

УДК: 636.294:636.082(571.56)

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАЦИОНАЛЬНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ПАСТБИЩ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ЛИМИТИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Елсаков Владимир Валериевич (0000-0001-7111-5161)

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

Аннотация: представлен анализ возможностей использования материалов спектральной спутниковой съемки для комплексной пространственно-временной оценки продуктивности (GPP) и запасов кормовых растений оленьих пастбищ европейской Арктики. Разработаны модели, характеризующие особенности изменений фотосинтетического стока углерода в тундровые фитоценозы и его временные изменения по спектральным величинам под влиянием климатических флуктуаций последних десятилетий. По данным съемки MODIS (MOD13Q1) временного периода 2000-2022 гг. выявлены статистически значимые изменения валовых запасов наземной биомассы тундровых сообществ отдельных секторов Арктического региона. За 2000-2022 гг. в большинстве тундровых сообществ отмечен общий рост запасов зеленых кормов. Наблюдаемый по спутниковым съемкам рост продуктивности совпадает с началом и развитием фазы роста приземной температуры воздуха (ПТВ).

Ключевые слова: пастбищное оленеводство европейского севера России, информационные технологии

ЛИМИТТӨӨЧҮ ФАКТОРЛОРДУН ТААСИРИНИН ШАРТТАРЫНДА ЖАЙЫТТАРДЫН ӨСҮМДҮК РЕСУРСТАРЫН САРАМЖАЛДУУ ПАЙДАЛАНУУДАГЫ МААЛЫМАТТЫК ТЕХНОЛОГИЯЛАР

Елсаков Владимир Валериевич (0000-0001-7111-5161)

Коми биология институту НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

Аннотация: Европа арктикасынын бугу жайыттарынын тоют өсүмдүктөрүнүн түшүмдүүлүгүн (ст) жана запастарын комплекстүү мейкиндик-убактылуу баалоо үчүн спектр зоналык спутниктик сүрөткө тартуу материалдарын колдонуу мүмкүнчүлүгүнүн анализи келтирилген. Тундра фитоценоздорунан көмүртектин фотосинтездик агымынын өзгөрүүсүнүн жана акыркы он жылдыктардын климаттык термелүүлөрүнүн таасири астында спектрдик чоңдуктар боюнча анын убактылуу өзгөрүүлөрүнүн өзгөчөлүктөрүн мүнөздөөчү моделдер иштелип чыккан. Съемка боюнча съемка (СЕРДІЗСОВЕДІ) 2000-2022-жылдардагы мезгил. Арктика аймагынын айрым секторлорунун тундра жамааттарынын жер үстүндөгү биомассасынын запастарынын статистикалык маанилүү өзгөрүүлөрү аныкталды. 2000-2022-жылдары тундра жамааттарынын көпчүлүгүндө жашыл тоют запастарынын жалпы өсүшү байкалган. Спутниктен байкалган

өндүрүмдүүлүктүн өсүшү абанын жер бетиндеги температурасынын (ПТВ) өсүү фазасынын баиталышы жана өнүгүшү менен дал келет.

Өзөктүү сөздөр: Европанын түндүгүндөгү Россиянын жайыттары, маалымат технологиялары

ADVANCING INFORMATION TECHNOLOGIES FOR THE SUSTAINABLE MANAGEMENT OF PASTURE VEGETATION RESOURCES IN THE FACE OF LIMITING FACTORS

Elsakov Vladimir (0000-0001-7111-5161)

Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of RAS, Syktyvkar, Russia

Abstract: *this paper presents an analysis of the application of spectrozonal satellite imagery for the comprehensive spatial and temporal assessment of productivity (Gross Primary Productivity, GPP) and the forage plant reserves in reindeer pastures across the European Arctic. Over recent decades, models have been developed to characterise the unique changes in photosynthetic carbon flux within tundra ecosystems and their temporal spectral variations due to climatic fluctuations. Analysis of MODIS satellite data (MOD13Q1) from 2000 to 2022 has revealed statistically significant changes in the gross aboveground biomass of tundra communities in specific regions of the Arctic. Notably, a general increase in green forage reserves was observed across most tundra communities during this period. The observed productivity growth, as detected through satellite imagery, aligns with the onset and progression of a phase of increasing surface air temperatures (SAT).*

