

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 528.8 (58.056)

DOI: 10.15372/GIPR20220113

Д.А. КАВЕРИН, А.Н. ПАНИУКОВ, А.В. ПАСТУХОВ

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия,
dkav@mail.ru, panjukov@ib.komisc.ru, alpast@mail.ru

АНАЛИЗ ДИСТАНЦИОННЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СУКЦЕССИЙ ТУНДРОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ПОСТАГРОГЕННЫХ БИОГЕОЦЕНОЗАХ

Проведен сравнительный анализ дистанционных спектральных индексов при исследовании изменений растительного покрова в постагрогенных биогеоценозах Большеземельской тундры. Для оценки динамики спектральных показателей в луговых биогеоценозах на протяжении сельскохозяйственного и постагрогенного периодов рассмотрены сукцессионные изменения видового состава растительности. Спектральные характеристики и видовой состав растительности окружающих ненарушенных биогеоценозов использованы в качестве фоновых показателей. Луговые биогеоценозы, по сравнению с фоновыми участками, при сельскохозяйственном использовании отличались относительно высокими значениями индексов, характеризующих влажность и фотосинтетическую активность растительной фитомассы (NDVI, LWCI, NDMI, канал B5). Для оценки изменений количества отмершей биомассы использован индекс PSRI, значения которого были минимальны в период сельскохозяйственного использования лугов при их регулярном сенокосении. В ходе самовосстановительной сукцессии в постагрогенных биогеоценозах значения спектральных индексов постепенно приближаются к таковым окружающих фоновых участков. В постагрогенный период в луговых биогеоценозах постепенно снижаются значения индексов LWCI, NDMI и NDVI, повышаются значения PSRI и спектрального канала B3. В постагрогенный период в луговых биогеоценозах изреживается сеяный злаковый травостой, формируется кустарниковый ярус, доминантами и субдоминантами становятся внедряющиеся из окружающих сообществ виды. Активизация самовосстановительной сукцессии тундровой растительности в постагрогенных биогеоценозах происходила в период современного климатического потепления. Для оценки влияния климата на спектральные характеристики растительного покрова определяли статистические взаимосвязи между значениями климатических характеристик и спектральных индексов в постагрогенных и фоновых биогеоценозах.

Ключевые слова: спектральные индексы, растительность, климат, постагрогенные биогеоценозы, Большеземельская тундра.

D.A. KAVERIN, A.N. PANJUKOV, A.V. PASTUKHOV

Institute of Biology, Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
167982, Syktyvkar, ul. Kommunisticheskaya, 28, Russia,
dkav@mail.ru, panjukov@ib.komisc.ru, alpast@mail.ru

ANALYSIS OF REMOTE SPECTRAL INDICES IN THE STUDY OF SUCCESSIONAL CHANGES OF TUNDRA VEGETATION IN POST-AGROGENOUS BIOGEOCENOSES

A comparative analysis is made of the remote spectral indices in investigating changes in vegetation cover in post-agrogenic biogeocenoses of the Bolshezemel'skaya tundra. In agricultural use, meadow biogeocenoses, compared with the surrounding background areas, were characterized by relatively high indices characterizing the moisture and photosynthetic activity of plant phytomass (NDVI, LWCI, NDMI, and B5). To assess the changes in the amount of dead biomass, the PSRI index was used, the values of which were minimal during the period of agricultural use of meadows during their regular mowing. During self-healing succession in post-agrogenic biogeocenoses, the values of spectral indices gradually approach those of the background

sections. In the post-agrogenic period, the values of the LWCI, NDMI and NDVI indices gradually decreased in meadow biogeocenoses, and the PSRI and spectral channel B3 values increased. The dynamics of the spectral indices is affected by the changes in the species composition. In the post-agrogenic period in meadow biogeocenoses, seeded cereal grass stand is thinned out, a shrub layer is formed, and species introduced from surrounding communities become dominant and subdominant. The activation of the self-healing succession of tundra vegetation in post-agrogenic biogeocenoses takes place against the backdrop of climate warming. Statistical relationships are determined, which reflect the influence of climatic parameters on changes in spectral indices in post-agrogenic and background biogeocenoses. A decrease in the severity of the climate is accompanied by an increase in the values of spectral indices characterizing the vegetative activity of tundra vegetation. An increase in the amount of precipitation contributes to an increase in the values of the indices reflecting the supply of plants with moisture.

Keywords: spectral indices, vegetation, climate, post-agrogenic biogeocenoses, Bolshezemel'skaya tundra.

ВВЕДЕНИЕ

Спектральная отражательная способность поверхности растительного покрова является одним из характерных признаков его состояния. Изменение отражательной способности земной поверхности позволяет использовать космические снимки для идентификации трансформации растительного покрова [1, 2].

Геоинформационные данные обладают высокой степенью интеграции, поэтому исследование результатов дистанционного зондирования необходимо проводить комплексно, во взаимосвязи с другими видами данных [3]. Изменения растительного покрова происходят на фоне естественных и антропогенных процессов. В последние десятилетия на севере Европейской России на фоне устойчивого климатического потепления [4] происходит увеличение продуктивности естественных фитоценозов, сопровождающееся продвижением кустарниковой растительности на север [5]. В таких условиях особенно актуальным становится выявление взаимосвязей между динамикой дистанционных спектральных и климатических показателей в биогеоценозах криолитозоны [6].

В 1960-х гг. в Воркутинском районе Республики Коми проводилось сельскохозяйственное освоение тундровых массивов в качестве кормовой базы местного животноводства [7]. В условиях сурового субарктического климата создавались многолетние сеяные луга [8]. В 1990-е гг. на них прекратили внесение удобрений и сенозаготовку, в 2000-е гг. луга продолжали функционировать в качестве устойчивых постагрогенных биогеоценозов [9–11]. Однако во втором десятилетии XXI в. на многих участках началось активное внедрение тундровой растительности. Активизация самовосстановительной сукцессии тундровой растительности в постагрогенных биогеоценозах — естественный процесс [12]. В настоящей работе рассматриваются постагрогенные биогеоценозы, сукцессионные изменения в которых пришлись на период климатического потепления и увеличения продуктивности естественных фитоценозов в регионе.

