Современные изменения растительного покрова пастбищ северного оленя Тиманской тундры по результатам анализа данных спутниковой съёмки

В. В. Елсаков, В. М. Щанов

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

Анализ изменений растительного покрова территории Тиманской тундры (европейский северо-восток России) выполнен с привлечением материалов многозональной спутниковой съёмки Landsat и MODIS для временного периода 1985–2016 гг. и полевых наблюдений 2017–2018 гг. Участки плоскогорий Северного Тимана (порядка 164,7 тыс. га) характеризуются наиболее интенсивной трансформацией фитоценозов в регионе. Рост вегетационного индекса NDVI в течение последних десятилетий демонстрирует возможности для увеличения поголовья оленеводческими хозяйствами региона. Отмечено увеличение показателей оленеёмкости по зелёным кормам (линейно связаны с NDVI) в период с 1985 по 2009 г. для плоскогорий в среднем на 29 %, для прилегающих участков — на 15 %. После 2007 г. изменения стабилизировались. Тренды межгодовых изменений NDVI подтверждены комбинированием материалов съёмки среднего пространственного разрешения MODIS и высокого — Landsat-5, -7 для одних интервалов лет. Значения рассчитанных линейных трендов изменений NDVI (β) по материалам съёмки разных сенсоров имеют эквивалентные величины размерностей, между ними установлена значимая положительная корреляция ($r = 0{,}72$, $p \leqslant 0{,}05$). Предложена методика перевода значений NDVI в величины хлорофильного индекса (ХИ) и надземной зелёной фитомассы по разносезонным изображениям. Для исследованного региона за период с 2000 по 2009 г. отмечен рост запасов хлорофилла в фитоценозах на 152 т, что в пересчёте на сухую зелёную фитомассу ерника и кустарничков составило рост в среднем на 1,85 ц/га. Максимальные изменения отмечены в сообществах мелкоерниковой лишайниковой тундры (рост ХИ на 1,26 кг/га, сухой зелёной фитомассы на 2,51 ц/га). Основные факторы, определившие изменения растительных сообществ, — это рост температуры приземного воздуха, фиксируемый с 2000 г. в осенне-зимний период, и количество выпавших осадков в зимнее время. Дополнительно на показатель повлияло существенное снижение нагрузки на растительные сообщества пастбищного оленеводства в связи с переходом на новую систему хозяйствования (ликвидация бытового семейного кочевания, сменный (оседлый) образ жизни) и последующим двукратным снижением численности поголовья.

Ключевые слова: спутниковые методы исследований, тундры Северного Тимана, оленьи пастбища

Одобрена к печати: 20.02.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-128-142

Введение

Анализ межгодового хода индекса NDVI по временным композитам съёмки MODIS (MOD13Q1.005) выявил основные тренды трансформации фитоценозов тундровой зоны севера Евразии за отдельные периоды 2000–2016 гг. (Елсаков, 2017). Начало наблюдений радиометра MODIS совпадает с фазами роста показателей приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и количества выпавших осадков (КВО) на территории тундр европейской территории России (ЕТР), поэтому временные ряды этих изображений становятся важными индикаторами процессов глобальных перестроек экосистем на региональном уровне, раскрывают основные тренды изменений продуктивности фитоценозов. Однако для составления корректных прогнозных и ретроспективных оценок трансформации растительного покрова необходим анализ корректности фиксируемых изменений с привлечением массива различных данных. Для подтверждения выявленных изменений привлекаются материалы полевых инструментальных исследований, временные серии снимков более высокого пространственного разрешения, но выполненные в схожих спектральных диапазонах

и временных интервалах. В этом отношении наиболее корректные результаты получены при сопоставлении временных серий Landsat (30 м) и MODIS (250 м) с достаточно близкими диапазонами спектральных значений в каналах NIR и RED, приведённые к величинам коэффициента спектральной яркости. Наличие и достоверность отмеченных изменений фитоценозов ранее была показана для территорий Мезенской и Канинской тундр (Елсаков, 2014а), Приполярного Урала (Марущак, Елсаков, 2010), Югорского п-ва (Елсаков, Кулюгина, 2014).

Важным прикладным значением анализа растительного покрова территории и его изменений с привлечением спутниковых данных является возможность оценки состояния и трендов трансформации пастбищ. Площадь оленьих пастбищ, выделяемых в разных категориях земель и земельных угодьях на территории России, оценивается в 335 млн га, из них большая часть (321 млн га) сосредоточена именно в труднодоступных районах тундры и лесотундры (Сенокосы..., 1969). Использование спутниковых спектрозональных съёмок демонстрирует хорошие возможности в выполнении такой оценки (Елсаков, 2014б), что отражено в проведении землеустроительных мероприятий оленеводческих хозяйств Мурманской области, Ненецкого автономного округа и Республики Коми в 2012–2018 гг.

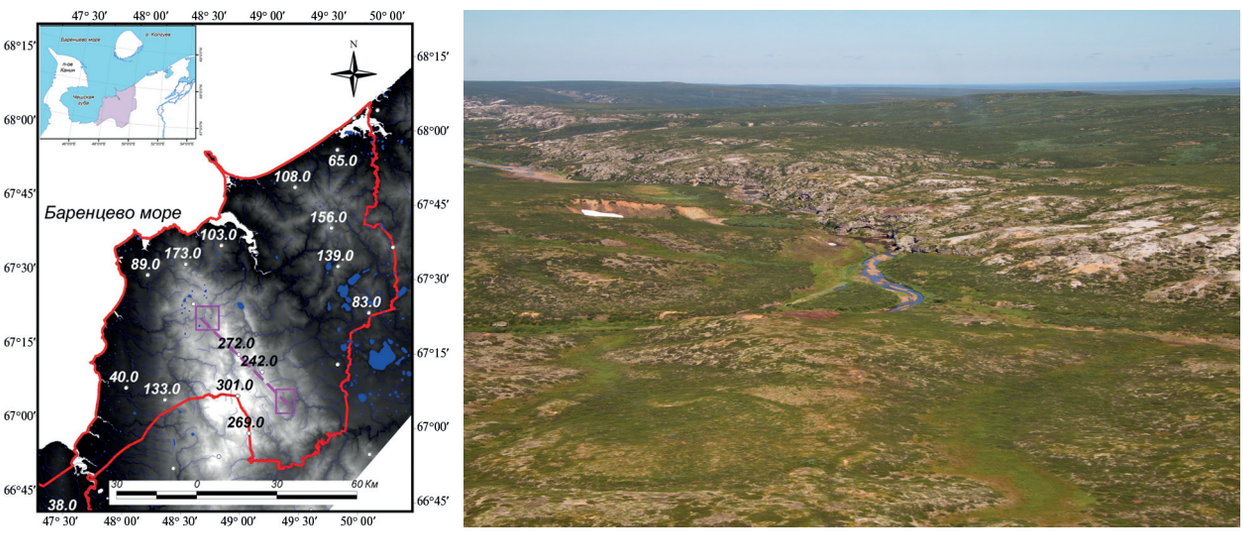
Цель настоящей работы — охарактеризовать современное состояние растительного покрова оленьих пастбищ тундровых ландшафтов Северного Тимана и проанализировать его изменения за последние десятилетия. Предварительный анализ съёмки MODIS за период 2000–2009 гг. показал достоверные тренды ($p < 0{,}05$, $n = 10$) интенсивного роста значений индекса NDVI; экосистемы региона демонстрируют наличие наиболее существенных изменений характеристик растительности в пределах тундровой зоны ЕТР (Елсаков, 2017). Сравнение детальных геоботанических описаний территории, выполненных А. А. Дедовым в период 1928–1937 гг. и опубликованных позднее сотрудниками Института биологии Коми НЦ УрО РАН (Дедов, 2006), с современными наблюдениями выявило устойчивость и трансформацию ценотических характеристик различных сообществ. Привлечение спутниковых методов для инвентаризации биологических ресурсов пастбищ ряда оленеводческих хозяйств позволило расширить возможности для индикации трендов изменений растительного покрова региона.