Key words: *pasture reindeer herding in the European North of Russia, information technologies*

1. Введение

Широкая доступность и информативность материалов космической съемки позволяют привлекать спутниковые снимки для количественного учета ресурсов кормовых растений, картографирования растительного покрова участков выпаса, выделению и хозяйственной оценке геоботанических контуров и мониторингу пастбищ. Растительный покров существенно отличается от других объектов земной поверхности в областях съемки в красном (R) и ближнем инфракрасном (NIR) диапазонах, что позволяет использовать спектрозональные спутниковые изображения для количественного

моделирования запасов кормов. Собранные мировые архивы изображений позволяют рассматривать особенности изменений различных территорий с 70-х годов прошлого века по настоящее время.

Серии работ, выполненных в фитоценозах различных регионов Арктики, демонстрируют наличие тесной взаимосвязи между объемами поглощенной/отраженной растительным покровом энергии в диапазонах красного и ближнего инфракрасного излучения, поглощенной фотосинтетически активной радиацией (APAR) и продуктивностью сообществ (GPP, NPP). Это позволяет рассматривать спектральные значения в качестве основы

и для расчета количественных показателей, характеризующих фитоценозы, а их сезонную и межгодовую вариабельность – как показатель продуктивности. Высокая корреляция между спектральными показателями, проективным запасом хлорофилла и надземным зелёным запасом фитомассы позволяет привлекать спектрально-аналитические изображения и их производные (спектральные индексы VI, NDVI, PVI и др.) для оценки запасов кормовых ресурсов растений и их изменений. Наиболее широкое распространение среди используемых спектрально-аналитических индексов получил нормализованный разностный индекс растительного покрова (NDVI):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1),$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра (0,6–0,7 мкм, максимум поглощения хлорофилла), RED – отражение в красной области спектра (0,7–1,0 мкм, максимум отражения). Для большинства фитоценозов циркумполярной области между величинами NDVI и надземной фитомассой (г/м²) зависимость представлена в виде экспоненциальных или линейных функций.

Отбор укосов фитомассы с небольших площадок с фиксированием точных координат позволило использовать обнаруженные взаимосвязи со спектральными величинами фитоценозов и подойти к решению вопроса количественной оценки распределения фитомассы и ресурсных видов на территории. С помощью метода линейной регрессии выявлены особенности расположения зеленых и лишайниковых кормов на пастбищах, определены показатели оленеемкости (Елсаков и др., 2017).

В Институте биологии Коми научного центра УрО РАН (г. Сыктывкар) разработаны, защищены патентами Российской Федерации и внедрены в сферу практического использования работы по землеустройству пастбищ северного оленя

с применением методов спутникового мониторинга: «Способ оценки распределения и запасов ресурсных и редких видов растений в пределах крупных территориальных массивов» (№ 2443977 по заявке №2010133214/28(047006)), «Технология ресурсной оценки пастбищных угодий северного оленя по спектрально-аналитическим спутниковым данным» (№2521755 по заявке №2013101335). Алгоритмы оценки состояния ресурсов пастбищных угодий внедрены в практику работ землеустроительных предприятий (ООО «Мурманское землеустроительное предприятие»), что подтверждено актами внедрения. Проведена инвентаризация современного состояния пастбищных угодий всех оленеводческих хозяйств расположенных на территории европейского северо-востока России (Республики Коми и Ненецкого автономного округа). Основные результаты исследований опубликованы в серии научных статей (Елсаков, 2012; Елсаков, Щанов, 2019; Елсаков, 2023).

Основная организационная единица исследований - хозяйственный контур, включающий сочетания комплексов однородных ландшафтов, растительных сообществ. Анализируя спутниковые изображения, становится возможным выделить участки геоботанических разностей, заболоченные территории, площадки промышленных объектов. В настоящее время обработка полученных материалов выполняется автоматизировано, привлекаются алгоритмы математического моделирования, что увеличило объективность и точность результата. Полученные материалы являются основой для геоботанического картографирования и подготовки проектов пастбищного устройства. Часто в качестве оцениваемых показателей выступают и компоненты/доли признаков, полученные в ходе использования элементов математического моделирования: методов субпиксельного анализа (метод анализа спектральных смесей, SMA-анализ), многомерной линейной регрессии, привлечение спектральных индексов,

что позволяет подойти к вопросу моделирования потенциально возможных местообитаний (ПВМ) или запасов ресурсных видов растений (Елсаков и др., 2017) на исследуемой территории.

