Снижение значений NDVI в южных тундрах Ямала в 2001–2018 гг. коррелирует с численностью домашних северных оленей

Д. В. Веселкин, Л. М. Морозова, А. М. Горбунова

Институт экологии растений и животных УрО РАН
Екатеринбург, 620144, Россия
E-mail: veselkin_dv@ipae.uran.ru

Целью работы было установить направление современной динамики значений индекса NDVI в подзоне южных тундр п-ова Ямал и оценить её возможные причины. Для этого на 15 полигонах, расположенных в подзоне южных субарктических тундр, с помощью сервиса ВЕГА-Science Института космических исследований РАН определены значения NDVI на протяжении вегетационных периодов 2001–2018 гг. В качестве основных факторов, определяющих значения NDVI, анализировали температурные условия сезонов вегетации и численность домашних северных оленей. Установлено, что с 2001 по 2018 г. средние на протяжении вегетационного периода значения NDVI ($NDVI_{AVG}$) снижались на 0,036±0,006 $NDVI_{AVG}$/10 лет. При этом среднегодовая температура воздуха увеличивалась на 1,1 °C/10 лет. Численность домашних северных оленей, выпасающихся на полуострове, варьировала от 200 до 330 тыс. особей и в среднем увеличивалась на 55±12 тыс. особей/10 лет. Связь между $NDVI_{AVG}$ и температурой воздуха вегетационного сезона — слабая положительная; флуктуации температуры вегетационного сезона объясняют до 3 % общей изменчивости $NDVI_{AVG}$. Связь между NDVI и численностью оленей — сильная отрицательная; флуктуации численности оленей объясняют до 39 % изменчивости $NDVI_{AVG}$. Таким образом, наши данные свидетельствуют, что сильный пресс фитофагов, т. е. домашних северных оленей, — важный фактор состояния растительности южного Ямала в начале XXI в.

Ключевые слова: Ямал, климатические изменения, Арктика, продуктивность растительности, ВЕГА-Science, северные домашние олени, пресс фитофагов, пастбищное использование

Одобрена к печати: 06.04.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-143-155

Введение

Разнородные оценки, основанные на анализе динамики индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) и других данных дистанционного зондирования Земли, свидетельствуют, что в конце XX – начале XXI вв. в Арктике и Субарктике происходят масштабные изменения продуктивности экосистем. С 1982 по 2008 г. средние значения NDVI увеличились в североамериканской Арктике на 9–15 %, а в арктической тундре Евразии — на 2 % (Raynolds et al., 2012). На островах Баренцева моря рост индексов NDVI составил 15–30 % с 1988 по 2013 г. (Лавриненко, Лавриненко, 2013), а в Тиманской тундре — 3–13 % с 2000 по 2007 г. (Елсаков, Щанов, 2019). Эти изменения соответствуют общему повышению температуры в Арктике, большим потерям льда летом и другим наблюдениям за динамикой NDVI.

Рост значений вегетационных индексов отражает увеличение общего проективного покрытия растений, надземной биомассы и продукции растительности (Белоновская и др., 2016; Елсаков, 2012; Лавриненко, Лавриненко, 2013; Тишков и др., 2018; Epstein et al., 2009; Raynolds et al., 2006; Walker et al., 2003). Основной причиной роста вегетационных индексов и соответствующих изменений растительности принято считать глобальное потепление климата. Следствия потепления и удлинения периода вегетации — разрастание кустарников и трав, увеличение мощности снежного покрова (Белоновская и др., 2016; Тишков и др., 2018; Verma et al., 2020). Такую реакцию тундр на изменение климата описывают как позеленение (*англ*. greening) или закустаривание (*англ*. shrubification, bushing).

Хорошо выражена пространственная гетерогенность климатогенных изменений арктической растительности (Бобков и др., 2014; Елсаков, 2017; Елсаков, Щанов, 2019; Дегерменджи и др., 2020; Зуев и др., 2019; Им и др., 2020). Наряду с территориями, где травяная и кустарниковая растительность активно развивается, а древесная продвигается на север, есть территории, где процессы имеют противоположный тренд или не выражены. Такая неоднородность проявляется в разных масштабах. В глобальном масштабе различия между крупными регионами обусловлены климатическими факторами (Бобков и др., 2014; Елсаков, 2017; Дегерменджи и др., 2020; Им и др., 2020; Тишков и др., 2018). В локальных масштабах особенности многолетней динамики растительности могут зависеть от вариаций климатических условий, особенностей рельефа (Бобков и др., 2014; Елсаков, Щанов, 2019; Зуев и др., 2019; Им и др., 2020).

Одна из территорий, для которой представления о динамике растительности неоднозначны, — п-ов Ямал. В разных районах Ямала выявлено увеличение значений NDVI и площади ивняков вследствие активного роста ив (Елсаков, 2017; Тишков и др., 2018; Forbes et al., 2010). Но некоторые оценки на локальных полигонах Ямала с помощью инструментов дистанционного зондирования увеличение площади ивняков не подтверждают (Verma et al., 2020). Наземные исследования, необходимые для верификации данных дистанционного зондирования (Тишков и др., 2018), увеличение продуктивности тундровых сообществ не подтверждают (Горбунова, 2019; Морозова, Магомедова, 2006; Golovatin et al., 2012). Возможная причина угнетённого состояния растительности Ямала — воздействие выпаса домашних северных оленей, которые могут контролировать тип, распространение и продуктивность растительности (Bråthen et al., 2017; Golovatin et al., 2012; Verma et al., 2020).

По нашему мнению, необходимы специальные усилия, чтобы, во-первых, внести ясность в представления о динамике NDVI на Ямале в период первых двух десятилетий XXI в. и, во-вторых, попытаться понять причины изменений NDVI, если они происходят. Поэтому цель нашей работы состояла в том, чтобы проанализировать динамику значений индексов NDVI на ключевых участках в подзоне южных тундр п-ова Ямал с 2001 по 2018 г. и оценить возможные причины такой динамики.

Район и методика

Территория исследований — южная половина п-ова Ямал от широтного отрезка поймы р. Оби на юге до параллели 69° 56′ с. ш. (*рис. 1*, см. с. 145). Район включает подзону южных субарктических тундр в соответствии с зональным делением тундровой зоны на полуострове. Протяжённость территории с севера на юг — около 400 км, с запада на восток — 150–160 км. Распространение многолетнемёрзлых пород — сплошное. Климат с суровой продолжительной зимой (средняя температура января составляет –23,5 °C; длительность залегания снежного покрова — 240–260 дней) и коротким прохладным летом (средняя температура июля равна +15,2 °C). Абсолютные высоты — от 1–3 м н. у. м. (над уровнем моря) по морским побережьям до 85–90 м н. у. м. на возвышенности Хой. Рельеф равнинный, холмисто-увалистый. В растительном покрове подзоны южных тундр преобладают тундры (59 %), однородные и комплексные болота (24 %), растительность долин рек (9 %), заросли кустарников (6 %); редколесья по долинам рек в южной части полуострова составляют 0,2 % (Морозова, Магомедова, 2004). В административном отношении это Ямальский р-н Ямало-Ненецкого автономного округа.