Спектральные индексы широко применяются при сравнительном анализе состояния растительности как естественных, так и агрогенных биогеоценозов [13, 14]. Анализ изменения спектральных индексов растительности особенно актуален для участков криолитозоны, где ранее находились агрогенные биогеоценозы, функционирующие в настоящее время как постагрогенные. В связи с этой целью настоящей работы являлся сравнительный анализ динамики дистанционных спектральных индексов при исследовании сукцессионных изменений растительного покрова в постагрогенных биогеоценозах южной тундры северо-востока Европейской России, происходящих в период современного климатического потепления. Анализ дистанционных спектральных индексов можно применять для оценки пространственно-временных изменений растительного покрова тундровых биогеоценозов в антропогенных и естественных условиях.

Исследования проводились в периоды сельскохозяйственного (1986–1999 гг.) и постагрогенного (2000–2017 гг.) функционирования луговых биогеоценозов. Спектральные характеристики и видовой состав окружающих естественных растительных сообществ выбрали в качестве фоновых показателей. В работе определены статистические взаимосвязи между климатическими параметрами и спектральными индексами в постагрогенных и естественных биогеоценозах, охарактеризованы сукцессионные изменения видového состава растительности в постагрогенных биогеоценозах.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемая территория находится в юго-восточной части Большеземельской тундры, в пределах Воркутинского административного района Республики Коми. Работы проводились на участках, расположенных в 3–10 км к северо-востоку от Воркуты (67°31'–35' с. ш., 64°08'–10' в. д.). Территория

характеризуется суровым субарктическим климатом и массивно-островным распространением многолетнемерзлых пород (ММП) [15] и представляет собой полого-увалистую равнину, покрытую чехлом пылеватых покровных суглинков мощностью менее 10 м [16]. По геоботаническому районированию относится к Воркутинскому тундровому округу подзоны кустарничковой (южной) тундры [17].

На плакорах распространены кустарничковые и кустарниковые (ерниковые и ивняковые) тундры. На слабодренированных участках развиты осоковые и плоскобугристые болота [18]. Растительный покров тундровых водоразделов, как правило, мозаичен, что обусловлено особенностями проявлений криогенных процессов в почвах. В структуре почвенного покрова на дренированных массивах широко распространены глееземы, в условиях затрудненного дренажа развиты торфяно-глееземы и торфяные олиготрофные почвы [19]. Глубина залегания кровли ММП в суглинистых почвах дифференцирована в зависимости от характера растительного покрова, варьирует от 0,7–0,8 до 2–3 м и более [20].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования выбраны растительные сообщества постагрогенных биогеоценозов, представленные многолетними сеянными лугами, зарастающими естественной тундровой растительностью. В качестве фоновых рассматриваются естественные тундровые растительные сообщества, располагающиеся в аналогичных ландшафтных позициях (рис. 1). При этом выбраны две пары биогеоценозов, сформированных на участках с преобладанием кустарничковой и кустарниковой растительности соответственно. Участки I и II, площадью 5 га каждый, находятся на расстоянии 400 м друг от друга, в 10 км к северо-востоку от Воркуты (урочище Аяч-Яга), на приречном увале с преобладанием кустарничковой растительности (см. рис. 1). Участки III и IV, площадью 4 и 7 га соответственно, расположены на расстоянии 400 м друг от друга, в 3 км к северо-востоку от Воркуты (урочище Нерусовой-Мусюр), на дренированном водораздельном увале, покрытом преимущественно кустарниковой растительностью. Подробная характеристика объектов исследования приведена в табл. 1.

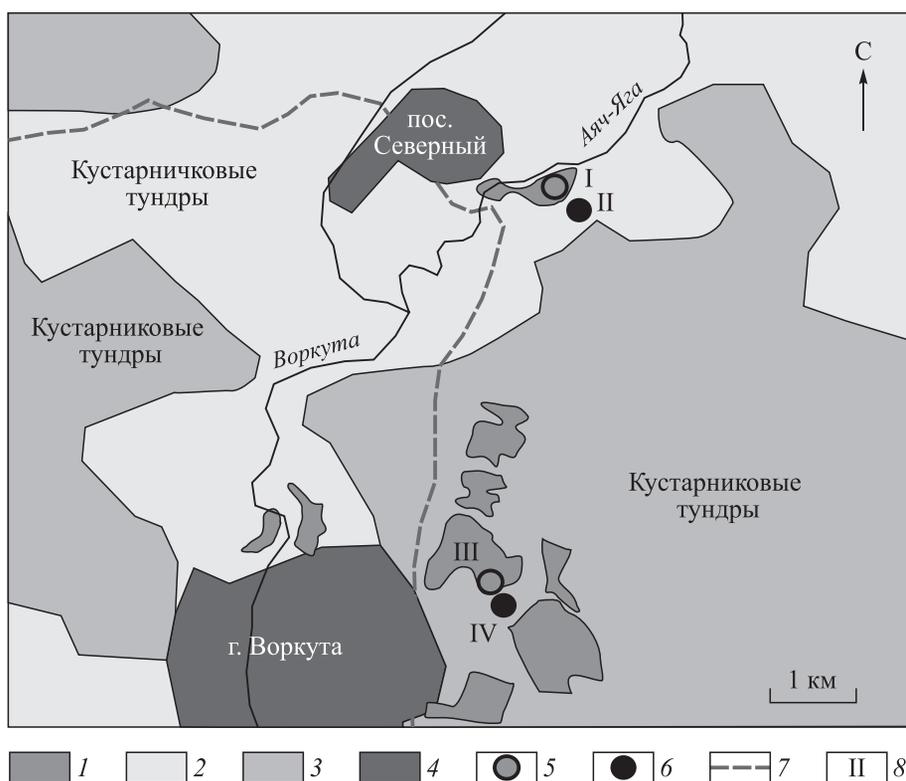


Рис. 1. Расположение объектов исследования.

1 — постагрогенные луговые биогеоценозы; 2 — кустарничковые тундры; 3 — кустарниковые тундры. 4 — населенные пункты. 5 — постагрогенные участки; 6 — целинные участки. 7 — автодорога. 8 — номера участков исследования.