Методика выполнения работы

Долготные границы обследованного в работе участка, включающего экосистемы Тиманской тундры, проведены по руслам рек Индига и Пёша. Большая часть территории используется под выпас оленей хозяйствами сельскохозяйственного производственного кооператива (СПК) «Индига» (66,9 % территории) и СПК РК «Заполярье» (33,1 %). Характерные формы рельефа территории — многочисленные конечно-моренные сопки и гряды (хребты) с высотами в центральной части до 250–300 м, ориентированные в направлении юг-юго-восток – север-северо-запад (*рис. 1*, см. с. 130). Ландшафты горного участка формируют денудированные кряжи Северного Тимана, составленные из системы четырёх параллельных горных цепей и разделённые широкими и глубокими продольными долинами. В ходе маршрутных наземных и аэровизуальных (пролёты галсами вертолётом Robinson R66) обследований пастбищ СПК «Индига» в 2017–2018 гг. собраны материалы для выполнения управляемой классификации изображений Landsat (совместное использование снимков за 02.07.2013, 19.07.2013 и 19.09.2016). Для проверки результатов реализованной модели расчёта зелёной фитомассы сделаны шесть укосов запасов фитомассы с площадок 0,2×0,2 м из доминирующих сообществ участка (кустарничковая и мелкоерниковая-лишайниковая тундра).

Общие тренды изменений растительного покрова региона установлены по результатам обработки максимальных для каждого года наблюдений значений индекса NDVI для периода 2000–2016 гг. (тренд линейных изменений (β), $\Delta NDVI_{MAX} \cdot год^{-1}$) по съёмке MODIS (Елсаков, 2017). Проверку полученных по MODIS результатов выполняли по изображениям Landsat-5, -7 для дат 28.07.1985, 29.07.2000, 18.07.2007 и 30.7.2009. Для расчёта значений индекса использовали величины коэффициентов спектральной яркости (Spectral Reflectance,

SRefl) после предварительной атмосферной коррекции изображений. Использование SRefl минимизировало ошибки, вызванные различиями сенсоров (TM, ETM+, OLI) и временем съёмки. Наименее изменяющиеся в течение сезона участки (песчаные раздувы — яреи, приморские песчаные пляжи) обладали слабым устойчивым ростом величин NDVI на изображениях разных лет (для периода 1985–2000 гг. — в среднем на 3,0 %, или 0,2 %·год$^{-1}$, для 2000–2007 гг. — на 15,3 %, или 2,1 %·год$^{-1}$, и для 2007–2009 гг. — на 3,8 %, или 1,3 %·год$^{-1}$). Основные участки трансформаций, время их наступления и наиболее изменённые сообщества выявлены сравнением итогов расчёта изменений NDVI по временным сериям MODIS и Landsat, а также привлечением результатов тематической классификации.



а *б*

Рис. 1. Орографическая структура района работ по спутниковой ЦМР (www.viewfinderpanoramas.org/) (разрешение 90 м) (*а*). В градациях серого представлена абсолютная высота (м н. у. м.); отмечены маршруты аэровизуальных наблюдений и участки полевых работ (фиолетовый цвет), границы хозяйства СПК «Индига» (красная линия). Вид на одну из гряд Северного Тимана (аэровизуальные наблюдения) (*б*)

Распределение запасов фитомассы по снимкам Landsat NDVI рассчитывали в несколько этапов. Во-первых, по изображениям середины (30.07.2009) и конца (19.09.2016)* вегетационного периода вычисляли долю участия растений разных кормовых групп (зелёные корма, мхи, лишайники) в формировании общей фитомассы сообществ. Результаты межгодовых сравнений максимальных величин индекса в летние периоды продемонстрировали, что на участке исследований после 2007 г. значения данного показателя не имели заметных изменений. Для анализа сезонной вариабельности фитомассы возможно привлечение изображений разных лет. Фитоценозы с доминированием зелёных кормов (травянистые растения, большинство кустарничков, ерник, ивы) отличались большими сезонными изменениями NDVI, демонстрировали значительное снижение индекса на осенней съёмке. В сообществах с преобладанием вечнозелёных растений, мхов и лишайников сезонные изменения выражены слабее (*рис. 2а*). Анализ графического отображения распределения величин индекса NDVI, построенных по летнему и осеннему изображениям, показал, что 95 % точек облака рассеивания ограничено осями, проходящими через экстремальные значения наиболее сезонно стабильных (OA_1 — диагональ вида $y = x$, где $NDVI_{30.07.2009} = NDVI_{19.09.2016}$) и сезонно вариабельных (OA_3) фитоценозов. Результаты тематического картографирования растительного покрова подтверждают приуроченность отдельных классов, «контрастных» по соотношению

* Для 2016 г. использовали данные Landsat-8 OLI, приведённые к величинам коэффициентов спектральной яркости (http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf).

сезонных изменений зелёной фитомассы, к определённым участкам в облаке рассеивания (обозначены № 1–5). Приближены к оси OA_1 участки с наиболее стабильными по признаку сезонных изменений фитомассы классов: части песчаных раздувов (разреженная псаммофитная растительность), лишайниковые тундры и кустарничково-моховые болота. Выше оси локализованы лишь области облака рассеивания, связанные с комплексами болотных сообществ, имеющих рост индекса в осенний период. Отмечено (Шпак, 2008), что виды мхов болотных сообществ, часто ведущих погруженный или полупогруженный образ жизни, при летнем снижении уровня вод иссушаются, испытывают депрессию фотосинтеза и большую часть жаркого лета находятся в вынужденном покое. Данный период сезонно совпадает с максимальным развитием фитомассы сосудистых растений наземных фитоценозов. В осеннее время обводнение местообитаний активирует их фотосинтетическую активность, что приводит к росту величин NDVI. Сообщества с максимальными сезонными изменениями индекса (ивняки, травянистые и др.) расположены вдоль оси OA_3. Ниже оси локализована лишь часть облака рассеивания, составленная фитоценозами на затенённых в осенний период склонах. Увеличение расстояния от точки до пересечения осей (OA_2) косвенно характеризует рост суммарного запаса зелёной фитомассы. Минимальные величины отмечены для территорий, лишённых растительного покрова или имеющих разреженную растительность (класс № 5). Удалённость точек облака рассеивания (классов растительного покрова) от осей OA_1 и OA_3 характеризует интенсивность сезонных изменений фитоценозов или их стабильность, что отражается на структурных изменениях фитоценозов. Например, смещение «ядра» класса «ивняки разнотравные» (см. № 1 на *рис. 2а*, см. с. 132) к оси OA_1 демонстрирует рост участия мхов в напочвенном покрове, к оси OA_3 — травянистых растений. Отношение длины перпендикуляров, проведённых из отдельных элементов изображения на оси (A_1A_2 и A_2A_3), к их сумме использовали для расчёта (нормированная сумма) сезонно «изменяющихся» и «стабильных» долей компонент растений разных кормовых групп (%).

Составление цветного композита по трём рассчитанным показателям (A_1A_2, A_2A_3 и OA_2) (*рис. 2б*) позволило оценить распределение кормовых участков по сезонам выпаса: участки с доминированием «стабильных» фракций содержали в запасе преимущественно мхи и лишайники (зимний сезон) с преобладанием «малоизменчивых» (кустарнички и мхи (поздне-, раннеосенний и весенний сезоны)) и «изменчивых» (травянистые и кустарники (летний сезон)) фракций. Для плоскогорий Северного Тимана основной запас фитомассы формирует зелёная масса кустарничков и ерника («изменчивая») и напочвенный мохово-лишайниковый покров («стабильная»). Полученные доли характеризуют участие различных групп кормов в формировании суммарного показателя NDVI.