2. Материалы и методы исследования

Полевые наблюдения выполнены на протяжении вегетационных сезонов 2007 – 2018 гг. на модельных участках востока Большеземельской тундры (Республика Коми) и Тазовского района (Ямало-Ненецкий АО). Модельные площадки (на каждом участке заложено по 30 площадок) были оконтурены алюминиевыми рамками (60 x 60 см) и находились в пределах границ десяти доминирующих классов растительного покрова. На модельных площадках проводили газометрические наблюдения (LiCor-6200, Nebraska, USA) за потоками CO₂ общепринятыми методами. В ходе работы фиксировали наблюдаемые величины валового дыхания (RTOT) и чистого потока углерода (NEE), которые использовали для расчёта значений наблюдаемой первичной продукции (GPP). Для участков были подобраны спутниковые изображения детального разрешения QuickBird для одних дат наблюдений. Для пикселей изображения, в которых находились площадки измерений, рассчитывали значения NDVI и выявляли особенности коррелятивной связи спектральных величин с результатами газометрических измерений. На основании полученных величин рассчитывали распределение первичной продукции экосистем тундры на конкретный момент съемки.

Для анализа связи запасов кормовых пастбищных растений и спектральных величин использованы монодоминантные по видовому составу фитоценозы с развитым травяным покровом (проективное покрытие (ПП) боле 95%). Сбор надземной фитомассы зеленых кормов проведен в трехкратной повторности (площадка 0.25x0.25 м) в пределах 13 модельных участков.

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.

Построение моделей изменений растительных сообществ по индексу NDVI и оценки запаса зеленых кормов выполнено по спутниковым изображениям MODIS (250 м) (MOD13Q1.005, источник данных: modis.gsfc.nasa.gov). Рассматривали как целый (2000-2023 гг.), так и отдельные временные периоды (2000-2009 гг., 2009-2016 гг.: 2016-2023 гг.). Алгоритм выполнения работы включал предварительную подготовку временных серий индекса NDVI (16-дневные временные композиты для всех вегетационных периодов), отбор наибольших значений показателя для каждого года наблюдений (NDVIMAX) и вычисление суммарных трендов изменений. В качестве меры интенсивности и направленности изменений показателя индекса NDVIMAX за указанные интервалы времени рассчитывали коэффициент линейного тренда, определенный по методу наименьших квадратов и характеризующий среднюю скорость изменений переменной за рассматриваемые периоды наблюдений (β) (средняя интенсивность изменения NDVI год⁻¹). Показатель β дифференцирован в соответствии с Goetz et al. (2005) в градациях значений: высокие отрицательные изменения ($\beta \leq -0,006$), низкие отрицательные изменения ($-0,006 < \beta \leq -0,003$), несущественные изменения ($-0,003 < \beta \leq 0,003$), слабые положительные ($0,003 < \beta \leq 0,006$) и высокие положительные ($0,006 < \beta$) изменения, отмеченные за год.

Связь между усредненными 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:

$$y = 0,0199e^{8,73x} \quad (2),$$

где x рассчитанные по спутниковым изображениям величины NDVI. В качестве параметров NDVI взяты усредненные за период 2000-2016 гг. максимальные годовые значения индекса.

3. Результаты исследования

Для модельных площадок измеренные значения чистого потока углерода (NEE) варьировали в течение вегетационного сезона в пределах -104 мг за час (эмиссия) в кустарничково-моховом сообществе и 250 мг CO₂-C/м² час (поглощение) в осоково-моховом сообществе с доминированием осоки водяной и сфагнума балтийского. Сочетание методов полевой газометрии с данными спектрально-зонных съемок спутника Quickbird, полученных на одну дату (6 июля 2007 г.), для одних и тех же фитоценозов модельного участка Воркутинской тундры в окрестностях пос. Сейда показал, что между первичной продукцией (GPP) и спектральными параметрами (в частности индексами VI, NDVI и др.), прослеживаются значимые тесные положительные корреляции ($r = 0.8-0.92$) (рис. 1). Порядка 60% рассмотренных сообществ описаны установленной линейной зависимостью ($r = 0.95$, $n = 30$), для остальных сообществ, наблюдаемая

интенсивность поглощения CO₂ выше (сообщество GW) и ниже (LSHL, SHL и CS) ожидаемой. Для большинства тундровых сообществ, составленных преимущественно однолетними растениями, первичная продукция фотосинтеза (NPP) достаточно тесно связана с фотосинтетическим стоком углерода.