Для анализа временной динамики значений NDVI были взяты 15 полигонов площадью по 3,1–3,5 тыс. га. Полигоны выбрали на участках, непосредственно обследованных Л. М. Морозовой в 2005–2006 и 2013–2016 гг. и А. М. Горбуновой в 2017–2019 гг. Это позволило дать краткую характеристику растительности на полигонах. Полигоны расположены в западной, центральной (возвышенность Хой) и восточной частях п-ова Ямал на разных высотах. Самый северный полигон находится на границе северных и южных субарктических тундр, самые южные — на границе тундры и северной лесотундры.

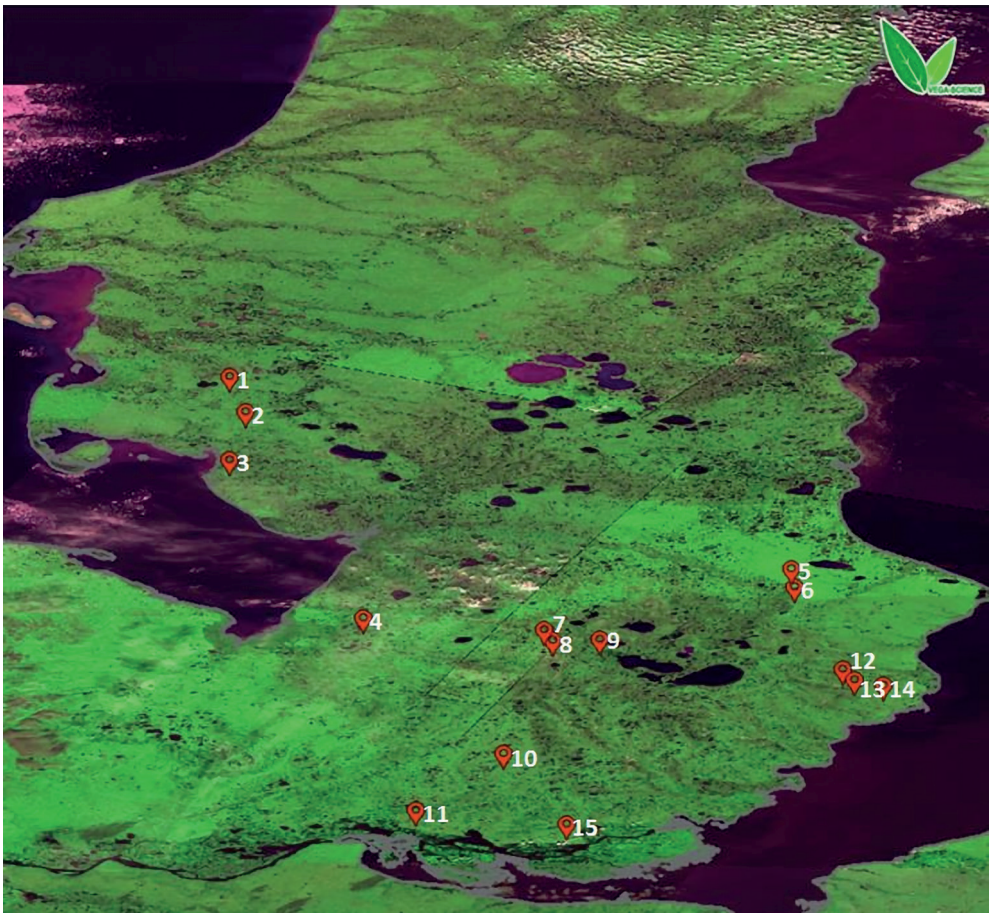

Рис. 1. Район исследования (расположение анализируемых полигонов 1–15 в южных субарктических тундрах п-ова Ямал). Рисунок создан с помощью сервиса ВЕГА-Science ИКИ РАН (http://sci-vega.ru/)

Территории всех полигонов интенсивно, часто круглогодично, используются под выпас домашних северных оленей. Наземные исследования показали, что на части полигонов лишайниковые тундры сильно выбиты. Приведём краткую характеристику полигонов (растительные сообщества; год наземного обследования; проективное покрытие растительности на пробной площади):

1. Ивняки травяно-моховые, травяные болота, тундры по склонам; 2006 г.; 100 %.
2. Ивняки травяно-моховые, травяные болота, тундры по склонам; 2006 г.; 100 %.
3. Выбитые лишайниково-кустарничковые и ерниковые травяно-моховые тундры; 2006 г.; 90 %.
4. Комплексная растительность поймы, кочкарная пушицево-моховая тундра по склонам; 2016 г. — 100 %; 2017 г. — 100 %; 2018 г. — 100 %.
5. Выбитые полигональные лишайниково-кустарничково-моховые тундры, разнотравно-вейниковые заросли кустарников; 2005 г.; 60 %.
6. Выбитые полигональные лишайниково-кустарничковые тундры, травяно-моховые и комплексные болота; 2005 г.; 60 %.
7. Лишайниковые и травяно-кустарничково-моховые тундры, песчаные раздувы; 2005 г.; 100 %.
8. Песчаные раздувы с участками выбитых травяно-кустарничковых и травяно-кустарничково-моховых тундр; 2005 г.; 5 %.
9. Выбитые лишайниковые и кустарничково-моховые тундры, песчаные раздувы, куртины кустарников; 2005 г.; 40 %.
10. Выбитые лишайниковые тундры, песчаные раздувы, куртины кустарников, ольшаники; 2005 г.; 45 %.

11. Выбитые лишайниково-кустарничковые тундры, заросли кустарников, редколесья; 2005 г.; 60 %.
12. Выбитые лишайниково-кустарничковые тундры, луговины и заросли кустарников; около 50 % площади занимают техногенно нарушенные участки; 2016 г.; 40 %.
13. Выбитые травяно-лишайниково-моховые тундры, осоково-сфагновые болота; 2014 г.; 100 %.
14. Кустарничково-травяно-моховая тундра с низким ёрником; 2014 г.; 90 %.
15. Выбитые тундры, заросли кустарников и единичные лиственницы; 2014 г.; 70 %.

Средние ($NDVI_{AVG}$) и максимальные ($NDVI_{MAX}$) значения NDVI за вегетационный сезон получены с помощью сервиса ВЕГА-Science Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) (http://sci-vega.ru/) (Лупян и др., 2011; Толпин и др., 2010). Мы использовали значения индексов NDVI, полученные со спутника MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и усредненные для каждой недели каждого года на площадь полигона; диаметр 1 пиксела — 250 м. 270 средних за сезон $NDVI_{AVG}$ для 18 лет вычислили как средние арифметические. Длительность вегетационного сезона определяли на основании сведений о первой и последней регистрации NDVI в базе ВЕГА-Science.

Средние температуры воздуха и суммы осадков по месяцам извлечены с ресурса www.pogodaiklimat.ru для Салехарда (66° 32′ с. ш. 66° 38′ в. д.; http://www.pogodaiklimat.ru/history/23330.htm). Расстояние от Салехарда до полигонов — 100–350 км. При анализе погодных характеристик использовали их усреднение за 3 года. Оценки численности выпасающихся на Ямале оленей скомпилированы из нескольких источников (Гилева, 2018; Логинов и др., 2017; Verma et al., 2020).