Во-вторых, проводили анализ распределения зелёной биомассы растений в пределах территории на основании связи спектральных величин, характеристик проективного содержания хлорофилла и концентрации пигментов в растениях. Использование ранее полученного отношения (Елсаков, 2013):

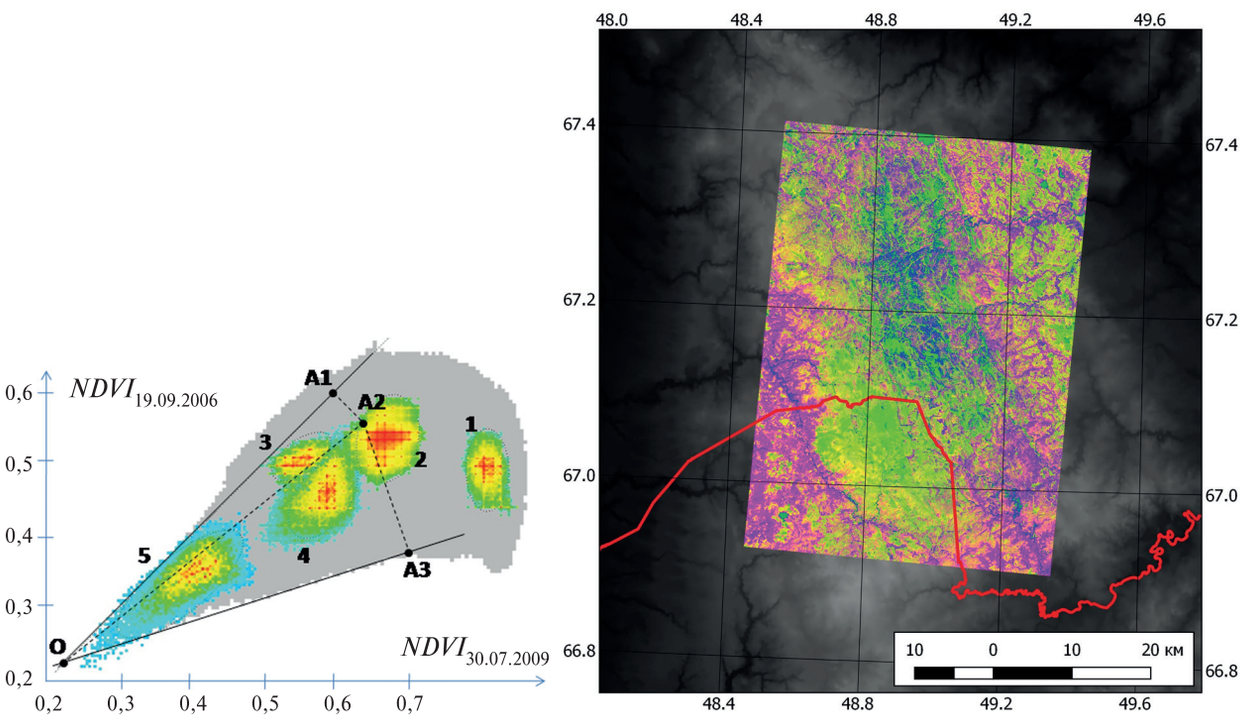
$$\text{ХИ} = 24{,}0\ \text{NDVI} - 5{,}1;\ n = 8;\ r^2 = 0{,}86;\ p = 0{,}01, \quad (1)$$

где ХИ — проективное содержание хлорофилла на единицу площади (хлорофильный индекс, кг/га), позволило перейти от величин безразмерного спектрального показателя к количественной оценке запасов фитомассы. Суммарное значение ХИ определяется участием зелёной фитомассы растений разных жизненных форм и концентрацией в них пигментов (прежде всего хлорофилла):

$$\text{ХИ}_{Ph} = \sum(P_{Ph}c), \quad (2)$$

где P_{Ph} — рассчитываемая доля автотрофных органов (зелёная фитомасса) для отдельных жизненных форм растений на единице площади; c — средняя концентрация хлорофилла в органах растений. Содержание хлорофиллов варьировало в кустарничках в диапазоне от 2,30±0,05 мг/г (*Arctous alpina*) до 2,50±0,09 мг/г (*Empetrum hermaphroditum*) сухой массы, в листьях ерника и ив — в пределах 5,10±0,20 мг/г сухой массы, мхов — 1,46–2,66 мг/г (Головко и др., 2010). Концентрация хлорофиллов в талломах лишайников (Елсаков,

2013) имела более низкие показатели: от 0,06±0,01 мг/г сухой массы у *Flavocetraria nivalis* до 0,11±0,02 мг/г — у *Cladonia rangiferina*. При среднем запасе зелёной массы по сделанным укосам для ерника (152,5±46,0 г/м^2) и кустарничков (285,7±63,0 г/м^2) показатели ХИ составили 0,78 г/м^2 и 0,66 г/м^2 соответственно. Лишайники не оказывали существенного влияния на изменение спектральных характеристик фитоценозов в связи с низкой концентрацией пигментов в талломах и низким запасом (ниже 100 мг/м^2). Даже на участках горных тундр Кольского п-ва с отсутствием пастбищной нагрузки (заповедник «Пасвик») наиболее высокие величины содержания ХИ в лишайниковых сообществах с максимально сформированными лишайниковыми матами (масса до 1,5–1,8 кг/м^2) составило всего 0,16–0,19 г/м^2. Поэтому «стабильная» фракция представлена мхами и вечнозелёными видами кустарничков и травянистых растений. Полученные данные позволили рассчитать запасы зелёной фитомассы растений отдельных кормовых групп в пределах исследованной территории, а также показатели оленеёмкости хозяйственных контуров (Методические..., 2017) и были привлечены для составления проектов использования пастбищ.



а *б*

Рис. 2. Распределение доминирующих классов в осях разносезонных значений индекса NDVI (*а*). Использованы 95 % элементов изображения (серый фон), исключены «водные» пиксели. Цветом показаны плотности распределения отдельных классов. Цифрами отмечены участки, представленные «ядрами» классов: 1 — ивняки разнотравные, 2 — кустарничково-мохово-лишайниковая тундра, 3 — кустарничково-моховые болота, 4 — мелкоерниковая лишайниковая тундра, 5 — участки песчаных обнажений (яреи), гольцы. RGB-синтез рассчитанных показателей (*б*): красный — запас фитомассы (OA_2), зелёный — сезонная «стабильность» (A_1A_2), синий — сезонная «изменчивость» (A_2A_3). В качестве фона использована ЦМР

Анализ влияния климатических флуктуаций последних лет на формирование характеристик растительного покрова выполнен сопоставлением результатов обработки материалов спутниковых съёмок с данными наблюдений метеорологической станции «Индига» (67°39° с. ш., 49°2° в. д.) за временной интервал 1990–2017 гг. Источниками данных служили сайты ВНИИГМИ-МЦД (meteo.ru) и «Расписание погоды» (rp5.ru). Для рядов наблюдений рассчитывали значения отклонений декадных значений от усреднённых величин ПТВ и КВО за весь временной период.

Результаты и их обсуждение

Распределение запасов зелёной фитомассы по материалам съёмок

Для территории рассмотренных оленеводческих хозяйств выделен 21 класс земной поверхности и растительного покрова. На верхних частях и склонах кряжей Северного Тимана (на площади 164,7 тыс. га) наибольшие площади (до 59,2 % территории) представлены комбинациями мелкоерниковой лишайниковой (49,7 %) и кустарничково-лишайниковой (9,5 %) тундр. У подножий склоновых участков сконцентрированы: ивняки (28,6 %), кустарниковые моховые тундры (4,4 %) и болотные комплексы (3,1 %). Анализ корректности выполненной классификации растрового спутникового изображения по материалам полевых описаний демонстрирует хороший уровень сходимости: общая сходимость тематической карты распределения доминирующих классов растительного покрова составила 61,5 %, каппа — 57,7 % (n = 38 описаний) (*рис. 3б*). На долю лишённых растительного покрова участков (яреи, выходы скальных пород, пляжи) и водных поверхностей приходятся незначительные площади (0,5 и 1,44 % соответственно).