Характеристика объектов исследования

Объект и показатель	Дренированный склон юго-восточной экспозиции приречного увала		Дренированная вершина водораздельного увала	
	участок			
	I (постагрогенный)	II (ненарушенный)	III (постагрогенный)	IV (ненарушенный)
Растительность	Разнотравно-красно-овсянищевый закустаренный луг	Мелкоерниковая травяно-кустарничковая моховая тундра	Разнотравно-мятликовый закустаренный луг	Ивняково-ерниковая кустарничково-моховая тундра
Почва	Агроглеезем криометаморфический	Торфяно-глеезем криометаморфический	Агроглеезем криометаморфический	Глеезем криометаморфический
Кустарниковый ярус				
Средняя высота, см	30 ± 25	30 ± 8	40 ± 50	125 ± 25
ПП, %	До 20	30–50	До 20	60–70
Видовой состав*	<i>Salix phylicifolia</i> (н), <i>Salix lanata</i> (н)	<i>Betula nana</i> (с), <i>Salix phylicifolia</i> (с), <i>Salix glauca</i> (с)	<i>Salix phylicifolia</i> (н), <i>Salix lanata</i> (р-н)	<i>Betula nana</i> (с), <i>Salix phylicifolia</i> (н-с), <i>Salix glauca</i> (н-с), <i>Salix lanata</i> (н-с)
Травяно-кустарничковый ярус				
Средняя высота, см	20 ± 10	20 ± 5	30 ± 5	20 ± 10
ПП, %	60–70	30–40	65–70	40
Видовой состав	<i>Festuca rubra</i> (с), <i>Calamagrostis neglecta</i> (н), <i>Poa pratensis</i> (н), <i>Alopecurus pratensis</i> (н), <i>Deschampsia cespitosa</i> (н), <i>Chaerophyllum prescottii</i> (н)	<i>Vaccinium uliginosum</i> (с-г), <i>Arctous alpina</i> (н-с), <i>Vaccinium myrtillus</i> (н), <i>Empetrum hermaphroditum</i> (н), <i>Carex arctisibirica</i> (н-с), <i>Calamagrostis neglecta</i> (н), <i>Festuca ovina</i> (н), <i>Poa pratensis</i> (н), <i>Poa alpina</i> (н)	<i>Poa pratensis</i> (с-г), <i>Alopecurus pratensis</i> (с), <i>Calamagrostis neglecta</i> (н), <i>Bistorta major</i> (н), <i>Rubus arcticus</i> (н)	<i>Empetrum hermaphroditum</i> (с), <i>Vaccinium myrtillus</i> (н), <i>Vaccinium uliginosum</i> (н), <i>Carex arctisibirica</i> (р-н)
Мохово-лишайниковый ярус				
Средняя высота, см	2	2	1	7
ПП, %	55	85	35	70
Видовой состав	<i>Pleurozium schreberi</i> (н), <i>Polytrichum strictum</i> (н)	<i>Pleurozium schreberi</i> (с-г), <i>Dicranum elongatum</i> (н), <i>Aulacomnium palustre</i> (р-н), <i>Polytrichum commune</i> (р-н), <i>Aulacomnium turgidum</i> (р-н), <i>Cladonia mitis</i> (н), <i>Cladonia rangiferina</i> (р-н)	<i>Pleurozium schreberi</i> (н), <i>Aulacomnium turgidum</i> (р-н)	<i>Pleurozium schreberi</i> (с), <i>Hylocomium splendens</i> (р-н), <i>Aulacomnium palustre</i> (р-н), <i>Polytrichum commune</i> (р-н), <i>Brachythecium turgidum</i> (р-н)

Примечание. * – приведены виды, имеющие наибольшие показатели по шкале господства [22]. ПП – проективное покрытие.

Все четыре участка удовлетворительно охватывают преобладающие типы растительных сообществ. Расположение участков в тождественных ландшафтных условиях позволяет рассмотреть специфику изменений растительного покрова постагрогенных биогеоценозов (участки I и III) в сравнении с их целинными аналогами (II и IV).

Геоинформационный анализ изменений растительного покрова на участках исследований проводили в программном пакете Erdas Imagine 2014 на основе растровых безоблачных спутниковых изображений Landsat-4 TM (1988), Landsat-5 TM (1986, 1987, 1989, 1994, 2009), Landsat-8 OLI (2016, 2017) разрешением 30 м/1 пиксель. Изображения отбирали для середины вегетационного периода (конец июля – первая половина августа) с 1986 по 2017 г. Отбор снимков произведен на основе наличия безоблачных изображений для участков исследований, в связи с чем в спектральном анализе используются снимки не всех лет. Выбраны спектральные индексы и каналы, наиболее эффективно

Таблица 2

Климатические параметры и индексы в сельскохозяйственный и постагрогенный периоды функционирования луговых биогеоценозов

Годы	Параметр			
	среднегодовая температура воздуха, °С	суммы положительных температур, °С·сут	суммы отрицательных температур, °С·сут	среднегодовое количество осадков, мм
1985–1999	–5,8	1018	–3097	499
2000–2008	–4,6	1171	–2826	527
2009–2017	–4,2	1182	–2661	587

отражающие изменения растительного покрова постагрогенных биогеоценозов. Для корректного сопоставления спектральных характеристик их значения рассчитаны в виде коэффициентов от 0 до 1.

Индекс LWCI (Leaf Water Content Index) использован для оценки содержания влаги в листьях: $LWCI = -\ln [1 - (B4 - B5)/255]$, где B4 – значение отражения в ближней инфракрасной, а B5 – в средней инфракрасной области спектра. Индекс NDMI (Normalized Difference Moisture Index) отражает общее содержание влаги в наземной фитомассе [21]: $NDMI = (B4 - B5)/(B4 + B5)$. Индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – количественный показатель фотосинтетической активности биомассы: $NDVI = (B4 - B3)/(B4 + B3)$, где B3 – значение отражения в видимой красной области спектра. Индекс PSRI (Plant Senescence Reflectance Index) оценивает общее количество отмершей (сухой) биомассы в биогеоценозах: $PSRI = (B4 - B2)/B5$, где B2 – значение отражения в видимой зеленой области спектра. Значения спектрального канала B3 показывают вегетационную активность растений, позволяя сравнивать области разреженной и сомкнутой растительности. Спектральный канал B5 чувствителен к содержанию воды в наземной биомассе растительности и верхнем горизонте почв.

