисей // Генетика и разведение животных. 2018. № 1. С. 54–59. DOI: 10.31043/2410-2733-2018-1-54-59.
 26. Kaverin D. A., Melnichuk E. B., Shiklomanov N. I., Kakunov N. B., Pastukhov A. V., Shiklomanov A. N. Long-term changes in the ground thermal regime of artificially drained thaw-lake basin in the Russian European north // Permafrost and Periglac Process. 2018. V. 29. P. 49–59. DOI: 10.1002/ppp.1963.
 27. Shiryayev A. G., Moiseev P. A., Peintner U., Devi N. M., Kukarskih V. V., Elsakov V. V. Arctic greening caused by warming contributes to compositional changes of mycobiota at the Polar Urals // Forests. 2019. No. 10(12). Art. No. 1112. 24 p. <https://doi.org/10.3390/f10121112>.
 28. Smith L. C., Sheng Y., MacDonald G. M., Hinzman L. D. Disappearing arctic lakes // Science. 2005. V. 308. Iss. 5727. Art. No. 1429. DOI: 10.1126/science.1108142.

Estimation of green forage distribution in reindeer pastures using satellite imagery of different spatial resolution

V. V. Elsakov¹, S. M. Zuev², T. A. Mylnikova¹

¹ *Institute of Biology, Komi Scientific Centre UrB RAS, Syktyvkar 167610, Russia*
E-mail: elsakov@ib.komisc.ru

² *Scientific Center for Arctic Studies, Salekhard 629008, Russia*

Satellite images of different spatial resolution in combination with field surveys were used for modeling the spatial and temporal distribution of green forage biomass on the fence reindeer herding area (7.48 thousand ha) in Tazovsky District of Yamal-Nenets Autonomous Region. Reducing the image resolution (from 10 m for Sentinel-2 to 250 m for MODIS) significantly changed the structure of the stock distribution profile (the narrowing of low and high values in the mixing pixels to diapasons of average values). We observed a significant correlation between the models (Pearson's correlation is 0.60; Spearman's is 0.53, $n = 850$, $p < 0.001$) at the level of equally sized pixels (Sentinel generalized to MODIS). The greatest differences in the low and high values were noted for the Sentinel data set. Stock characteristics showed a higher degree of convergence ($r^2 = 0.92$; $n = 65$, $p < 0.001$) between models for averaged data of individual economic-geobotanical contours. The MODIS data model was extrapolated to all tundra zone pastures. Herbaceous communities formed in the place of downed lakes (hasyreys) were differentiated by the time of their formation with a comparison of Landsat images of different years (1973–2014). The possibility of artificial extension of summer grazing areas was noted by the drainage of lakes cascades. Plots with downed lakes formed from 16.1 % (according to MODIS) to 20.0 % (Sentinel) of the total gross stock of green forage having a total area of 11.1 % of the coverage. The average values of the stock of green forage of hasyreys plots were varying from 10.2 to 15.4 quintal per hectare. The calculated indicators of vegetation resources distribution and reindeer capacity can be involved in the correction of intensity of traditional land use to change the environment.

Keywords: vegetation green forage, biomass modeling, Tazovsky District of Yamal-Nenets Autonomous Region, remote sensing methods, MODIS and Sentinel images, thermokarst lakes

Accepted: 26.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-155-168

References

1. Anisimov O. A., Zhiltcova Ye. L., Razzhivin V. Yu., Predictive modeling of plant productivity in the Russian Arctic using satellite data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, Vol. 51, Issue 9, pp. 1051–1059, DOI: 10.1134/S0001433815090042.
2. Bazilevich N. I., *Biologicheskaya produktivnost' ekosistem Severnoi Evrazii* (The biological productivity of ecosystems in Northern Eurasia), Moscow: Nauka, 1993, 295 p. (in Russian).
3. Bryksina N. A., *Nauchno-metodicheskie osnovy primeneniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya pri issledovanii dinamiki termokarstovykh landshaftov Zapadno-Sibirskoi ravniny: Diss. kand. geogr. nauk* (The scientific and methodological basis of remote sensing data application in studying the dynamics of thermokarst landscapes of the West Siberian Plain, Cand. geogr. sci. thesis), Khanty-Mansiisk, 2011, 192 p. (in Russian).
4. *Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation*, Moscow: Roshydromet, 2014, 1007 p.
5. Golovko T. K., Tabalenkova G. N., Dymova O. V., Pigment apparatus of subpolar Ural plants, *Botanicheskii zhurnal*, 2007, Vol. 92, No. 11, pp. 1732–1740 (in Russian).
6. Desyatkin R. V., *Pochvoobrazovanie v termokarstovykh kotlovinakh-alasakh kriolitozony: Diss. dokt. biol. nauk* (The soil formation in thermokarst pits-alas of the cryolithic zone, Doct. biol. sci. thesis), Ulan-Ude, 2006, 396 p. (in Russian).
7. Desyatkin R. V., Desyatkina L. I., Dynamics of productivity of alas grasslands, In: *Problemy severnogo zemledeliya: selektsiya, kormoproizvodstvo, ekologiya* (Problems of northern farming: breeding, fodder production, ecology), Novosibirsk: SO RASKhN, 2000, pp. 157–163 (in Russian).
8. Elsakov V. V., *Akkumulyatsiya azota i ugleroda nadzemnoi massoi rastenii v soobshchestvakh Bol'shezemel'skoi tundry* (The nitrogen and carbon accumulation by aboveground plant mass in Bolshezemelskaya tundra communities), Syktyvkar: Komi scientific center UrB RAS, 2003, No. 461, 28 p. (in Russian).