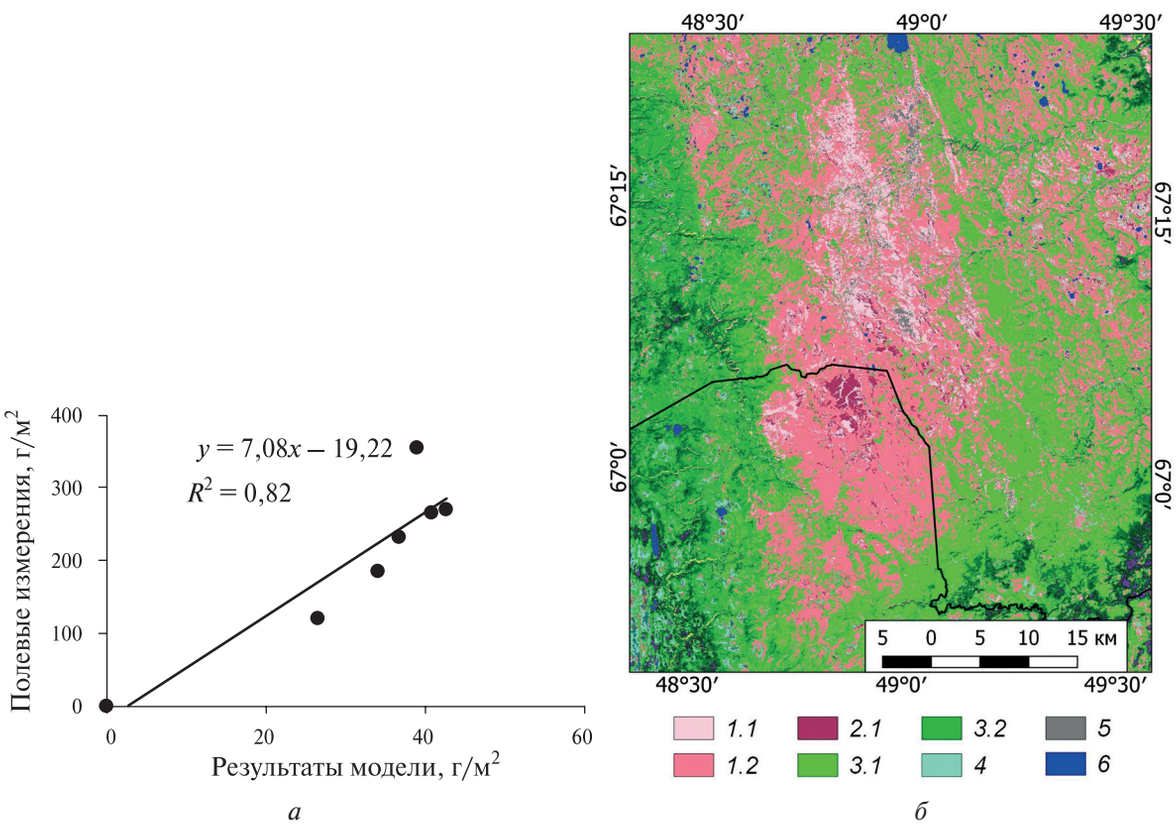


Рис. 3. Сопоставление результатов использования модели и полевых наблюдений для мелкоерникового и кустарничково-лишайникового сообществ (*а*). Фрагмент геоботанической карты территории Северного Тимана (использованы съёмки Landsat за 02.07.2013, 19.07.2014 и 19.09.2016) (*б*). Представлены доминирующие классы: 1.1 — кустарничково-мохово-лишайниковая тундра; 1.2 — мелкоерниковая лишайниковая тундра; 2.1 — кустарничково-моховые; 3.1 — ерники моховые; 3.2 — ивняки травяные; 4 — болотные комплексы; 5 — останцы, каменистые россыпи, пески; 6 — водные поверхности. Отмечена граница между оленеводческими хозяйствами

Средние значения фитомассы, рассчитанные моделью для доминирующих групп фитоценозов, варьировали для группы «изменчивых» компонент (зелёных кормов) в пределах выделенных классов в диапазоне 9,8–123,7 г/м^2 (*таблица*). Наибольший запас зелёных кормов отмечен для класса ивняков, при этом полученные величины достаточно близки

к отмеченным в литературе: максимальные запасы зелёных кормов в тундрах ЕТР в зарослях ив на высоте до 1,5 м составляют до 250–300 г/м^2 (Сенокосы..., 1969). В среднем надземная фитомасса ивняково-ерниково-осоково-мохового сообщества участка Паханчейской губы (Большеземельская тундра) варьировала в пределах 800–1424,5 г/м^2 (Лаптева и др., 2013). Различия в сравнении могут быть обусловлены включением в суммарный запас одревесневающих частей. В общей фитомассе сообществ с участием одревесневающих частей кустарников и кустарничков зелёные части растений составляют незначительную долю. Так, для одного из участков Большеземельской тундры в надземной биомассе ивняков зелёные части занимали лишь 21,0 %, в биомассе багульника — 35,3–45,3 %.

Характеристики средних значений запасов фитомассы
для участка Северного Тимана по результатам построенной модели

Классы сообществ	Показатели запаса для отдельных групп, г/м^2	
	сезонно изменчивые	сезонно стабильные
Кустарничково-мохово-лишайниковая тундра	74,1±26,8	213,1±57,1
Мелкоерниковая лишайниковая тундра	38,9±22,1	216,6±67,5
Кустарничково-моховые болотные комплексы	21,9±15,5	261,9±57,5
Ивняки разнотравные	123,7±37,5	69,5±66,5
Разреженная растительность песков, каменистых осыпей	9,8±1,4	–

Увеличить корректность результатов возможно за счёт привлечения результатов полевых сборов и последующей тщательной градуировки рассчитанных величин. Проверка построенной модели для Северного Тимана выполнена для доминирующих фитоценозов по участкам укосов. По прямым полевым измерениям в сообществах диапазон величин запаса зелёной фитомассы ерника для мелкоерниковой лишайниковой тундры составил 120–185 г/м^2 ($n = 3$) и кустарничков для кустарничково-лишайниковой тундры — 270–355 г/м^2 ($n = 3$). Высокая мозаичность почвенно-растительного покрова тундры и площадные различия сравниваемых участков (отношение площадей привлекаемых для верификации участков точечных полевых измерений (0,04 м^2) и использованных для экстраполяции пикселей Landsat (900 м^2) составляет 22,5 тыс. раз) затрудняют оценку корректности построенной модели. Анализ сходимости данных полевых измерений и результатов моделирования демонстрирует высокую корреляцию ($r^2 = 0,82$, $n = 6$, см. *рис. 3а*). Результаты обработки данных спутниковых съёмок в среднем занижали полевые показатели в 5–7 раз и далее корректировались по выявленной зависимости. Возможной причиной расхождений является излишнее выделение моделью биомассы мхов и лишайников, формирующих основную долю группы «сезонно стабильных» фракций (сравнение выполняли только по измеренным в полевых условиях автотрофным частям травянистых растений, низкорослых кустарников и кустарничков). Фракции «стабильных» классов (мхи, вечнозелёные кустарнички) формируют более высокий запас фотосинтетически активной фитомассы. Проверить корректность результатов в настоящее время сложно, однако величины в ряде случаев соответствуют значениям, приведённым в литературе: запас фитомассы осоково-мохового сообщества участка Паханчейской губы (Большеземельская тундра) составил 1462 г/м^2, из них 95 % приходилось на фракции мхов (Лаптева и др., 2013).

Межгодовые изменения растительного покрова по материалам съёмок MODIS и Landsat

Для временного периода 2000–2009 гг. по многолетнему ходу годовых максимумов NDVI съёмки MODIS на участке плоскогорий Тиманской тундры (160 тыс. га) установлено наличие значимого ($p \leqslant 0,01$, $n = 10$) роста показателя β ($\Delta NDVI_{MAX} \cdot год^{-1}$) (в среднем по участку $0,006 < \beta$)

(Елсаков, 2017) (см. *рис. 5а*). Наибольшие межгодовые изменения зафиксированы на участках мелкоерниковой лишайниковой тундры ($\beta = 8{,}8 \cdot 10^{-3}$), в меньшей степени — в ивняках разнотравных ($\beta = 2{,}8 \cdot 10^{-3}$). Для последующих лет наблюдений (2009–2016) существенных изменений показателя не отмечено.

Анализ изменений по изображениям более высокого пространственного разрешения Landsat-5, -7 и при увеличении интервала наблюдений выявил рост показателя уже для периода с 1985 по 2000 г. (*рис. 4*). Среднее значение индекса в 1985 г. для сообществ горных участков Северного Тимана составило 0,48, для прилегающих равнинных участков — 0,62. Для этого этапа средний рост индекса по участкам горных плато составил 13,0 %, или 0,87 %·год$^{-1}$. В последующие годы (2000–2007) интенсивность изменений возросла на 16,4 % при росте интенсивности трансформаций до 2,3 %·год$^{-1}$.