Временную динамику погодных характеристик, численности оленей и значений NDVI, а также взаимосвязи между параметрами анализировали в ходе регрессионного анализа с помощью коэффициента наклона прямой линии (β) и коэффициента корреляции Пирсона (*r*). Стандартизацию значений NDVI для нивелирования разности его значений на разных полигонах выполнили по формуле:

$$\text{StandNDVI} = (\text{NDVI} - \text{среднее NDVI})/\sigma,$$

где NDVI и StandNDVI — исходное и стандартизированное значения NDVI на конкретном полигоне; среднее NDVI — среднее арифметическое значение NDVI; σ — стандартное отклонение NDVI. При анализе временной динамики погодных характеристик, численности оленей, значений NDVI на отдельных полигонах число наблюдений (*n*) равно 18. При обобщённом анализе оценок NDVI на всех 15 полигонах $n = 270$.

Результаты

Динамика погодных характеристик, длительности вегетационного периода, численности оленей

С 2001 по 2018 г. в регионе происходило потепление. Рост среднегодовой температуры воздуха составил $\beta_Y = 1{,}1$ °C/10 лет (при использовании усреднённых за 3 года значений температуры $P = 0{,}0003$). Из сезонов года потепление сильнее всего выражено для весны ($\beta_Y = 1{,}8$ °C/10 лет; $P = 0{,}0189$) и не выражено для зимы ($\beta_Y = 1{,}2$ °C/10 лет; $P = 0{,}0738$), лета ($\beta_Y = 0{,}6$ °C/10 лет; $P = 0{,}0586$) и осени ($\beta_Y = 0{,}5$ °C/10 лет; $P = 0{,}1449$). Количество осадков за исследуемый период не изменилось ни в целом за год, ни за отдельные сезоны. Вегетационный период начинался на 21–26-й неделе и заканчивался на 37–43-й. Медиана длительности вегетации составила 17 нед. От южных к северным полигонам вегетационный период сокращался на 2 нед. Временная динамика длительности вегетации с 2001 по 2018 г. не установлена, но есть положительная связь ($r = 0{,}43$; $P = 5 \cdot 10^{-10}$) между длительностью вегетации и средней температурой воздуха вегетационного сезона.

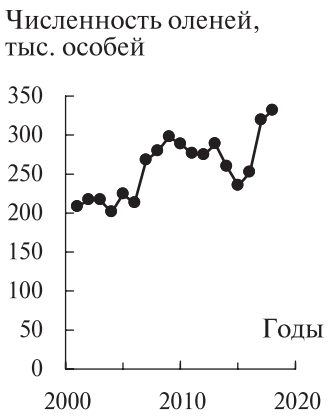

Рис. 2. Использованные в расчётах оценки численности оленей на п-ове Ямал за период 2001–2018 гг.

В 2001–2018 гг. численность домашних северных оленей на Ямале варьировала от 200 до 330 тыс. особей (*рис. 2*). Тренд роста численности оленей с 2001 по 2018 г. значим ($P = 0{,}0004$), и средний прирост составляет $\beta_Y = 55 \pm 12$ тыс. особей/10 лет (здесь и далее через «±» указана SE — стандартная ошибка среднего). Увеличение численности оленей было неравномерным: в 2007–2009 гг. — быстрый рост, а в 2014–2016 гг. — снижение. В 2001–2005 гг. плотность оленей составляла 1,8–2,2 особи/км^2. В период наибольшей численности она поднималась до 3,1–3,5 особей/км^2, а с учётом изъятия части пастбищ под объекты промышленной инфраструктуры и разрушения части пастбищ, возможно, до 3,9–4,0 особей/км^2.

Временная динамика NDVI

Временную динамику NDVI с 2001 по 2018 г. анализировали несколькими способами. На каждом из 15 полигонов значения $NDVI_{AVG}$ за этот период снизились (*рис. 3а*). Наименьшее снижение — $\beta_Y = -0{,}020$ $NDVI_{AVG}$/10 лет; наибольшее — $\beta_Y = -0{,}057$ $NDVI_{AVG}$/10 лет. В среднем снижение составило $\beta_Y = -0{,}036$ $NDVI_{AVG}$/10 лет при 95%-х доверительных интервалах (далее — 95%CI) –0,030...–0,042 $NDVI_{AVG}$/10 лет.

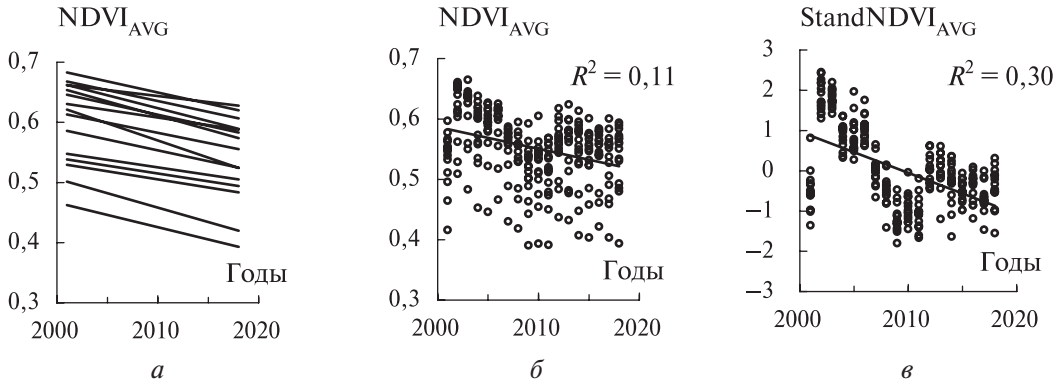

Рис. 3. Динамика в 2001–2018 гг.: *а* — $NDVI_{AVG}$ отдельно на 15 полигонах; *б* — $NDVI_{AVG}$ обобщённо на всех полигонах; *в* — $StandNDVI_{AVG}$ обобщённо на всех полигонах

При одновременном анализе всех оценок $NDVI_{AVG}$ (*рис. 3б*) есть возможность оценить значимость коэффициента наклона прямой линии: $\beta_Y = -0{,}036 \pm 0{,}006$ $NDVI_{AVG}$/10 лет ($P = 4 \cdot 10^{-8}$). Из полной изменчивости оценок $NDVI_{AVG}$ линейный тренд объясняет около 11 %. Внутри каждого года наблюдали высокую изменчивость значений $NDVI_{AVG}$, что частично обусловлено особенностями условий на разных полигонах. После стандартизации линейный тренд объясняет около 30 % общей изменчивости оценок NDVI (*рис. 3в*). Значения $NDVI_{MAX}$ от 2001 к 2018 г. также уменьшались: $\beta_Y = -0{,}027$ $NDVI_{MAX}$/10 лет ($P = 0{,}0008$).