Использование выявленной зависимости позволило экстраполировать результаты оценки на прилегающие территории с построением тематической карты распределения первичной продукции для доминирующих классов растительного покрова участка востока Большеземельской тундры на основании использования спектральных каналов спутника детального разрешения Quickbird (2.44 м) (рис. 2).

Полученные величины газометрических измерений стали основой для оценки баланса углерода за весь вегетационный период, а их комбинация с выполненной геоботанической картой стала основой для региональной оценки баланса углерода модельного участка. Моделирование сезонного углеродного баланса в изученных сообществах показало, что более сухие сообщества, расположенные на возвышенных формах рельефа (кустарничково-моховые и кустарничково-лишайниково-моховые) являются активным источником углерода в районе, средние значения эмиссии составляет 7.5 гC/м² (=75 т C/км²), в то время как сообщества с избыточным увлажнением (ОМ, ПМ и М) служат стоком углерода от 2.2 г до 35 гC/м²год (22 и 350 т C на км²).

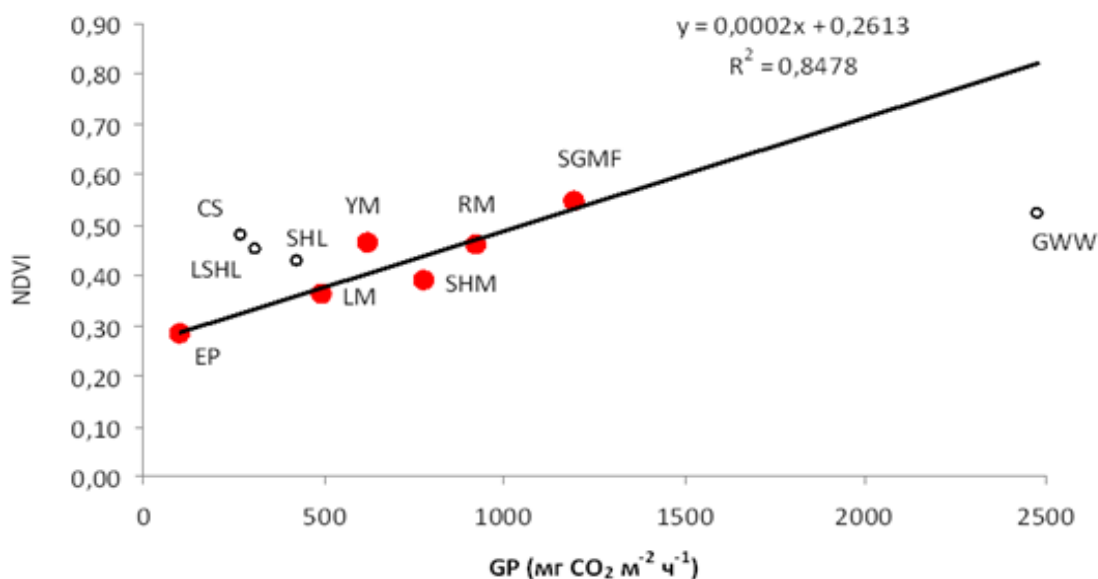


Рис. 1. Связь индекса NDVI и первичной продукции фитоценозов (GPP). Условные обозначения растительных сообществ участка: 1 – кустарничково-лишайниковые (low shrub lichen tundra, LSHL), 2 – кустарничково-лишайниковые (shrub lichen tundra, SHL), 3 – кустарничково-моховые (low shrub moss tundra, SHM), 4 – эродированные торфяники (eroded peat, EP), 5 – травяные ивняки (grass willow, GWW), 6 – осоково-моховые (sedge moss fen, SGMF), 7 – пушицево-моховые (cotton grass swamp, CS), 8 – кустарничково-моховые (shrub mossy tundra, SHM), 9 – лишайниково-моховые (lichen-moss tundra, LM), 10 – ерниково-моховые (yernik moss tundra, YM)