Полевые исследования растительного покрова проводили в 2016 г., т. е. в период активизации самовосстановительной сукцессии тундровой растительности в постагрогенных биогеоценозах. Выполнено 44 описания на пробных площадках площадью 4 м². Участие видов в сложении сообществ оценивали по шкале господства В.С. Ипатова [22]: + – до 1 %; р – 2–3, р-н – 4–11, н – 12–25, н-с – 26–41, с – 42–57, с-г – 58–74, г – 75 % и более. В статье использованы усредненные показатели участия видов в каждом сообществе по серии площадок. Названия сосудистых растений даны в соответствии с [23].

Для расчетов климатических показателей использованы данные метеостанции Воркута (табл. 2). В работе рассчитывались среднегодовая температура воздуха, суммы положительных (СПТ) и отрицательных (СОТ) температур воздуха, индекс морозности воздуха, среднегодовая сумма осадков, суммы летних и зимних осадков. Сравнительный анализ климатических показателей проводили для сельскохозяйственного (1986–1999 гг.) и постагрогенного (2000–2017 гг.) периодов функционирования луговых биогеоценозов. В рамках постагрогенного периода рассматривались этапы относительно устойчивого функционирования (2000–2008 гг.) и активизации самовосстановительной сукцессии тундровой растительности (2009–2017 гг.) (рис. 2).

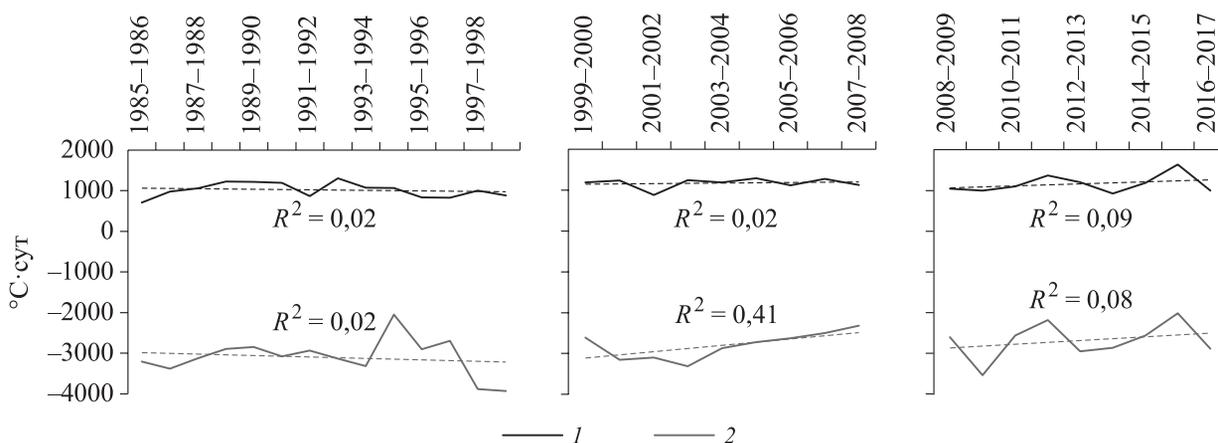


Рис. 2. Тренды изменения сумм положительных и отрицательных температур воздуха в 1985–2017 гг.

Суммы температур, °С·сут: 1 – положительных, 2 – отрицательных.

Статистический анализ между климатическими и спектральными параметрами проводили в программах Microsoft Excel 2010 и пакете R [24]. Взаимосвязи данных характеристик оценивали при помощи непараметрического метода — ранговой корреляции Спирмена [25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Климат. Период 1986–1999 гг. в целом был холоднее и суше по сравнению с 2000–2017 гг. (см. табл. 2). В последние десятилетия XX в. динамика сумм положительных и отрицательных температур воздуха в регионе не обнаруживала четких трендов ($R^2 = 0,02$). На протяжении 2000–2017 гг. наблюдалось постепенное повышение как летних, так и особенно зимних температур воздуха (см. рис. 2, табл. 2). При этом наиболее выраженное смягчение зимнего климата происходило в 2000–2008 гг., которое продолжилось и в последующие 2009–2017 гг. Проведенные мониторинговые исследования на участке II показывают устойчивый положительный тренд ($R^2 = 0,53$; $y = 2,4141x + 25,148$) увеличения высоты снежного покрова в 2000–2017 гг. [26].

Растительный покров. Целинные (фоновые) участки II и IV, расположенные в неодинаковых ландшафтных условиях, имеют как сходства, так и различия (см. табл. 1). Эти участки являются источником инвазии тундровых видов в исследуемые постагрогенные сообщества. Видовой состав кустарникового яруса сходный: в обоих сообществах преобладает карликовая береза (*Betula nana* L.) со значительной примесью ивы филиколистной (*Salix phylicifolia* L.), серо-голубой (*S. glauca* L.) и шерстистой (*S. lanata* L.). Высота кустарникового яруса участка II значительно ниже таковой на участке IV (см. табл. 1), различается и их общее проективное покрытие: 30–50 и 60–70 % соответственно. Видовой состав травяно-кустарничкового яруса близок, значительно обилие у голубики (*Vaccinium uliginosum* L.), черники (*V. myrtillus* L.), вороники (*Empetrum hermafroditum* (Lange) Nagegub), толокнянки альпийской (*Arctous alpina* (L.) Nied.), что создает фон яруса обоих тундровых участков. Травы на участке II развиты в отдельных синузиях, иногда достигают уровня содоминантов наравне с кустарничками. Таковы осока арктико-сибирская (*Carex arctisibirica* (Jurtz.) Czer.), вейник незамечаемый (*Calamagrostis neglecta* (Ehrh.) Gaertn.), овсяница овечья (*Festuca ovina* L.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), мятлик альпийский (*Poa alpina* L.). На участке IV большинство видов трав встречается единично. В напочвенном покрове обоих участков преобладает плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.), его постоянными спутниками являются аулакомниум болотный (*Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwägr.) и политрихум обыкновенный (*Polytrichum commune* Hedw.), менее обильны дикранум удлиненный (*Dicranum elongatum* Schleich.), аулакомниум вздутый (*Aulacomnium turgidum* (Wahlenb.) Schwägr.), гилокомиум блестящий (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.), брахитециум вздутый (*Brachythecium turgidum* (Hartm.) Kindb.). На участке II заметную роль в сложении яруса играют лишайники кладония мягкая (*Cladonia mitis* Sandst.) и кладония оленья (*C. rangiferina* (L.) F.H. Wigg.).