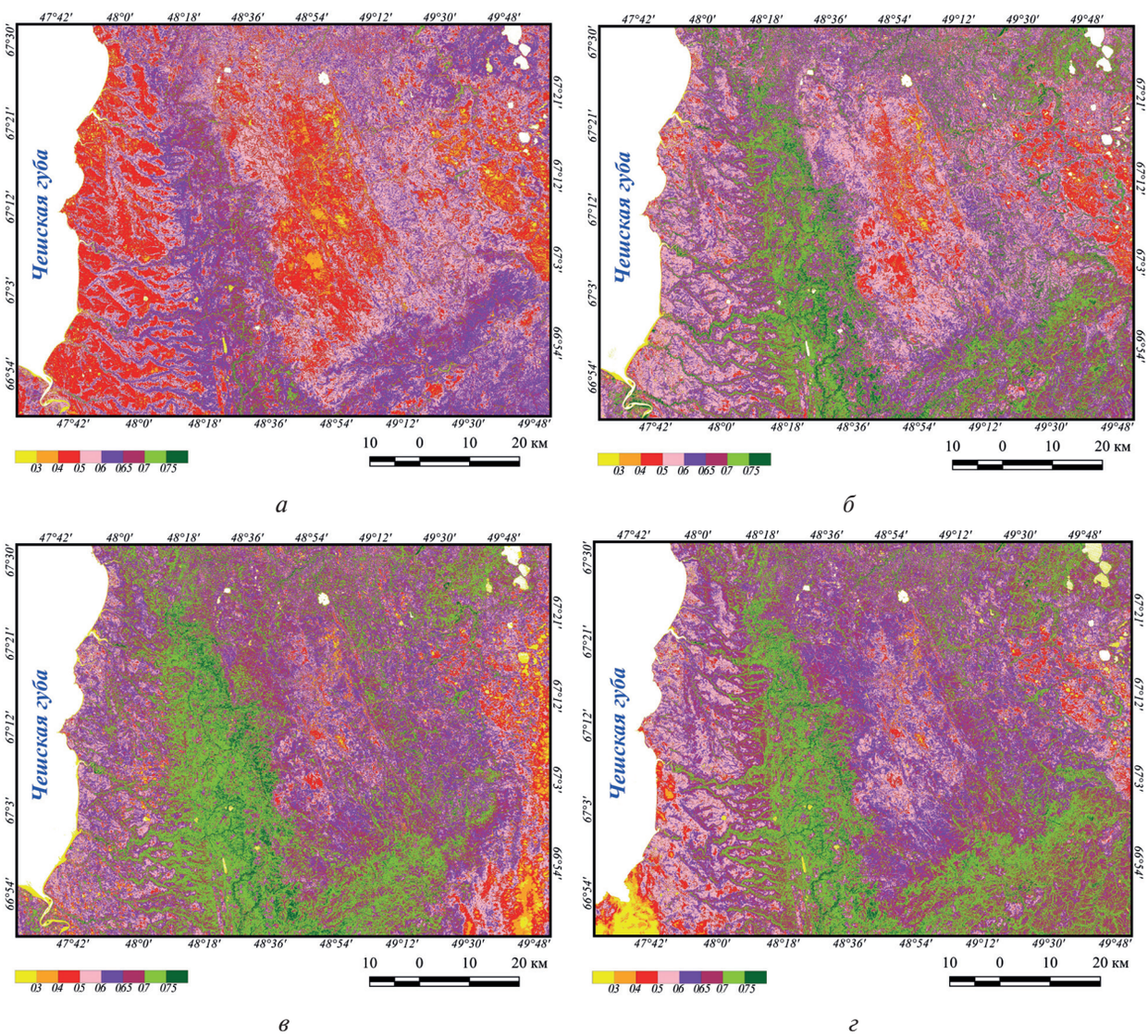
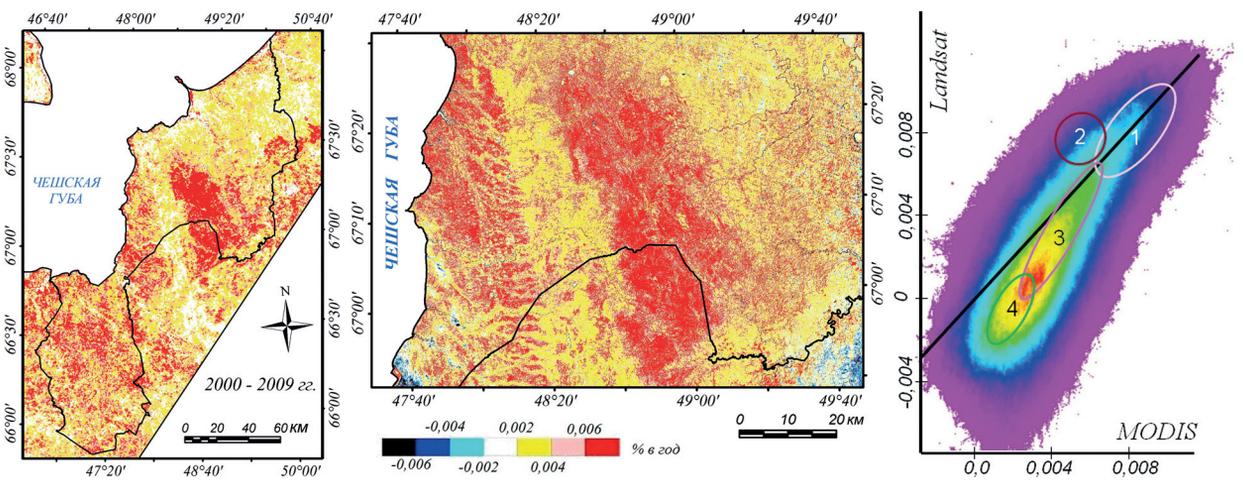


Рис. 4. Сравнительный анализ распределения значений индекса NDVI на участках Тиманской тундры в периоды максимального развития фитомассы: *а* — 28.07.1985, *б* — 29.07.2000, *в* — 18.07.2007, *г* — 30.07.2009. Съёмка Landsat-5 TM (*а*, *б*, *г*) и Landsat-7 ETM+ (*в*)

В 2007–2009 гг. увеличение показателя не выявлено. Характер изменений отличается на участках предгорной равнины западнее плоскогорий Тимана. Интенсивность роста индекса на данных территориях имела более высокие величины уже в период с 1985 по 2000 г. (рост на 11,8 % при интенсивности 0,78 %·год$^{-1}$), затем скорость прироста упала (3,37%, 0,48 %·год$^{-1}$).

В последующий период масштабных изменений не зафиксировано. Локализация контуров выявленных участков рассчитанных линейных трендов изменений NDVI (β) по материалам съёмки MODIS (2000–2009) и Landsat (2000–2007) для одних временных интервалов хорошо сопряжена пространственно (*рис. 5а*, *б*) и повторяет форму горных плато. Значения β, полученные разными сенсорами, имеют эквивалентные величины размерностей, для них (приведены к пространственному разрешению Landsat) установлена значимая положительная корреляция ($r = 0{,}72$, $p \leqslant 0{,}05$) (см. *рис. 5б*). Наибольшие изменения сравниваемых изображений Landsat и MODIS приходятся на участки с мелкоерниковой лишайниковой тундрой и кустарничково-моховыми болотами. Кустарничковые мохово-лишайниковые тундры с пятнами-медальонами характеризовались средним уровнем изменений, ивняки разнотравные отличались наиболее стабильными показателями.