Отсутствие повторных съемок Quickbird диктует необходимость привлечения для межгодовых и сезонных оценок изменений количественных показателей более доступных, но имеющих более низкое пространственное разрешение сенсоров Terra-MODIS (рис.3А). Анализ межгодовой вариабельности и тренда изменений индекса NDVI показал, что изменение показателей продуктивности растительных сообществ территории имеет территориально не однородную структуру. Сопоставление полученных результатов с ранее выполненными наблюдениями за изменениями криогенных ландшафтов территории позволяют связать рост продуктивности фитоценозов на отдельных участках с увеличением глубины протаивания сезонно-талого слоя, ростом температуры верхней кровли многолетне-мерзлых пород, отмечаемым в последние десятилетия.

Сходимость результатов

использования разномасштабных моделей дает возможность расширения модели оценки величин запаса, полученных по съемкам MODIS, для всех тундровых пастбищ северного оленя (рис. 3Б). Наиболее высокие показатели средних величин запаса зеленых кормов отмечены в пределах кустарниковых тундр востока Большеземельской тундры (окр. г. Воркута) и составили 14 ц/га (по данным MODIS). Сравнение опубликованными результатами показывает возможное занижение показателя. На восточноеропейском севере из общего запаса летних кормов на долю листьев кустарников приходится более 60%, в зарослях кустарника запас листьев на высоте до 1.5 м составляет 25÷30 ц/га. Исходными данными для построения модели запаса зеленых кормов являются 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 общий запас углерода тундровой зоны может быть оценен в половину от воздушно-сухого веса.

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

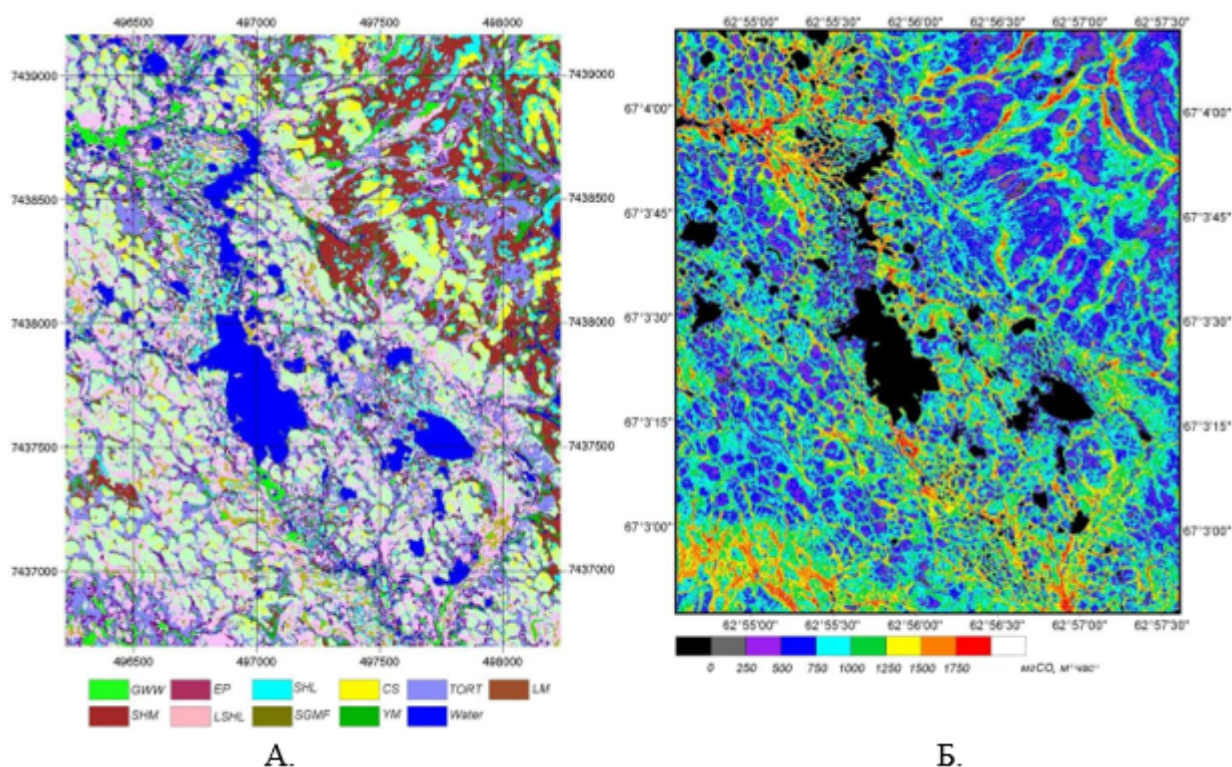


Рис. 2. Фрагмент карты растительности модельного участка, подготовленная на основании управляемой классификации сцены QuickBird (10:56 6.7.2017) (А), модель первичной продукции экосистем участка (Воркутинская тундра) (Б) по снимку QuickBird и материалам полевых наблюдений. Индексы классов представлены на рис. 1.