Сельскохозяйственное освоение тундровых биогеоценозов на исследуемых участках сопровождалось созданием в 1970–1980-х гг. сеяных сенокосных лугов. Производили посев смеси двух злаков — местных форм мятлика лугового и лисохвоста лугового (*Alopecurus pratensis* L.), впоследствии доминировавших в растительных сообществах участков I и III, вплоть до снятия агоррежима. С 1997 г. внесение удобрений было приостановлено, уборку урожая проводили нерегулярно и в 2000-е гг. прекратили совсем. Сеяные луга перешли в стадию постагрогенных биогеоценозов. Обилие, сомкнутость и жизнеспособность (жизнеспособность и степень развития растений) высеванных трав существенно снизились. Началось возрастание обилия и доли в фитомассе сопутствующих видов, внедрение видов из естественных тундровых биогеоценозов, преимущественно ив, разнотравья, мхов и пионерных лишайников.

Благодаря близкому расположению поймы и надпойменных террас в сообществе лугового участка I доминантом становится овсяница красная (*Festuca rubra* L.). Комплекс содоминантов данного биогеоценоза включает в себя как внедрившиеся вейник незамечаемый и щучку дернистую (*Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv.), так и сеяные злаки мятлик луговой и лисохвост луговой, крупными синузиями встречается бутень Прескотта (*Chaerophyllum prescottii* DC).

Растительное сообщество лугового участка III находится на значительном удалении от речных долин, а в близлежащих тундровых сообществах пока не обнаружены виды, способные составить серьезную конкуренцию высеванным злакам. Смены доминанта здесь не происходит, комплекс содоминантов аналогичен таковому участка I (см. табл. 1).

Разнотравный компонент обоих луговых сообществ сходен по видовому составу и представлен преимущественно видами травяного яруса, характерными для травяного яруса травяно-кустарничковых или травяно-моховых тундр и тундровых луговин: горец большой (*Bistorta major* S.F. Gray), виды рода

лютик (*Ranunculus*), хвощ полевой (*Equisetum arvense* L.), белокопытник холодный (*Petasites frigidus* (L.) Fries), сердечник луговой (*Cardamine pratensis* L.), герань белоцветковая (*Geranium albiflorum* Ledeb.), княженика (*Rubus arcticus* L.) и др. Почти все они встречаются единично или рассеяно, существенно не меняя облика фитоценоза. Однако с 2009 г. на участках I и III активизировалось формирование кустарникового яруса из ив и карликовой березы, а также мохового покрова из плевроциума Шребера, аулакомниума болотного, политрихума сжатого (*Polytrichum strictum* Brid.). В настоящее время высота и сомкнутость (менее 0,2) кустарникового яруса пока существенно ниже таковых целинных участков.

Спектральные индексы. В фоновых биогеоценозах спектральные значения индексов LWCI, NDMI, NDVI выше в кустарниковой тундре по сравнению с кустарничковой (рис. 3). При этом наибольшие различия (в 1,5 раза выше) отмечаются по индексам, характеризующим содержание влаги в растениях. Различия значений индекса PSRI между фоновыми биогеоценозами невысокие (0,01). Биогеоценоз кустарничковой тундры показывает большие спектральные значения в диапазоне канала B5 (см. рис. 3). На участках естественных биогеоценозов за весь период исследований (1986–2017 гг.) наиболее выраженные линии тренда наблюдаются для значений канала B5 ($R^2 = 0,04–0,7$).

В луговых биогеоценозах спектральные значения LWCI, NDMI были максимальны во второй половине 1980-х гг. — $0,14 \pm 0,06$ и $0,26 \pm 0,07$ соответственно, в 2000-е гг. они снизились. Аналогичная ситуация наблюдается и с индексом NDVI (см. рис. 3). Для всех трех данных индексов в луговом биогеоценозе участка I наблюдаются выраженные тренды снижения спектральных значений ($R^2 = 0,6$) на протяжении всего периода исследований (1986–2017 гг.). Спектральные значения PSRI в луговом биогеоценозе были минимальны в 1980-е гг. и постепенно увеличивались в последующие годы, показывая устойчивый положительный тренд ($R^2 = 0,4–0,5$). В период исследований в луговых биогеоценозах наблюдается постепенное повышение значений спектрального канала B3 ($R^2 = 0,4$). В 1980–1990-е гг. луговые биогеоценозы характеризовались повышенными значениями канала B5 по сравнению с фоновыми. В 2000–2010-е гг. спектральные значения B5 приблизились к таковым кустарничковой тундры участка II.