Связь NDVI с температурой воздуха и численностью оленей

Связь между NDVI и температурой воздуха — слабая положительная. На всех полигонах проявилось слабое возрастание значений $NDVI_{AVG}$ в годы с тёплым летом (*рис. 4а*, см. с. 148). В среднем возрастание составило $\beta_T = 0{,}0045$ $NDVI_{AVG}$/1 °C при 95%CI 0,0034–

0,0056 $NDVI_{AVG}$/1 °C. При одновременном анализе всех оценок $NDVI_{AVG}$ (*рис. 4б*) связь между температурой воздуха и $NDVI_{AVG}$ незначима: $\beta_T = 0{,}0045 \pm 0{,}0028$ $NDVI_{AVG}$/1 °C, $P = 0{,}1090$. После стандартизации слабый положительный отклик NDVI на температуру подтверждается (*рис. 4в*; $P = 0{,}0059$). Но даже при анализе $StandNDVI_{AVG}$ флуктуации температуры вегетационного сезона объясняют лишь 3 % общей изменчивости. Показатель $NDVI_{MAX}$ не связан со средней температурой вегетационного сезона ($\beta_T = 0{,}0009$ $NDVI_{MAX}$/1 °C; $P = 0{,}2590$), но положительно зависит от температуры июля ($\beta_T = 0{,}0041$ $NDVI_{MAX}$/1 °C; $P = 0{,}0201$). Связь между NDVI и продолжительностью вегетации — отрицательная: $\beta_V = -0{,}004$ $NDVI_{AVG}$/1 нед ($P = 0{,}0392$) для $NDVI_{AVG}$; $\beta_V = -0{,}006$ $NDVI_{MAX}$/1 нед ($P = 0{,}0070$) для $NDVI_{MAX}$.

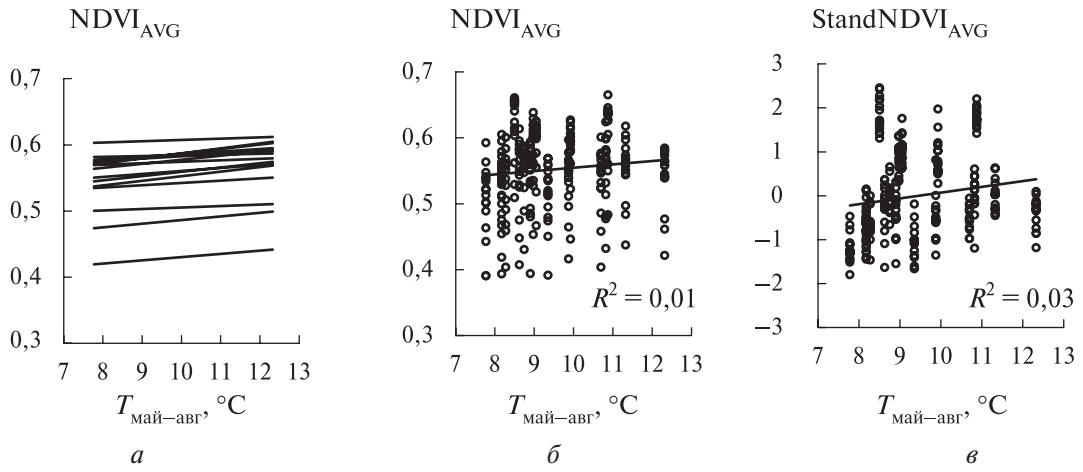

Рис. 4. Зависимость от средней температуры вегетационного сезона ($T_{май–авг}$, °C): *а* — $NDVI_{AVG}$ отдельно на 15 полигонах; *б* — $NDVI_{AVG}$ обобщённо на всех полигонах; *в* — $StandNDVI_{AVG}$ обобщённо на всех полигонах

Связь между NDVI и численностью оленей — отрицательная. На всех полигонах с увеличением поголовья оленей $NDVI_{AVG}$ снижались (*рис. 5а*). В среднем снижение составило $\beta_R = -0{,}055$ $NDVI_{AVG}$/100 тыс. особей при 95%CI –0,062...–0,048 $NDVI_{AVG}$/100 тыс. особей. При одновременном анализе $NDVI_{AVG}$ (*рис. 5б*) наклон составил $\beta_R = -0{,}055 \pm 0{,}008$ $NDVI_{AVG}$/100 тыс. особей с высоким уровнем значимости ($P = 3 \cdot 10^{-10}$). После стандартизации $NDVI_{AVG}$ отрицательный характер связи полностью сохранился (*рис. 5в*; $P < 1 \cdot 10^{-17}$).

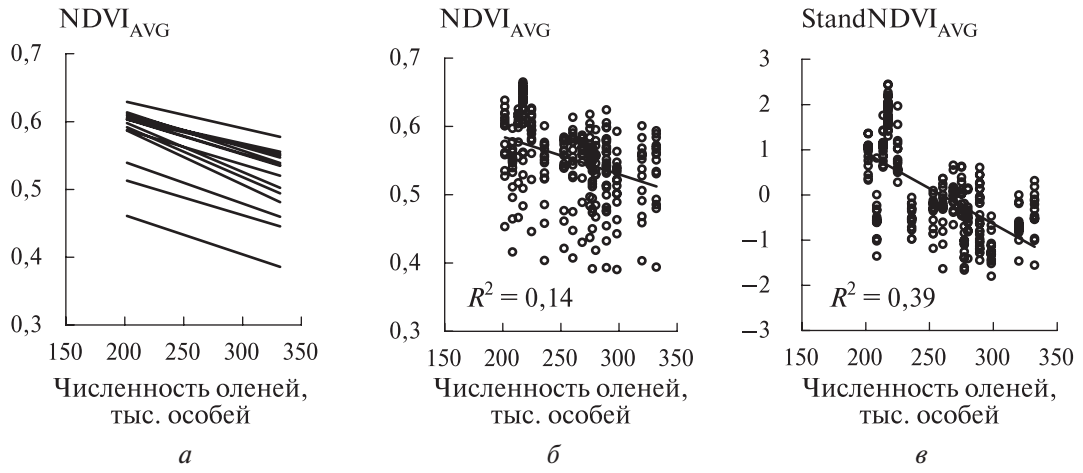

Рис. 5. Зависимость от численности оленей на Ямале: *а* — $NDVI_{AVG}$ отдельно на 15 полигонах; *б* — $NDVI_{AVG}$ обобщённо на всех полигонах; *в* — $StandNDVI_{AVG}$ обобщённо на всех полигонах

Сравнение значений коэффициентов детерминации (R^2), относящихся к хронологической изменчивости NDVI (см. *рис. 3*), к зависимости между температурой воздуха и NDVI (см. *рис. 4*) и к зависимости между числом оленей и NDVI (см. *рис. 5*), свидетельствует, что в последнем случае связь теснее всего. Численность оленей объясняет 14 % изменчивости NDVI при использовании нестандартизированных оценок и 39 % — при использовании стандартизированных.