а *б* *в*

Рис. 5. Тренды многолетних изменений хода годовых максимумов индекса NDVI на территории СПК «Индига» (для сопоставления показаны границы хозяйства) по данным спутниковой съёмки MODIS (MOD13Q1.005) за временной период 2000–2009 гг. (*а*). Изменения показателя β по изображениям съёмки Landsat 2000–2009 гг. (*б*). Цветовая шкала представлена в градациях показателя средней интенсивности изменений индекса за год (β). Распределение значений β по результатам обработки съёмки Landsat и MODIS (*в*). На рисунок вынесены доминирующие значения β для отдельных классов растительного покрова: 1 — мелкоерниковая-лишайниковая тундра, 2 — кустарничково-моховые болота, 3 — кустарничково-мохово-лишайниковая тундра, 4 — ивняки разнотравные (показана прямая $y = x$)

Рис. 6. Участки Тиманской кустарничково-лишайниковой тундры с максимальными трендами изменений NDVI периода 2000–2009 гг.

Аэровизуальные и полевые наблюдения на участках работ продемонстрировали, что рост надземной фитомассы и показателей ХИ в долинах и на склонах Северного Тимана связан преимущественно с быстрым развитием зелёной массы ерника и кустарничков (низкорослой карликовой берёзки, водяники, толокнянки альпийской) (*рис. 6*, см. с. 136). Слабое участие напочвенных лишайников в росте показателя за период наблюдаемых максимальных изменений обусловлен их крайне низким восстановительным потенциалом, медленным приростом талломов: до 7–13 % от имеющихся запасов биомассы в год (Абдульманова, Эктова, 2013). За период с 2000 по 2009 г. на территории Северного Тимана (порядка 164,7 тыс. га) отмечен рост запасов хлорофилла в фитоценозах (ХИ) на 152 т, что в пересчёте на сухую зелёную фитомассу ерника и кустарничков составило в среднем 1,85 ц/га. Максимальные изменения отмечены в мелкоерниковой лишайниковой тундре (рост ХИ на 1,26 кг/га, сухой зелёной фитомассы на 2,51 ц/га).

Предикторы возможных изменений растительного покрова Северного Тимана. Анализ климатических показателей

За период последних десятилетий экосистемы криолитозоны европейского северо-востока России (ЕС-ВР) демонстрируют наличие отчётливых трендов деградации многолетнемерзлых пород (ММП), инициированных ростом среднегодовых температур воздуха, годовых атмосферных осадков, мощности снежного покрова (Оберман, Шеслер, 2009). Значительные изменения в этот период затронули и природные комплексы Тиманской тундры. По материалам метеорологических наблюдений метеостанции «Индига», активный рост ПТВ отмечен после 2000 г. и приходится на вторую половину летнего и осенне-зимнего периодов (*рис. 7*). Среднее отклонение температуры, рассчитанное для отдельных декад в августе – ноябре 2005–2006 гг., составило 1–2 °С, для ноября – января — более 4 °С. В этот же период отмечен и рост КВО как в летний, так и зимний сезоны (до 6–8 мм). Отепляющее влияние толщины снежного покрова на температуру верхней кровли мёрзлых горизонтов достаточно подробно рассмотрено в литературе (Шаманова, 1970; Кононенко, 1986). Для тундр ЕС-ВР с «вялой, тёплой мерзлотой» (Астахов, Свенсен, 2011) рост значений ПТВ и КВО сказался существеннее, чем в восточных регионах Арктического сектора, где реликтовые ММП с более низкими температурами в меньшей степени изменили свои характеристики. Увеличение ПТВ на ЕС-ВР выступает предиктором роста продуктивности тундровых сообществ (Scott et al., 2005), климатогенные изменения годичной первичной продукции экосистем региона за период 1975–2004 гг. оценены в интервале от 5 до 10 % (Сиротенко, Абашина, 2008).

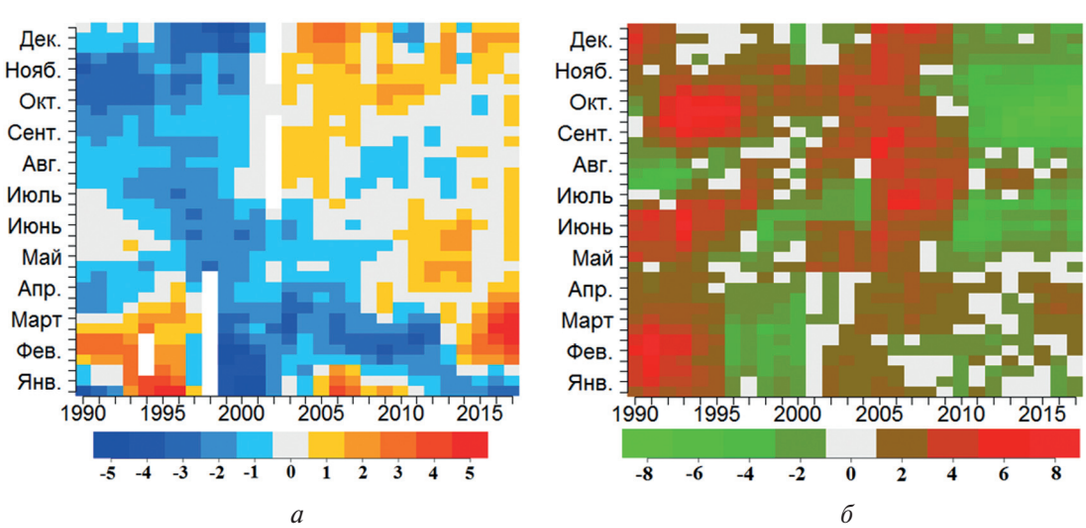


Рис. 7. Двумерные диаграммы аномалий декадного хода: *а* — приземной температуры воздуха (°С); *б* — количества выпавших осадков (мм) для метеостанции Индига за временной период 1990–2017 гг.

Анализ нагрузки выпаса

Участки Северного Тимана включают ранневесенние и летние пастбища северного оленя, растительные сообщества региона — продуценты преимущественно зелёных кормов. Величина пастбищной нагрузки является важным предиктором, влияющим на продуктивность фитоценозов и показатели NDVI на территории северных регионов. Примером значительной деградации растительного покрова пастбищ под влиянием чрезмерного выпаса является Ямальская тундра (Магомедова..., 2006). По данным АПК и ветеринарии Ненецкого автономного округа, на момент начала спутниковых исследований (1985) численность оленей в СПК «Индига» составила 16,1 тыс. голов. Исполняя постановление Ненецкого окружного исполкома от 1964 г. о переходе хозяйств на сменный выпас, оленеводы стали менять форму хозяйствования. К середине 1980-х гг. хозяйства территории перешли на сменный (оседлый) образ жизни, что на начальных этапах привело к росту экономических показателей (*рис. 8*), максимальная численность стада достигала 16,1–16,4 тыс. голов (середина 1990-х гг.). Однако ввиду оттока кадров (Вылко, 2014) было отмечено последующее его уменьшение до 8,2 тыс. голов в 1999 г. Снижение размеров оленьих стад к началу 2000-х гг. и ликвидация бытового семейного кочевания существенно уменьшили нагрузку на растительные фитоценозы территории, активизировали процессы демутационного восстановления растительного покрова. В настоящее время СПК «Индига» проводит выпас животных на площади 14,2 тыс. км^2 (по данным ООО «Мурманское землеустроительное предприятие», 1999 г.) или 11,1 тыс. км^2 (по данным Управления по АПК и ветеринарии НАО) при средней плотности животных на пастбищах 6,5–8,3 голов/тыс. га. В соседнем СПК «Заполярье» средняя численность животных варьирует от 4,2 до 7,0 голов/тыс. га (в хозяйствах Европейского Севера максимальные значения достигают 22,5 голов/тыс. га — в СПК «Оленевод», средняя по региону — 11,7 голов/тыс. га). Современная нагрузка выпаса на территории характеризуется как «слабая».

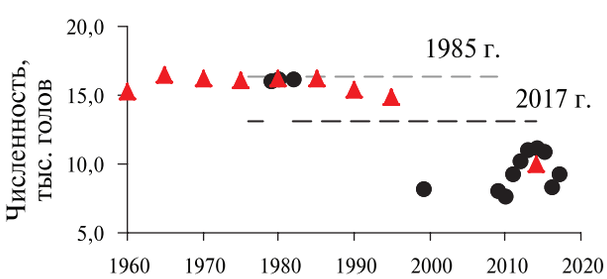


Рис. 8. Изменения численности стада СПК «Индига». Пунктирной линией показаны лимиты численности по проектам организации территории хозяйства для разных лет. Динамика поголовья приведена по статье (Вылко, 2014) (▲) и данным Управления по АПК и ветеринарии Ненецкого АО (•)

Материалы анализа распределения запасов фитомассы для различных фитоценозов территории позволили оценить пороговую оптимальную численность выпаса животных на территории СПК «Индига» в 11–13 тыс. голов, СПК «Заполярье» — в 5 тыс. голов.