В целом значения спектральных индексов луговых биогеоценозов превышают таковые для фоновых. Наибольшее превышение спектральных значений для луговых биогеоценозов ($0,15 \pm 0,05$) по сравнению с фоновыми ($0,09 \pm 0,03$) зафиксировано для индекса LWCI. Для луговых биогеоценозов

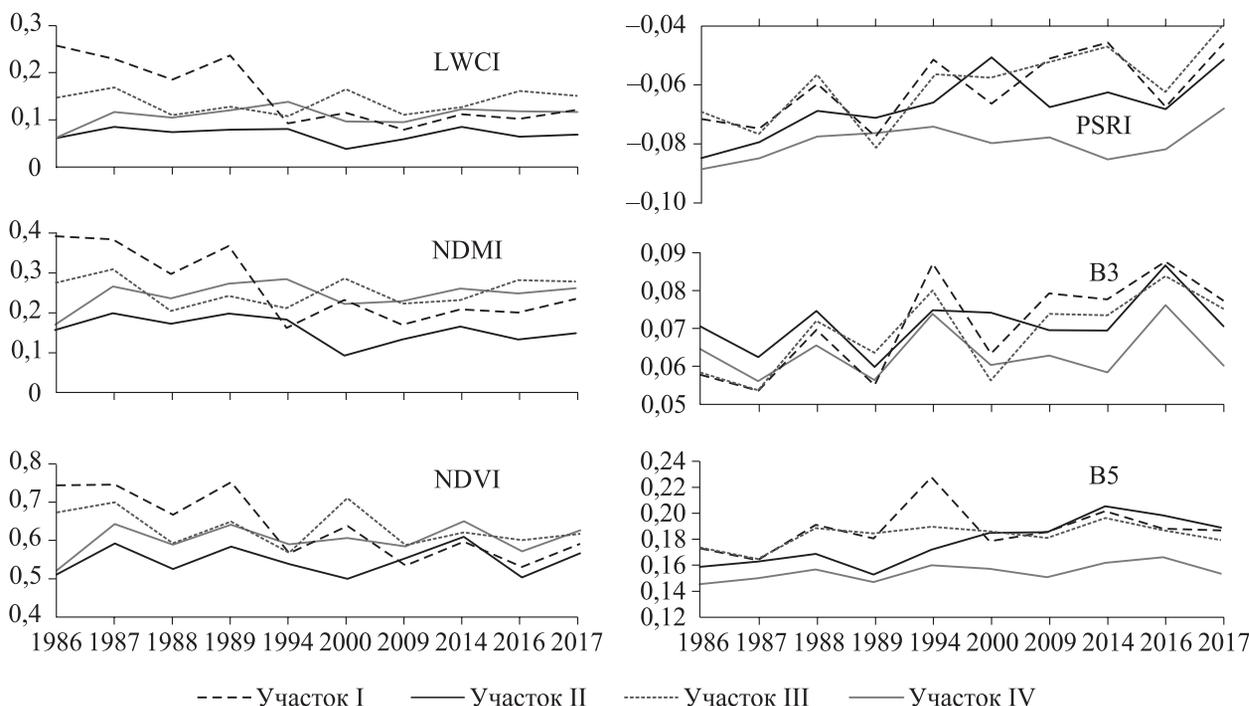


Рис. 3. Динамика значений спектральных индексов и каналов.

I–IV — номера участков исследования.

спектральные индексы показывают более высокие коэффициенты вариации ($K_{var} = 19 \pm 4 \%$), по сравнению с таковыми для фоновых биогеоценозов ($K_{var} = 17 \pm 4 \%$). Наибольшие значения K_{var} ($>20 \%$) характерны для индексов LWCI и NDMI. Наименьшие вариации спектральных значений ($K_{var} < 11 \%$) выявлены для NDVI и канала 5.

Спектральные значения индексов достаточно четко отражают различия между естественными кустарниковыми и мохово-лишайниковыми тундровыми сообществами. Высокий объем фитомассы кустарниковых тундр выявляется по спектральным значениям индексов, отражающих содержание влаги и вегетационную активность фитомассы. Биогеоценозы участков приречного увала (I и II) отличаются повышенными спектральными значениями B5 в сравнении с участками на водораздельном увале (III и IV). Это объясняется их меньшей дренированностью и, соответственно, большей увлажненностью почв. Постепенное повышение показателей канала B5 для естественных биогеоценозов отражает увеличение увлажнения почвенно-растительного покрова.

В период самовосстановительной сукцессии растительного покрова (2000–2017 гг.) значения исследуемых спектральных индексов постагрогенных биогеоценозов постепенно приближались к таковым для фоновых биогеоценозов (см. рис. 2). После снятия агрорежима в растительных сообществах происходило изреживание сеяного злакового травостоя и постепенное внедрение видов из соседних ненарушенных сообществ. Снижение спектральных значений индексов, отражающих содержание влаги и фотосинтетическую активность фитомассы растений (LWCI, NDMI, NDVI) в постагрогенный период, обусловлено прекращением внесения удобрений. Значения индексов NDVI хорошо коррелируют с индексами влажности фитомассы растений ($r = 0,6-0,7$, $p < 0,001$). Постепенное повышение значений индекса PSRI в 1990-е гг. объясняется нерегулярным сенокосением и его полным прекращением в постагрогенный период, в результате чего происходило накопление отмершей фитомассы (очеса), которая ранее отчуждалась при сенокосении, достигая 65–70 % общей наземной фитомассы [27].

Снижение спектральных значений канала B3 в 2000 г. на участках I и III диагностирует прекращение их сельскохозяйственного использования (см. рис. 3). Значения B3 в 1990–2000-е гг. на участке I оставались выше таковых для участка III, с 2009 г. они начали сближаться, что связано со снижением роли доминантов мятлика лугового и лисохвоста лугового и формированием тождественного видового состава субдоминантов. Повышение значений канала B3 сопровождается снижением значений индекса NDVI, что выявляет постепенное уменьшение фотосинтетической активности растений при снижении доли злаков, обладающих максимальным проективным содержанием хлорофилла в тундре [25]. Относительно высокие спектральные значения канала B5 луговых биогеоценозов в сельскохозяйственный период объясняются уменьшением поглощения влаги травянистой растительностью при ее регулярном сенокосении.

Определенное влияние на динамику спектральных показателей, характеризующих состояние растительности, оказывают и климатические параметры. Тренды увеличения летних и зимних температур воздуха, отражающие потепление климата, более заметны в 2000–2017 гг. (см. рис. 2, табл. 2). Увеличение высоты снежного покрова способствует повышению температуры почвогрунтов, что создает более благоприятные условия для закустаривания тундры [5, 28].