4. Дискуссия

Анализ результатов исследований по участкам различных хозяйств европейского севера показал целесообразность организации постоянного мониторинга территории оленьих пастбищ с привлечением возможностей современных информационных технологий. Территории пастбищ, исторически закреплённые за крупными оленеводческими хозяйствами, имеющие научно обоснованные проекты использования территорий выпаса, демонстрируют большую сохранность ресурсов кормовых растений, численность животных в стадах ограничена границами обоснованных показателей оленеёмкости,

соблюдается сезонность выпаса и пастбищеоборот. Хозяйства проводят работы с промышленными предприятиями для минимизации нарушенных площадей, негативных влияний или компенсации ущербов. Пастбища мелких хозяйств, часто не имеют долгосрочных планов выпаса, обнаруживают большую степень деградации.

Результаты анализа спутниковых изображений разных лет демонстрируют наличие глобальных трендов изменений растительного покрова Арктической зоны, которые необходимо учитывать для формирования пастбищно устойчивого оленеводства.

В «Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу» территория Крайнего Севера рассматривается в качестве стратегической ресурсной базы, прежде всего для

промышленного развития. В какой форме сохранится, и насколько успешно будет развиваться оленеводство как традиционная форма природопользования в условиях такого освоения, покажут ближайшие годы.

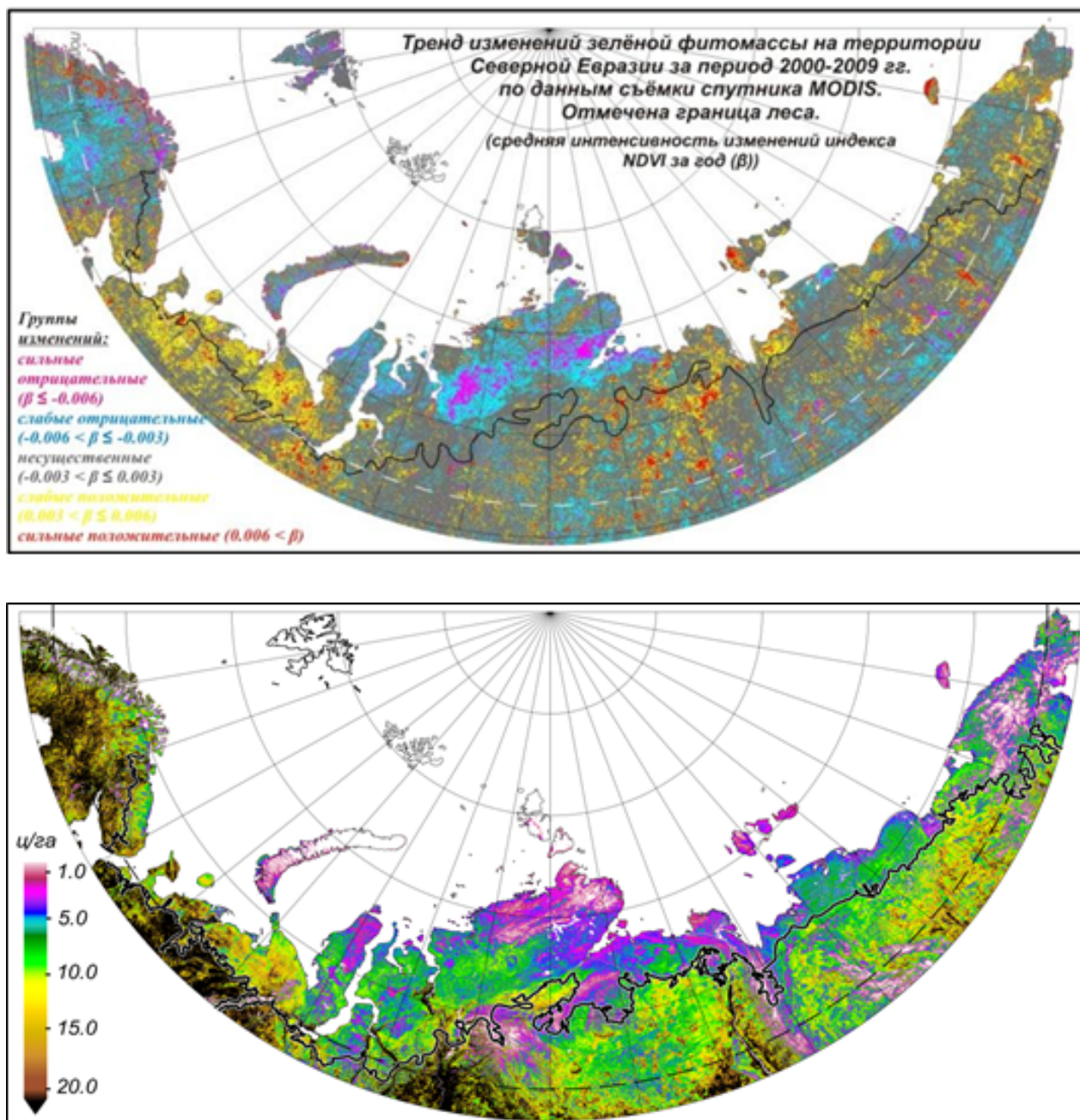


Рис. 3. Тренды межгодовых изменений максимальных значений индекса NDVI (зеленой фитомассы) на территории Северной Евразии за временные периоды 2000–2009 гг. (начальный этап потепления) (А) Распределение валового запаса зеленых кормов на пастбищах северного оленя (ц/га). Обработка многолетних данных MODIS. Линией отмечена граница леса (Б)

5. Выводы

В результате выполненной работы сформулированы следующие выводы:

1. Спектрональные данные спутниковых изображений тесно коррелируют с величинами проективного запаса хлорофилла (ХИ), фотосинтетического потока CO₂ в тундровых экосистемах, оцененных с применением газометрических методов исследований, запасами фитомассы зеленых кормов;

2. Использование временных серий среднего разрешения позволяет провести статистически обоснованную оценку тренда изменений продуктивности фитоценозов за период последних десятилетий, выявить участки трансформированные под влиянием естественных климатических изменений (флуктуаций) и количественно оценить тренды изменений.