Заключение

Синхронные по времени изменения фитоценозов в пределах крупных территориальных массивов Северного Тимана и на прилегающих к нему участках подтверждают формирующиеся тренды активно прогрессирующих перестроек компонентов Арктических экосистем, изменения мерзлотного режима почв и грунтов, демонстрируют наличие общих предикторов региональных изменений. Современный облик тундровых фитоценозов территории Тиманской тундры формируется под влиянием процессов, часто находящихся в антагонистических

отношениях и связанных с формированием биологической продукции компонентами растительного покрова и её потреблением развитой системой пастбищного оленеводства. В работе затронут временной период, в течение которого оба фактора за короткий временной интервал способствовали увеличению продуктивности фитоценозов. Почти двукратное сокращение численности выпасаемых животных (до 6,5–7,0 голов/тыс. га) и значимый рост температурных показателей и количества выпавших осадков привели к росту запасов прежде всего зелёных кормов. Различия во времени и интенсивности формирования ответной реакции растительных сообществ на двух крупных смежных территориях, расположенных в градиентах равнинных и горных условий, демонстрируют наличие специфичных особенностей ландшафтов в устойчивости к внешним воздействиям. Сильные положительные изменения индекса NDVI для участков Тиманской тундры начали формироваться в период с 1985 по 2000 г. Основные изменения затронули долинные ивняки равнинной части, а в 2000–2007 г. — растительные сообщества горных плато. На территории исследований рост величин NDVI, обусловленный восстановлением и развитием кустарничков и низкорослого ерника, наиболее интенсивно сформирован за 7-летний период. В целом для Субарктического региона выявленный тренд роста — исключение из общей картины изменений. Для большей части территории период последних десятилетий связан с ростом поголовья оленьих стад при сокращении пастбищных земель в результате их промышленного освоения. Прирост продуктивности фитоценозов, связанный с климатическими флуктуациями на таких территориях, компенсирован и нивелируется увеличением пастбищной нагрузки.

Разработанные алгоритмы позволили подойти к вопросу выполнения количественного анализа распределения запасов фитомассы растений разных жизненных форм в тундровых сообществах региона, что использовано в практических целях при подготовке проектов пастбищного использования земель отдельными оленеводческими хозяйствами. Анализ изменений запасов зелёной фитомассы в растительных сообществах Северного Тимана с 1985 по 2009 г. показывает восстановление потенциала для традиционного природопользования, увеличение показателей оленеёмкости по зелёным кормам в среднем на 29 %, для прилегающих участков — на 15 %.

Сходство формы контуров изменений и величины показателя β на изображениях сравниваемых сенсоров (MODIS и Landsat), полученных для одного временного интервала на примере участков Северного Тимана, подтверждает наличие выявленных ранее трансформаций растительного покрова и корректность установленных трендов на территории Севера Евразии (Елсаков, 2017). Полученные модели изменений могут быть использованы для разработки модели трансформации фитоценозов Арктического и Субарктического регионов.

Работа выполнена в рамках Комплексной программы фундаментальных научных исследований УрО РАН 2018–2020 гг. Подпрограмма Арктика. Проект № 18-9-4-5.

Литература

1. *Абдульманова С. Ю.*, *Эктова С. Н.* Соотношение прироста по высоте и по биомассе у кустистых лишайников // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 3(2). С. 688–691.
2. *Астахов В. И.*, *Свенсен Й. И.* Покровная формация финального плейстоцена на крайнем северо-востоке европейской России // Региональная геология и металлогения. 2011. № 47. С. 12–27.
3. *Вылко Ю. П.* Концептуальный подход к рациональному использованию оленьих пастбищ в Канинской, Тиманской и Малоземельской тундрах Ненецкого автономного округа // Электрон. науч. журн. «Universum: общественные науки». 2014. № 10–11(11). URL: http://7universum.com/ru/social/archive/item/1769.
4. Геоботаническое районирование Нечерноземья европейской части РСФСР / отв. ред. В. Д. Александрова, Т. К. Юрковская. Л.: Наука, 1989. 64 с.
5. *Головко Т. К.*, *Далькэ И. В.*, *Дымова О. В.*, *Захожий И. Г.*, *Табаленкова Г. Н.* Пигментный комплекс растений природной флоры европейского Северо-Востока // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2010. № 1. С. 39–46.

6. *Дедов А. А.* Растительность Малоземельской и Тиманской тундр. Сыктывкар: Ин-т биологии Коми НЦ УрО РАН, 2006. 160 с.
7. *Елсаков В. В.* Материалы спутниковых съемок в анализе значений хлорофилльного индекса тундровых фитоценозов // Исследование Земли из космоса. 2013. № 1. С. 60–70.
8. *Елсаков В. В.* (2014а) Визуализация данных климатических изменений растительных сообществ Мезенской и Канинской тундр по материалам спутниковых съемок // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 1. С. 83–86.
9. *Елсаков В. В.* (2014б) Технология ресурсной оценки пастбищных угодий северного оленя по спектрозональным спутниковым данным. Патент РФ 2521755. Рег. 10.07.2014.
10. *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.
11. *Елсаков В. В.*, *Кулюгина Е. Е.* Растительный покров Югорского полуострова в условиях климатических изменений последних десятилетий // Исследование Земли из космоса. 2014. № 3. С. 65–77.
12. *Кононенко А. В.* Гидротермический режим таежных и тундровых почв Европейского Северо-Востока. Л.: Наука, 1986. 145 с.
13. *Лаптева Е. М.*, *Русанова Г. В.*, *Каверин Д. А.*, *Пастухов А. В.*, *Холопов Ю. В.*, *Панюков А. Н.* Разнообразие и биопродуктивность почв Большеземельской тундры: зональные и ландшафтно-экологические аспекты // Материалы 2-й Всерос. конф. «Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана». Сыктывкар: Ин-т биологии Коми НЦ УрО РАН, 2013. С. 48–51.
14. *Магомедова М. А.*, *Морозова Л. М.*, *Эктова С. Н.*, *Ребристая О. В.*. *Чернядьева И. В.* *Потемкин А. Д.*, *Князев М. С.* Полуостров Ямал: растительный покров. Тюмень: Сити-пресс, 2006. 360 с.
15. *Марущак И. О.*, *Елсаков В. В.* Материалы спутникового мониторинга в анализе сомкнутости лесных фитоценозов Приполярного Урала // Вестн. Ин-та биологии Коми НЦ УрО РАН. 2010. № 6. С. 18–23.
16. *Оберман Н. Г.*, *Шеслер И. Г.* Современный прогноз изменений мерзлотных условий европейского северо-востока РФ // Проблемы Севера и Арктики РФ. Вып. 9. М.: Совет Федераций, 2009. С. 96–106.
17. Сенокосы и пастбища. Л.: Колос, 1969. 704 с.
18. *Шаманова И. И.* Влияние снега, растительного покрова и распашки на тепловое состояние грунтов в районе Воркуты // Материалы симп. «Биологические основы использования природы Севера». Сыктывкар: Коми кн. изд-во, 1970. С. 186–194.
19. *Шпак О. В.* Эколого-физиологическая характеристика некоторых видов мхов в Хибинах: автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2008. 20 с.