При анализе статистических взаимосвязей между климатическими и спектральными параметрами наиболее сильные отрицательные коэффициенты корреляции ($r = -0,67...-0,43$) наблюдаются между суммами зимних осадков и значениями канала 5 (рис. 4). Данная взаимосвязь может объясняться более глубоким промерзанием почв при меньшей высоте снежного покрова и, соответственно, более длительным их летним протаиванием при сохранении влаги в почве.

При анализе влияния осадков на значения спектральных индексов установлено, что увеличение количества зимних осадков в луговом биогеоценозе участка I способствует увеличению значений индексов (LWCI, NDMI, NDVI), отражающих обеспеченность растений влагой и их фотосинтетическую активность. Аналогичная ситуация наблюдается в луговом биогеоценозе дренированного участка III, где влияющими климатическими параметрами становятся летние осадки (см. рис. 4). В естественных биогеоценозах обеспеченность почвенно-растительного покрова влагой (канал B5) возрастает при повышении среднегодовых и зимних температур, что может быть связано с активизацией протаивания сезонно- и многолетнемерзлых горизонтов. Очевидно, это связано с высокой чувствительностью мерзлотных почв региона к изменению климатических параметров [20].

Комбинированное использование индексов NDVI и LWCI, позволяющее дифференцировать сообщества в группы по запасам биомассы и условиям увлажнения, может быть использовано для сопоставления рядов сукцессионных смен тундровой растительности [29].

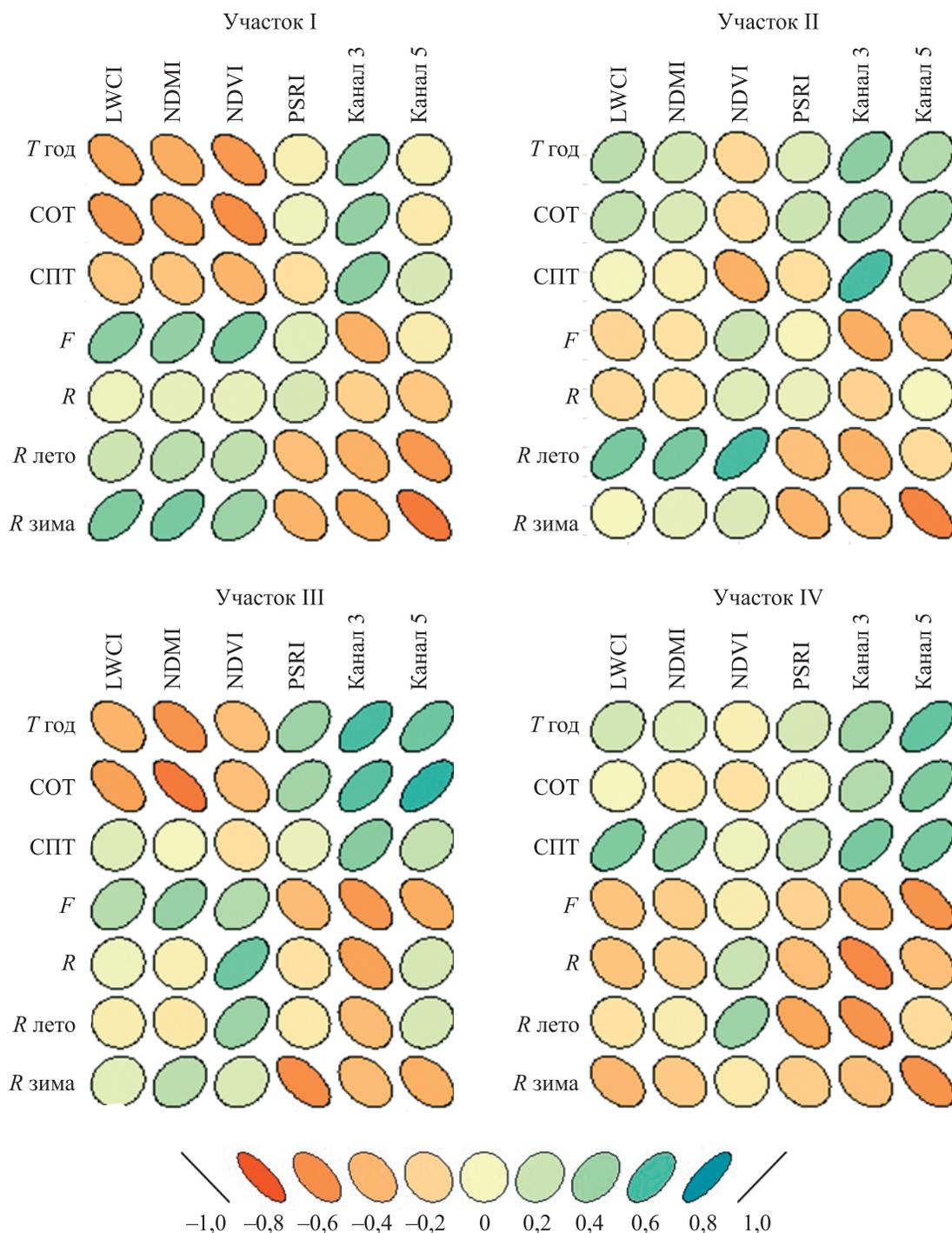


Рис. 4. Коэффициенты корреляции Спирмена между спектральными и климатическими показателями.

Тгод — среднегодовая температура; СОТ — сумма отрицательных температур воздуха; СПТ — сумма положительных температур воздуха; F — индекс морозности воздуха; R — годовое количество осадков; R лето — сумма летних осадков; R зима — сумма зимних осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ дистанционных спектральных индексов — один из эффективных методов оценки изменений растительного покрова постагрогенных биогеоценозов южной тундры. Луговые биогеоценозы, по сравнению с фоновыми, при сельскохозяйственном использовании отличались относительно высокими значениями индексов, характеризующих влажность поверхности почв (B5) и растительной фитомассы (LWCI, NDMI), ее фотосинтетическую активность (NDVI). Значения индекса PSRI, оценивающего количество отмершей биомассы, при регулярном сенокосении минимальны. На протяжении постагрогенного периода в луговых биогеоценозах наблюдалось снижение значений LWCI, NDMI и NDVI, повышение значений PSRI и спектрального канала B3. В постагрогенный период значения рассмотренных спектральных индексов в луговых биогеоценозах постепенно приближались к таковым окружающих фоновых участков.