Обсуждение

В южной части п-ова Ямал с 2001 по 2018 г. значения NDVI, измеренные во время вегетационного периода, снижались. Это происходило на фоне тенденции к некоторому повышению температуры воздуха в эти годы и выраженного потепления на протяжении более длительного временного интервала (Бобков и др., 2014; Walker et al., 2011), а также на фоне неснижающейся продолжительности вегетационного периода. Следовательно, мы не имеем достаточных оснований, чтобы связать наблюдаемые межгодовые изменения NDVI с погодными условиями. Но мы получили свидетельства, что NDVI изменяется согласованно с численностью домашних северных оленей.

Установленное с 2001 по 2018 г. потепление воздуха в районе исследования соответствует данным об особой выраженности потепления в Арктике (Бобков и др., 2014; Тишков и др., 2018; Walker et al., 2011). Также согласуется с опубликованными сведениями вывод, что в последние десятилетия температуры изменялись быстрее и значительнее, чем количество осадков (Дегерменджи и др., 2020).

Интерпретация динамики NDVI и других вегетационных индексов в умеренной и арктической зонах базируется на признании прямой связи между температурой и величинами NDVI (Белоновская и др., 2016; Бобков и др., 2014; Елсаков, 2017; Тишков и др., 2018). Такая связь обусловлена положительным влиянием повышения температуры воздуха на продуктивность растений или смену типов растительности и увеличением вследствие этого значений NDVI. Установление связи между значениями NDVI и запасом надземной фитомассы в тундровых экосистемах в виде логарифмических (Epstein et al., 2009; Raynolds et al., 2006; Walker et al., 2003) и линейной (Елсаков, Щанов, 2005) зависимостей позволяет использовать NDVI в качестве величины, отражающей интенсивность фотосинтетически обусловленных CO_2-потоков, а их сезонную вариабельность — как показатель продуктивности (Елсаков, 2012).

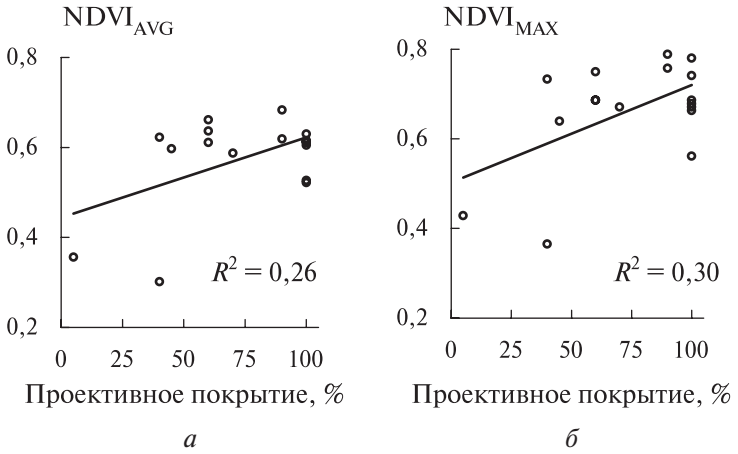

Рис. 6. Зависимость $NDVI_{AVG}$ (*а*) и $NDVI_{MAX}$ (*б*) от проективного покрытия надземных частей растений в точках в годы выполнения описаний

Наши оценки подтверждают обоснованность интерпретации значений NDVI как связанных с типом и состоянием растительности. В частности, на участках, где были выполнены

конкретные геоботанические описания (т. е. не на полных полигонах), значения $NDVI_{AVG}$ в годы выполнения описаний были ниже в сообществах, в которых нет древесных растений (0,52±0,05), по сравнению с сообществами с кустарничками (0,59±0,04) и кустарниками (0,61±0,01). Помимо этого, на участках, где были выполнены конкретные геоботанические описания, установлена положительная зависимость между проективным покрытием растений и NDVI (*рис. 6*, см. с. 149): в отношении $NDVI_{AVG}$ $r = 0{,}51$ ($P = 0{,}0351$), в отношении $NDVI_{MAX}$ $r = 0{,}55$ ($P = 0{,}0217$).

Хотя есть случаи обоснования связи NDVI с температурными условиями холодных месяцев (Бобков и др., 2014; Шарый и др., 2020), обычно исследуют связь между NDVI и условиями периода вегетации (Белоновская и др., 2016; Тишков и др., 2018). В нашем случае такая связь есть, но она слабая, и рост летних температур не объясняет наблюдаемого снижения значений NDVI. Такая ситуация нетипична, так как обычно указывается на хорошую согласованность косвенных оценок развития растительности с помощью вегетационных индексов и данных прямых наземных наблюдений (Epstein et al., 2009; Raynolds et al., 2006, 2012; Walker et al., 2003).

С учётом опубликованных сведений (Кряжимский и др., 2011; Bogdanov, Golovatin, 2017; Bråthen et al., 2017; Golovatin et al., 2012) вероятная причина деградации растительности на Ямале может заключаться в сильном прессе оленей. Олени могут глубоко нарушать тундровые экосистемы в процессе добывания корма как в результате прямого отчуждения лишайников и зелёных частей растений, так и в результате разрушения растительности вследствие вытаптывания (Bråthen et al., 2017; Walker et al., 2011). Этот процесс задокументирован, в том числе нашими наземными наблюдениями (Морозова, Магомедова, 2006; Golovatin et al., 2012). Все полигоны, фигурирующие в работе, в 2005–2018 гг. обследованы наземно, и на большей их части установлено высокое воздействие оленей. При этом точки для наземных обследований, к которым привязывали полигоны, выбирали случайно. Для территории одного нашего полигона описана роль оленей как экосистемных инженеров, сдерживающих развитие кустарников (Verma et al., 2020).

Критическая плотность, при которой северные олени эффективно препятствуют распространению кустарников, — 5 особей/км^2 (Bråthen et al., 2017). По нашим оценкам, плотность, при которой олени заметно трансформируют растительность, может быть ниже. Мы фиксируем снижение NDVI при плотности 2,5–3,5 особи/км^2. Конечно, эти оценки приблизительны, так как олени постоянно кочуют и их точное число на каждом полигоне неизвестно. Кочёвки только в небольшой степени снижают ущерб от выпаса, так как, уменьшая потери от стравливания, увеличивают потери от вытаптывания. Расхождение между опубликованной численностью в 5 особей/км^2 и нашими оценками в 2,5–3,5 особи/км^2 объяснимо, по-видимому, особенностями экосистем, например такими, как суровость климата, различие подстилающих пород, длительность и интенсивность использования пастбищ. На Ямале пастбища используются более 1000 лет (Walker et al., 2011), последние 30 лет — без ротации и круглогодично. О высокой вероятности того, что динамика NDVI на южном Ямале сопряжена с воздействием выпаса, свидетельствуют отчасти согласованные между собой нелинейности во времени обеих характеристик. Заметное увеличение численности оленей в 2008–2010 гг. (см. *рис. 2б*) сопровождалось локальным минимумом значений NDVI в 2009–2011 гг. (см. *рис. 3б*, *в*), а некоторое снижение численности оленей в 2011–2015 гг. — локальным повышением значений NDVI.