Current changes in vegetation cover of Timan tundra reindeer pastures from analysis of satellite data

V. V. Elsakov, V. M. Shchanov

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

The analysis of vegetation cover changes on the territory of the Timan tundra (the European North-East of Russia) was carried out using Landsat and MODIS satellite images of 1985–2016 and field observation data of 2017–2018. The Northern Timan highlands (about 164.7 thousand hectares) are characterized by a highly intensive transformation of phytocenosis in the region. The NDVI vegetation index growth reflects potentials for increasing of reindeer livestock at husbandries of the region. An increase in the reindeer-feeding capacity by green foodstuffs was detected in 1985–2009 by 29 % and by 15 % for adjacent areas. After 2007 changes have become stable. The NDVI interannual change trends were confirmed by a combination of mean-resolution MODIS and high-resolution Landsat-5 and 7 images for same year intervals. The values of NDVI change calculated linear trends (β) based on survey materials of different sensors had equivalent dimensions with a significant positive correlation

among them ($r = 0.72$, $p \leqslant 0.05$). The method of converting NDVI values into chlorophyll index values and aboveground green phytomass parameters by multi-seasonal images was developed. An increase of chlorophyll reserves was noticed in phytocenosis of the studied Timan region (by 152 tons) from 2000 to 2009, expressed as low shrub dry green phytomass (*Betula sp.*, *Arctous sp.*, and *Empetrum sp.*), that increased 1.85 quintals per hectare. The maximum changes were observed in communities of low shrub lichen tundra (chlorophyll content growth by 1.26 kg/ha, dry green phytomass by 2.51 quintals/ha). The main factors responsible for the changes in plant communities are surface air temperature rise since 2000 in the autumn-winter period and precipitation amount in the winter period. In addition, a significant reduction of reindeer (two-fold decrease) could favor vegetation production in the region.

Keywords: remote sensing method, North Timan tundra, reindeer pastures

Accepted: 20.02.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-128-142

References

1. Abdulmanova S. Yu., Ektova S. N., Sootnoshenie prirosta po vysote i po biomasse u kustistykh lishainikov (Ratio of increasing in height and biomass of bushy lichens), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2013, Vol. 15, No. 3(2), pp. 688–691.
2. Astakhov V. I., Svensen I. I., Pokrovnaya formatsiya final'nogo pleistotsena na krainem severo-vostoke evropeiskoi Rossii (The cover formation of the final Pleistocene in the extreme north-east of European Russia), *Regional'naya geologiya i metallogeniya*, 2011, No. 47, pp. 12–27.
3. Vylko Yu. P., Kontseptualnyi podkhod k ratsionalnomu ispol'zovaniyu olen'ikh pastbishch v Kaninskoi, Timanskoi i Malozemel'skoi tundrakh Nenetskogo avtonomnogo okruga (A conceptual approach to the rational use of reindeer pastures in the Kanin, Timan and Malozemelskaja tundras of the Nenets Autonomous District), *Elektronnyi nauchnyi zhurnal "Universum: obshchestvennye nauki"*, 2014, No. 10–11(11), available at: http://7universum.com/ru/social/archive/item/1769.
4. *Geobotanicheskoe raionirovanie Nechernozem'ya evropeyskoi chasti RSFSR* (Geobotanical zoning of the Non-Chernozem Zone of the European part of Russian SFSR), V. D. Aleksandrova, T. K. Jurkovskaja (eds.) Leningrad: Nauka, 1989, 230 p.
5. Golovko T. K., Dalke I. V., Dymova O. V., Zakhozhii I. G., Tabalenkova G. N., Pigmentnyi kompleks rastenii prirodnoi flory evropeiskogo Severo-Vostoka (Pigment complex of plants of the natural flora of the European Northeast), *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN*, 2010, No. 1, pp. 39–46.
6. Dedov A. A., *Rastitel'nost' Malozemel'skoi i Timanskoi tundr* (Vegetation of Malozemelskaya and Timanskaya tundras), Syktyvkar: Institut biologii Komi NTs UrO RAN, 2006, 160 p.
7. Elsakov V. V., Materialy sputnikovykh s″emok v analize znachenii khlorofill'nogo indeksa tundrovykh fitotsenozov (Satellite data in the analysis of chlorophyll index values of tundra phytocenoses), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 1, pp. 60–70.
8. Elsakov V. V. (2014a), Vizualizatsiya dannykh klimaticheskikh izmenenii rastitelnykh soobshchestv Mezenskoi i Kaninskoi tundr po materialam sputnikovykh s″emok (Visualization of climate change data of plant communities of the Mezen and Kanin tundras based on satellite imagery), *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2014, No. 1, pp. 83–86.
9. Elsakov V. V. (2014b), *Tekhnologiya resursnoi otsenki pastbishchnykh ugodii severnogo olenya po spektrozonal'nym sputnikovym dannym* (The recourses estimation technology for reindeer pastures inventory by remote sensing data), Patent RU 2521755, Reg. 10.07.2014.
10. Elsakov V. V., Prostranstvennaya i mezhgodovaya neodnorodnost' izmenenii rastitel'nogo pokrova tundrovoi zony Evrazii po materialam s″emki MODIS 2000–2016 gg. (Spatial and interannual heterogeneity of changes in the plant cover of the tundra zone of Eurasia based on MODIS 2000–2016 data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 56–72.
11. Elsakov V. V., Kulyugina E. E., Rastitel'nyi pokrov Yugorskogo poluostrova v usloviyakh klimaticheskikh izmenenii poslednikh desyatiletii (The vegetation cover of Jygorskii peninsula in climatic fluctuations of last year's), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 3, pp. 65–77.
12. Kononenko A. V., *Gidrotermicheskii rezhim taezhnykh i tundrovykh pochv Evropeiskogo Severo-Vostoka* (The hydrothermal regime of the taiga and tundra soils of the European North-East), Leningrad: Nauka, 1986, 145 p.
13. Lapteva E. M., Rusanova G. V., Kaverin D. A., Pastukhov A. V., Kholopov Yu. V., Panyukov A. N., Raznoobrazie i bioproduktivnost' pochv Bolshezemel'skoi tundry: zonalnye i landshaftno-ekologicheskie aspekty

(Diversity and bioproductivity of the Bolshezemelskaya tundra soils: zonal and landscape-ecological aspects), *Bioraznoobrazie ekosistem Krainego Severa: inventarizatsiya*, *monitoring*, *okhrana* (Biodiversity of the Far North Ecosystems: inventory, monitoring, protection), Proc. 2nd All-Russia Conf., Syktyvkar: Institut biologii Komi NTs UrO RAN, 2013, pp. 48–51.

14. Magomedova M. A., Morozova L. M., Ektova S. N., Rebristaya O. V., Chernyadeva I. V., Potemkin A. D., Knyazev M. S., *Poluostrov Yamal: rastitelnyi pokrov* (Yamal Peninsula: vegetation cover), Tyumen: Siti-press, 2006, 360 p.
15. Marushchak I. O., Elsakov V. V., Materialy sputnikovogo monitoringa v analize somknutosti lesnykh fitotsenozov Pripolyarnogo Urala (Satellite monitoring materials in the analysis of the density of forest phytocenoses of the Subpolar Urals), *Vestnik Instituta biologii Komi NTs UrO RAN*, 2010, No. 6, pp. 18–23.
16. Oberman N. G., Shesler I. G., Sovremennyi prognoz izmenenii merzlotnykh uslovii evropeiskogo severovostoka RF (Modern forecast of changes in permafrost conditions of the European North-East of Russia), *Problemy Severa i Arktiki RF*, 2009, Vol. 9, Moscow: Sovet Federatsii, 2009, pp. 96–106.
17. *Senokosy i pastbishcha* (Hayfields and pastures), Leningrad: Kolos, 1969, 704 p.
18. Shamanova I. I., Vliyanie snega, rastitel'nogo pokrova i raspashki na teplovoe sostoyanie gruntov v raione Vorkuty (The Influence of snow, vegetation and plowing on the thermal condition of soils at the Vorkuta region), *Biologicheskie osnovy ispol'zovaniya prirody Severa* (Biological basis of the North nature using), Proc. symp., 12–16 Dec. 1966, Syktyvkar: Komi kn. izd-vo, 1970, pp. 186–194.
19. Shpak O. V., *Ekologo-fiziologicheskaya kharakteristika nekotorykh vidov mkhov v Khibinakh: Avtoref. dis. kand. boil. nauk* (Ecological and physiological characteristics of some species of mosses in the Khibiny. Cand. biol. sci. thesis), Saint Petersburg, 2008, 20 p.