9. Elsakov V.V., Use of the Satellite Data in Chlorophyll Index Investigation at Tundra Communities, *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 1, pp. 60–70 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961413010016.
10. Elsakov V.V., *Tekhnologiya resursnoi otsenki pastbishchnykh ugodii severnogo olenya po spektrozonal'nym sputnikovym dannym* (Technology for resource assessment of reindeer rangelands using spectrozonal satellite data), Patent RU 2521755, Reg. 10.07.2014 (in Russian).
11. Elsakov V.V., Spatial and interannual heterogeneity of changes in the vegetation of Eurasian tundra: Analysis of 2000–2016 MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 56–72 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-56-72.
12. Elsakov V.V., Marushchak I. O., The inter-year changes in thermokarst lakes of North-East Part European Russia, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 5, pp. 45–57 (in Russian).
13. Elsakov V.V., Shchanov V.M., Current changes in vegetation cover of Timan tundra reindeer pastures from analysis of satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 128–142 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-128-142.
14. Elsakov V.V., Shchanov V.M., Polikarpova N.V., Analysis of projective cover and biomass storage of epigeous lichens in vegetation cover of Pasvik Nature Reserve, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 72–83 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-72-83.
15. Elkina G. Ya., Lapteva E. M., The macronutrient reserves in shrub-lichen-moss tundra, *2-ya Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya "Bioraznoobrazie ekosistem Krainego Severa: inventarizatsiya, monitoring, okhrana"* (Biodiversity of the Far North ecosystems: inventory, monitoring, protection: Proc. Conf.), Syktyvkar, 3–7 June 2013, Syktyvkar, 2013, pp. 48–53 (in Russian).
16. Kravtsova V.I., Rodionova T.V., Investigation of the dynamics in area and number of thermokarst lakes in various regions of Russian cryolithozone, using satellite images, *Kriosfera Zemli*, 2016, Vol. 20, No. 1, pp. 81–89 (in Russian).
17. *Metodicheskie rekomendatsii po kompleksnomu obsledovaniyu, otsenke i ispol'zovaniyu zemel' raionov severnogo olenevodstva, vklyuchaya territorii traditsionnogo prirodopol'zovaniya korennykh malochislennykh narodov Severa, Sibiri i Dal'nego Vostoka Rossiiskoi Federatsii* (The methodological recommendations for comprehensive survey, assessment and use of land in the areas of northern reindeer husbandry, including territories of traditional nature use of indigenous small-numbered peoples of the North, Siberia and the Far East of the Russian Federation), V.I. Kurakin (ed.), Moscow: APR, 2017, 268 p. (in Russian).
18. Mukhachev A.D., A geobotanist devoted to the far north, In: *Traditsionnoe prirodopol'zovanie i nauchnoe obespechenie APK na krainem severe* (Traditional nature management and scientific support of the agroindustrial complex in the far north), Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2012, pp. 157–163 (in Russian).
19. Polishchuk V. Yu., Polishchuk Yu. M., *Geoimitatsionnoe modelirovanie polei termokarstovykh ozer v zonakh merzloty* (The geo-simulation modeling of thermokarst lake fields in permafrost zones), Khanty-Mansiisk: YuGU, 2013, 128 p. (in Russian).
20. *Senokosy i pastbishcha* (Haylands and pastures), Larin I.V. (ed.), Leningrad: Kolos, 1969, 704 p. (in Russian).
21. Sorochinskaya D.A., Leonova N.B., The structure and distribution of aboveground phytomass in tundra communities of Western Siberia, *Ekosistemy: ekologiya i dinamika*, 2020, Vol. 4, No. 3, pp. 5–33 (in Russian), DOI: 10.24411/2542-2006-2020-10063.
22. Syrovatskii D.I., *Organizatsiya i ekonomika olenevodcheskogo proizvodstva* (The organization and economics of reindeer husbandry), Yakutsk: Institut problem malochislennykh narodov Severa, 2000, 407 p. (in Russian).
23. Sherstyukov A.B., *Izmeneniya klimata i ikh posledstviya v zone mnogoletnei merzloty Rossii* (The climate change and its consequences in the permafrost zone of Russia), Obninsk: GU VNIIGMI-MTsD, 2009, 127 p. (in Russian).
24. Shchelkunova R.P., The zonal distribution of forage phytomass in the Taimyr, *Botanicheskii zhurnal*, 1982, Vol. 67, pp. 479–492 (in Russian).
25. Yanchenko Z.A., Filatova S.N., Fodder value of cervine pastures of a left bank of the Yenisei River, *Genetika i razvedenie zhivotnykh*, 2018, No. 1, pp. 54–59 (in Russian), DOI: 10.31043/2410-2733-2018-1-54-59.
26. Kaverin D.A., Melnichuk E.B., Shiklomanov N.I., Kakunov N.B., Pastukhov A.V., Shiklomanov A.N., Long-term changes in the ground thermal regime of artificially drained thaw-lake basin in the Russian European north, *Permafrost and Periglac Process*, 2018, Vol. 29, pp. 49–59, DOI: 10.1002/ppp.1963.
27. Shiryaev A.G., Moiseev P.A., Peintner U., Devi N.M., Kukarskih V.V., Elsakov V.V., Arctic greening caused by warming contributes to compositional changes of mycobiota at the Polar Urals, *Forests*, 2019, No. 10, 24 p., <https://doi.org/10.3390/f10121112>.
28. Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D., Disappearing arctic lakes, *Science*, 2005, Vol. 308, Issue 5727, Art. No. 1429, DOI: 10.1126/science.1108142.