Взаимодействия в системе «климат – северные олени – растительность» сложны, и некоторые важные моменты нашей работы определены не с исчерпывающей точностью. Например, в высокой степени неопределённы оценки численности оленей на Ямале. Сведения государственной статистики о поголовье оленей есть не за все годы и только для Ямало-Ненецкого округа в целом, без привязки к муниципальным (географическим) районам. Опубликованные (Гилева, 2018; Логинов и др., 2017; Verma et al., 2020) оценки численность оленей на Ямале заметно варьируют, поэтому мы использовали оценки на основе усреднения данных из этих источников. Другая возможная неопределённость результатов связана с неизвестным вкладом в динамику значений NDVI водных объектов. С одной стороны,

в соответствии с рядом исследований (Кирпотин и др., 2008) из-за изменения состояния вечной мерзлоты в подзонах арктической и типичной тундры площадь озёр увеличивается. Вследствие того, что мы не разделяли площади суши и воды на полигонах, это могло быть причиной снижения NDVI со временем. Однако, с другой стороны, для подзоны южных тундр есть оценки, свидетельствующие не об увеличении, а об уменьшении площадей озёр (Брыксина и др., 2009). Поэтому верность предположения, что изменение соотношения площадей поверхностей суши и водных объектов могло быть причиной наблюдаемого снижения значений NDVI в период с 2001 по 2018 г., маловероятна.

Заключение

Наши результаты свидетельствуют об уменьшении значений NDVI и поэтому, вероятнее всего, — о снижении продуктивности растительности южных тундр Ямала с 2001 по 2018 г. и также о сильном воздействии на растительность южных тундр на Ямале локально действующего фактора — высокой численности домашних северных оленей на ограниченной территории. При этом мы установили прогнозируемую, но слабую положительную сопряжённость между температурами вегетационного сезона и значениями NDVI. Отрицательная сопряжённость между численностью оленей и значениями NDVI существенно сильнее и поэтому, вероятно, более значима. Таким образом, наши результаты подтверждают, что глобальные климатогенные тренды изменения растительности могут трансформироваться на локальном и региональном уровнях спецификой местных условий, и учёт таких условий необходим для повышения точности прогнозов состояния природной среды.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН № АААА-А19-119031890084-6.

Литература

1. *Белоновская Е. А.*, *Тишков А. А.*, *Вайсфельд М. А.*, *Глазов П. М.*, *Кренке-мл. А. Н.*, *Морозова О. В.*, *Покровская И. В.*, *Царевская Н. Г.*, *Тертицкий Г. М.* «Позеленение» Российской Арктики и современные тренды изменения ее биоты // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2016. № 3. С. 28–39.
2. *Бобков А. А.*, *Паниди Е. А.*, *Цепелев В. Ю.* Влияние климатических изменений на состояние растительного покрова северной полярной области России // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. 2014. Сер. 7. Вып. 3. С. 104–115.
3. *Брыксина Н. А.*, *Полищук В. Ю.*, *Полищук Ю. М.* Изучение взаимосвязи изменений климатических и термокарстовых процессов в зонах сплошной и прерывистой мерзлоты западной Сибири // Вестн. Югорского гос. ун-та. 2009. Вып. 3(14). С. 3–12.
4. *Гилева Л. Н.* Организация рационального использования оленьих пастбищ с применением оптимизационных моделей // Науч. ведомости Белгородского гос. ун-та. Сер. «Естественные науки». 2018. Т. 42. № 3. С. 435–445.
5. *Горбунова А. М.* Совмещение данных наземных исследований и дистанционного зондирования для оценки пастбищных ресурсов южных субарктических тундр // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии: докл. 7-й Всероссийской конф. Москва. 22–24 апр. 2019. М.: ЦЭПЛ РАН, 2019. С. 41–42.
6. *Дегерменджи А. Г.*, *Высоцкая Г. С.*, *Сомова Л. А.*, *Письман Т. И.*, *Шевырногов А. П.* Многолетняя динамика NDVI-растительности различных классов тундры в зависимости от температуры и осадков // Докл. Российской акад. наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 2. С. 103–106.
7. *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.
8. *Елсаков В. В.* Пространственная и межгодовая неоднородность изменений растительного покрова тундровой зоны Евразии по материалам съёмки MODIS 2000–2016 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 56–72.
9. *Елсаков В. В.*, *Щанов В. М.* Особенности спектральных характеристик приморских лугов восточного побережья Малоземельской тундры // Биоразнообразие наземных и водных экосистем охраняемых

территорий Малоземельской тундры и прилегающих регионов. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2005. № 178. С. 5–20.
10. *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.
11. *Зуев В. В.*, *Короткова Е. М.*, *Павлинский А. В.* Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры западной Сибири в 1982–2015 гг. по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 66–76.
12. *Им С. Т.*, *Харук В. И.* *Ли В. Г.* Миграция северной границы вечнозелёных хвойных древостоев в Сибири в XXI столетии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 176–187.
13. *Кирпотин С. Н.*, *Полищук Ю. М.*, *Брыксина Н. А.* Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах западной Сибири в условиях глобального потепления // Вестн. Томского гос. ун-та. 2008. № 311. С. 185–189.
14. *Кряжимский Ф. В.*, *Маклаков К. В.*, *Морозова Л. М.*, *Эктова С. Н.* Системный анализ биогеоценозов полуострова Ямал: имитационное моделирование воздействия крупностадного оленеводства на растительный покров // Экология. 2011. № 5. С. 323–333.
15. *Лавриненко И. А.*, *Лавриненко О. В.* Влияние климатических изменений на растительный покров островов Баренцева моря // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2013. № 6. С. 4–16.
16. *Логинов В. Г.*, *Игнатьева М. Н.*, *Балашенко В. В.* Вред, причиненный ресурсам традиционного природопользования, и его экономическая оценка // Экономика региона. 2017. Т. 13. Вып. 2. С. 396–409.
17. *Лупян Е. А.*, *Савин И. Ю.*, *Барталев С. А.*, *Толпин В. А.*, *Балашов И. В.*, *Плотников Д. Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
18. *Морозова Л. М.*, *Магомедова М. А.* Структура растительного покрова и растительные ресурсы полуострова Ямал. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2004. 64 с.
19. *Морозова Л. М.*, *Магомедова М. А.* Влияние многолетнего выпаса оленей на ресурсный потенциал растительного покрова // Полуостров Ямал: растительный покров. Тюмень: Сити-пресс, 2006. С. 235–247.
20. *Тишков А. А.*, *Белоновская Е. А.*, *Вайсфельд М. А.*, *Глазов П. М.*, *Кренке А. Н.*, *Тертицкий Г. М.* «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики арктической биоты // Арктика: экология и экономика. 2018. № 2(30). С. 31–44.
21. *Толпин В. А.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Лупян Е. А.*, *Савин И. Ю.*, *Флитман Е. В.* Возможности информационного сервера СДМЗ АПК // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. № 2. С. 221–232.
22. *Шарый П. А.*, *Шарая Л. С.*, *Сидякина Л. В.* Связь NDVI лесов и характеристик климата Волжского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 154–163.
23. *Bogdanov V. D.*, *Golovatin M. G.* Anthrax in Yamal: An Ecological View on Traditional Reindeer Husbandry // Russian J. Ecology. 2017. V. 48. No. 2. P. 95–100.
24. *Bråthen K. A.*, *Ravolainen V. T.*, *Stien A.*, *Tveraa T.*, *Ims R. A.* Rangifer management controls a climate-sensitive tundra state transition // Ecological Applications. 2017. V. 27(8). 43 p.
25. *Epstein H. E.*, *Walker D. A.*, *Raynolds M. K.*, *Kelley A. M.*, *Jia G. J.*, *Ping C. L.*, *Michaelson G. J.*, *Leibman M. O.*, *Kaarlejärvi E.*, *Khomutov A.*, *Kuss P.*, *Moskalenko N.*, *Orekhov P.*, *Matyshak G.*, *Forbes B. C.*, *Yu Q.* Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra // AGU Fall Meeting Abstr. 14–18 Dec., 2009. San Francisco, CA. 2009. Abstr. id. GC31A-0697.
26. *Forbes B. C.*, *Macias-Fauria M.*, *Zetterberg P. I.* Russian Arctic warming and ‘greening’ are closely tracked by tundra shrub willows // Global Change Biology. 2010. No. 16. P. 1542–1554.
27. *Golovatin M. G.*, *Morozova L. M.*, *Ectova S. N.* Effect of reindeer overgrazing on vegetation and animals of tundra ecosystems of the Yamal peninsula // Czech Polar Reports. 2012. V. 2. No. 2. P. 80–91.
28. *Raynolds M. K.*, *Walker D. A.*, *Maier H. A.* NDVI patterns and phytomass distribution in the circumpolar Arctic // Remote Sensing of Environment. 2006. No. 102. P. 271–281.
29. *Raynolds M. K.*, *Walker D. A.*, *Epstein H. E.*, *Pinzon J. E.*, *Tucker J. A.* New estimate of tundra-biome phytomass from trans-Arctic field data and VHRR NDVI // Remote Sensing Letters. 2012. V. 3. No. 5. P. 403–411.
30. *Verma M.*, *Schulte To Bühne H.*, *Lopes M.*, *Ehrich D.*, *Sokovnina S.*, *Hofhuis S. P.*, *Pettorelli N.* Can reindeer husbandry management slow down the shrubification of the Arctic? // J. Environmental Management. 2020. No. 267. 7 p.
31. *Walker D. A.*, *Epstein H. E.*, *Jia G. J.*, *Balser A.*, *Copass C.*, *Edwards E. J.*, *Gould W. A.*, *Hollingsworth J.*, *Knudson J.*, *Maier H. A.*, *Moody A.*, *Raynolds M. K.* Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska:

Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic // J. Geophysical Research. 2003. V. 108. No. D2. Art. No. 8169. 18 p. DOI: 10.1029/2001JD000986.

32. *Walker D. A.*, *Forbes B. C.*, *Leibman M. O.*, *Epstein H. E.*, *Bhatt U. S.*, *Comiso J. C.*, *Drozdov D. S.*, *Gubarkov A. A.*, *Jia G. J.*, *Kaarlejarvi E.*, *Kaplan J. O.*, *Khomutov A. V.*, *Kofinas G. P.*, *Kumpula T.*, *Kuss P.*, *Moskalenko N. G.*, *Meschtyb N. A.*, *Pajunen A.*, *Raynolds M. K.*, *Romanovsky V. E.*, *Stammler F.*, *Yu Q.* Cumulative Effects of Rapid Land-Cover and Land-Use Changes on the Yamal Peninsula, Russia // Eurasian Arctic Land Cover and Land Use in a Changing Climate / eds. G. Gutman, A. Reissell. 2011. P. 207–236.

Decrease of NDVI values in the southern tundra of Yamal in 2001–2018 correlates with the size of domesticated reindeer population

D. V. Veselkin, L. M. Morozova, A. M. Gorbunova

Institute of Plant and Animal Ecology UB RAS, Ekaterinburg 620144, Russia
E-mail: veselkin_dv@ipae.uran.ru

This work aimed to establish the direction of the current dynamics of the NDVI index values in the Yamal Peninsula southern subarctic tundra subzone and to assess its possible causes. For this purpose, we recorded NDVI using the VEGA-Science service of the Space Research Institute RAS during the growing seasons in 2001–2018 at 15 polygons. The temperature conditions of the growing seasons and the size of domesticated reindeer population were assumed to be the main factors determining NDVI. We established that the average NDVI ($NDVI_{AVG}$) values during the growing season in 2001–2018 decreased by 0.036±0.006 $NDVI_{AVG}$/10 years. Additionally, the average annual air temperature increased by 1.1 °C/10 years. The size of domesticated reindeer population grazing on the peninsula varied from 200 to 330 thousand individuals and increased by 55±12 thousand individuals/10 years on average. The relationship between $NDVI_{AVG}$ and the growing season air temperature is weak and positive; fluctuations in the growing season air temperature explain up to 3 % of the total variability of $NDVI_{AVG}$. On the contrary, the relationship between NDVI and the reindeer population size is strongly negative; fluctuations in the reindeer population size explain up to 39 % of the $NDVI_{AVG}$ variability. Thus, our data show that a significant factor in the state of vegetation in southern Yamal at the beginning of the 21st century is the heavy pressure of phytophages, namely — domesticated reindeer.

Keywords: Yamal, climate change, Arctic, vegetation productivity, VEGA-Science, domesticated reindeer, phytophage press, pasture use

Accepted: 06.04.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-143-155

References

1. Belonovskaya E. A., Tishkov A. A., Vaisfeld M. A., Glazov P. M., Krenke (junior) A. N., Morozova O. V., Pokrovskaya I. V., Tsarevskaya N. G., Tertitskii G. M., “Greening” of the Russian Arctic and the modern trends of transformation of its biota, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2016, No. 3, pp. 28–39 (in Russian).
2. Bobkov A. A., Panidi E. A., Tsepelev V. Yu., Influence of climate variations on state of vegetable cover of the north polar area of Russia, *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*, 2014, Ser. 7, Issue 3, pp. 104–115 (in Russian).
3. Bryksina N. A., Polishchuk V. Yu., Polishchuk Yu. M., Study of the relationship between changes in climatic and thermokarst processes in continuous and discontinuous permafrost zones of Western Siberia), *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, Issue 3(14), pp. 3–12 (in Russian).
4. Gileva L. N., Organization of rational use of reindeer pastures with the use of optimization models, *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Estestvennye nauki”*, 2018, Vol. 42, No. 3, pp. 435–445 (in Russian).