3. Полученные результаты позволяют выполнять статистически обоснованный анализ пространственно-временных показателей кормовых ресурсов крупных территорий.

В 2014-2019 гг. привлечение разработанных технологий обработки спутниковой съемки позволило выполнить инвентаризацию и актуализацию прежних проектов использования пастбищ практически всех оленеводческих хозяйств Европейского Севера. В ходе работ проведено совершенствование алгоритмов для ресурсной оценки растительного покрова пастбищных угодий северного оленя с использованием средств спутникового мониторинга; расчеты современной потенциальной оленеемкости пастбищ, изучены индикаторные характеристики растительного покрова, раскрывающие особенности интенсивности и направленности изменений фитоценозов. Разработаны пространственно-временные модели, раскрывающие тренды статистически значимых трансформаций показателей растительного покрова, приведены площадные оценки наблюдаемых изменений.

6. Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда №24-16-20017, Санкт-Петербургского научного фонда и г/б темы «Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и бореальных экосистем европейского северо-востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов» (№122040600023-8).

7. Используемая литература

Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.

Елсаков В.В. Влияние детальности аэрокосмических изображений на результаты классификации растительных сообществ тундры // Современные проблемы ДДЗ из космоса. 2023. Т. 20. №1. С.156-168.

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

Елсаков В.В. Спутниковая съемка в оценке продуктивности экосистем Европейского Севера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9., №1. С.71-79.

Елсаков В.В., Щанов В.М. Современные изменения растительного покрова пастбищ северного оленя Тиманской тундры по результатам анализа данных спутниковой съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. №2. с. 128–142. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-128-142

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.

Goetz Sc., Bunn A.G., Fiske G.J., Houghton R.A. Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance, PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America), 2005, Vol. 102, No 38, pp.13521–13525.