5. Gorbunova A. M., Combining ground-based survey and remote sensing data to assess the grazing resources of the southern subarctic tundra, *Aerokosmicheskie metody i geoinformatsionnye tekhnologii v lesovedenii*, *lesnom khozyaystve i ekologii* (Aerospace methods and GIS–technologies in forestry, forest management and ecology), Proc. 7th All-Russia Conf., Moscow, 22–24 Apr., 2019, Moscow: CEPF RAS, 2016, pp. 41–42 (in Russian).
6. Degermendzhi A. G., Vysotskaya G. S., Somova L. A., Pisman T. I., Shevyrnogov A. P., Long-term NDVI dynamics of vegetation in tundra of different classes depending on temperature and precipitation, *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*, 2020, Vol. 493, No. 2, pp. 103–106 (in Russian).
7. Elsakov V. V., The remote sensing data in European North productivity eatimation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 71–79 (in Russian).
8. Elsakov V. V., Spatial and interannual heterogeneity of changes in the vegetation cover of Eurasian tundra: Anslysis of 2000–2016 MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 56–72 (in Russian).
9. Elsakov V. V., Shchanov V. M., Features of the spectral characteristics of coastal meadows on the eastern coast of Malozemelskaya tundra, In: *Bioraznoobrazie nazemnykh i vodnykh ekosistem okhranyaemykh territorii Malozemel'skoi tundry i prilegayushchikh regionov* (Biodiversity of terrestrial and aquatic ecosystems of protected areas of Malozemelskaya tundra and adjacent regions), Syktyvkar: Komi SC UB RAS, 2005, No. 178, pp. 5–20 (in Russian).
10. 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).
11. Zuev V. V., Korotkova E. M., Pavlinsky A. V., Climate-related changes in the vegetation cover of the taiga and tundra of Western Siberia in 1982–2015 according to satellite observations, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019, No. 6, pp. 66–76 (in Russian).
12. Im S. T., Kharuk V. I., Lee V. G., Migration of the northern evergreen needleleaf timberline in Siberia in the 21st century, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 176–187 (in Russian).
13. Kirpotin S. N., Polishchuk Yu. M., Bryksina N. A., Thermokarst lakes square dynamics of west Siberian continuous and discontinuous permafrost under impact of global warming, *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2008, No. 311, pp. 185–189 (in Russian).
14. Kryazhimskii F. V., Maklakov K. V., Morozova L. M., Ektova S. N., Systematic analysis of biogeocenoses of the Yamal Peninsula: simulation of the impact of large-herd reindeer husbandry on the vegetation cover, *Ekologiya*, 2011, No. 5, pp. 323–333 (in Russian).
15. Lavrinenko I. A., Lavrinenko O. V., The impact of climate change on the plant cover of the barents sea islands, *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, No. 6, pp. 4–16 (in Russian).
16. Loginov V. G., Ignatyeva M. N., Balashenko V. V., Harm to the resources of traditional nature management and its economic evaluation, *Ekonomika regiona*, 2017, Vol. 13, Issue 2, pp. 396–409 (in Russian).
17. Loupian E., Savin I., Bartalev S., Tolpin V., Balashov I., Plotnikov D., Satellite Service for Vegetation Monitoring VEGA, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 190–198 (in Russian).
18. Morozova L. M., Magomedova M. A., The influence of long-term reindeer grazing on the resource potential of the vegetation cover, In: *Poluostrov Yamal: rastitel'nyi pokrov* (Yamal Peninsula: vegetation cover), Tyumen: Siti-press, 2006, pp. 235–247 (in Russian).
19. Morozova L. M., Magomedova M. A., *Struktura rastitel'nogo pokrova i rastitel'nye resursy poluostrova Yamal* (Vegetation cover structure and plant resources of the Yamal Peninsula), Ekaterinburg: Izd. Uralskogo universiteta, 2004, 64 p. (in Russian).
20. Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Weisfeld M. A., Glazov P. M., Krenke A. N., Tertitsky G. M., "The Greening" of the tundra as a driver of the modern dynamics of the Arctic biota), *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2018, No. 2(30), pp. 31–44 (in Russian).
21. Tolpin V. A., Bartalev S. A., Efremov V. J., Loupian E. A., Savin I. J., Flitman E. V., Capabilities of the information server SDMZ, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 2, pp. 221–232 (in Russian).
22. Shary P. A., Sharaya L. S., Sidyakina L. V., The relation of forest NDVI to climate in Volga basin, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 154–163 (in Russian).
23. Bogdanov V. D., Golovatin M. G., Anthrax in Yamal: An Ecological View on Traditional Reindeer Husbandry, *Russian J. Ecology*, 2017, Vol. 48, No. 2, pp. 95–100.
24. Bråthen K. A., Ravolainen V. T., Stien A., Tveraa T., Ims R. A., Rangifer management controls a climate-sensitive tundra state transition, *Ecological Applications*, 2017, No. 27(8), 43 p.
25. Epstein H. E., Walker D. A., Raynolds M. K., Kelley A. M., Jia G. J., Ping C. L., Michaelson G. J., Leibman M. O., Kaarlejärvi E., Khomutov A., Kuss P., Moskalenko N., Orekhov P., Matyshak G.,

Forbes B. C., Yu Q., Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra, *AGU Fall Meeting Abstracts*, 14–18 Dec., 2009, San Francisco, CA, 2009, Abstr. id. GC31A-0697.

26. Forbes B. C., Macias-Fauria M., Zetterberg P. I., Russian Arctic warming and 'greening' are closely tracked by tundra shrub willows, *Global Change Biology*, 2010, No. 16, pp. 1542–1554.
27. Golovatin M. G., Morozova L. M., Ectova S. N., Effect of reindeer overgrazing on vegetation and animals of tundra ecosystems of the Yamal peninsula, *Czech Polar Reports*, 2012, Vol. 2, No. 2, pp. 80–91.
28. Raynolds M. K., Walker D. A., Maier H. A., NDVI patterns and phytomass distribution in the circumpolar Arctic, *Remote Sensing of Environment*, 2006, No. 102, pp. 271–281.
29. Raynolds M. K., Walker D. A., Epstein H. E., Pinzon J. E., Tucker J. A., New estimate of tundra-biome phytomass from trans-Arctic field data and VHRR NDVI, *Remote Sensing Letters*, 2012, Vol. 3, No. 5, pp. 403–411.
30. Verma M., Schulte To Bühne H., Lopes M., Ehrich D., Sokovnina S., Hofhuis S. P., Pettorelli N., Can reindeer husbandry management slow down the shrubification of the Arctic? *J. Environmental Management*, 2020, No. 267, 7 p.
31. Walker D. A., Epstein H. E., Jia G. J., Balser A., Copass C., Edwards E. J., Gould W. A., Hollingsworth J., Knudson J., Maier H. A., Moody A., Raynolds M. K., Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska: Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic, *J. Geophysical Research*, 2003, Vol. 108, No. D2, Art. No. 8169, 18 p., DOI: 10.1029/2001JD000986.
32. Walker D. A., Forbes B. C., Leibman M. O., Epstein H. E., Bhatt U. S., Comiso J. C., Drozdov D. S., Gubarkov A. A., Jia G. J., Kaarlejarvi E., Kaplan J. O., Khomutov A. V., Kofinas G. P., Kumpula T., Kuss P., Moskalenko N. G., Meschtyb N. A., Pajunen A., Raynolds M. K., Romanovsky V. E., Stammler F., Yu Q., Cumulative Effects of Rapid Land-Cover and Land-Use Changes on the Yamal Peninsula, Russia, *Eurasian Arctic Land Cover and Land Use in a Changing Climate*, G. Gutman, A. Reissell (eds.), 2011, pp. 207–236.