Динамика спектральных индексов постагрогенных биогеоценозов обусловлена изменениями видового состава растительного покрова. После прекращения сельскохозяйственного использования сеяных лугов активизируется самовосстановительная сукцессия естественной тундровой растительности. Изреживается травостой высеянных злаков мятлика лугового и лисохвоста лугового, из окружающих сообществ внедряются виды, сменяющие доминанты или становящиеся субдоминантами, формируется кустарниковый ярус (ивы, карликовая береза).

Определенный вклад в динамику спектральных индексов вносит изменение климатических параметров в регионе. В период исследований происходило постепенное увеличение зимних и летних температур воздуха, а также количества осадков. Анализ статистических взаимосвязей между климатическими и спектральными параметрами показал, что увеличение количества зимних осадков способствует снижению значений спектрального канала 5, чувствительного к содержанию воды в надземной биомассе растительности и верхнем горизонте почв. Повышение количества летних и зимних осадков способствует увеличению значений индексов LWCI, NDMI и NDVI в постагрогенных биогеоценозах, что отражает обеспеченность растений влагой и их фотосинтетическую активность.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН (AAAA-A17-117122290011-5) и программы циркулярного мониторинга деятельного слоя (Circumpolar Active Layer Monitoring) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (20-34-70005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геомадика. — 2009. — № 3. — С. 28–32.
2. Kushida K., Hobar S., Tsuyuzaki S., Watanabe M., Harada K., Kim Y., Shaver G.R., Fukuda M. Spectral indices for remote sensing of phytomass, deciduous shrubs, and productivity in Alaskan Arctic tundra // International Journal of Remote Sensing. — 2015. — Vol. 36, issue 17. — P. 4344–4362.
3. Савиных В.П., Цветков В.Я. Геоинформатика как система наук // Геодезия и картография. — 2013. — № 4. — С. 52–57.
4. Оберман Н.Г., Шеслер И.Г. Современные и прогнозируемые изменения мерзлотных условий европейского северо-востока Российской Федерации // Проблемы Севера и Арктики Российской Федерации: Науч.-информ. бюл. — 2009. — Вып. 9. — С. 96–106.
5. Елсаков В.В., Кулюгина Е.Е. Растительный покров Югорского полуострова в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Исследование Земли из космоса. — 2014. — № 3. — С. 65–77.
6. Панченко Е.Г., Станюковская Ю.В. Спектральный и морфометрический анализ полигонально-жилных структур в Чарской котловине // Arctic Environmental Research. — 2017. — № 3. — С. 185–194.
7. Арчегова И.Б., Панюков А.Н., Андрианов В.А. Возможности и экономическая целесообразность сельского хозяйства в тундре // Север и рынок: формирование экономического порядка. — 2013. — № 1. — С. 12–15.
8. Котелина Н.С., Арчегова И.Б., Иванов В.А., Назарова В.И. Производство кормов в условиях Крайнего Севера // Вестн. сельскохоз. наук. — 1985. — № 7. — С. 78–83.
9. Панюков А.Н. Восстановительная сукцессия на залежах в условиях восточноевропейской тундры // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. — 2013. — № 8, ч. 2. — С. 235–238.
10. Ковалева В.А., Денева С.В., Панюков А.Н. и др. Почвенные грибы как компоненты постагрогенных фитоценозов в тундре // Вестн. Ин-та биологии Коми науч. центра УрО РАН. — 2017. — № 3. — С. 7–14.
11. Новаковский А.Б., Панюков А.Н. Анализ сукцессионной динамики сеяного луга при помощи системы жизненных стратегий Раменского–Грайма // Экология. — 2018. — № 2. — С. 1–9.

12. **Арчегова И.Б.** Термический режим тундровых почв в условиях освоения и восстановления естественной растительности // Почвоведение. — 2007. — № 8. — С. 954–960.
13. **Hatfield J.L., Prueger J.H.** Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices // Remote Sens. — 2010. — N 2. — P. 562–578.
14. **Pattison R., Jorgenson J., Reynolds M.** Trends in NDVI and tundra community composition in the Arctic of NE Alaska between 1984 and 2009 // Ecosystems. — 2015. — N 18. — P. 707–719.
15. **Геокриологическая карта СССР.** М-б 1:2 500 000 / Ред. Е.Д. Ершова, К.А. Кондратьева. — Винница: Карг. предприятие, 1997. — 16 л.
16. **Карта четвертичных образований территории Российской Федерации.** М-б 1:2 500 000 / Отв. ред. А.С. Застрожных. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. — 1 л.
17. **Огуреева Г.Н.** Ботанико-географическое районирование СССР. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. — 188 с.
18. **Хантимер И.С.** Сельскохозяйственное освоение тундры. — Л.: Наука, 1974. — 227 с.
19. **Атлас почв Республики Коми** / Под ред. Г.В. Добровольского, А.И. Таскаева, И.В. Забоевой. — Сыктывкар: Коми республиканская типография, 2010. — 356 с.
20. **Мажитова Г.Г.** Температурные режимы почв в зоне несплошной многолетней мерзлоты европейского северо-востока России // Почвоведение. — 2008. — № 1. — С. 54–67.
21. **Goodwin N.R., Coops N.C., Wulder M.A., Gillanders S., Schroeder T.A., Nelson T.** Estimation of insect infestation dynamics using a temporal sequence of Landsat data // Remote Sensing Environment. — 2008. — N 112. — P. 3680–3689.
22. **Ипатов В.С.** Описание фитоценоза (методические рекомендации). — СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. ун-та, 1998. — 94 с.
23. **Черепанов С.К.** Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). — СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. ун-та, 1995. — 992 с.
24. **Новаковский А.Б.** Взаимодействие Excel и статистического пакета R для обработки данных в экологии // Вестн. Ин-та биологии Коми науч. центра УрО РАН. — 2016. — № 3. — С. 26–33.
25. **Лакин Г.Ф.** Биометрия. — М.: Высш. шк., 1990. — 352 с.
26. **Каверин Д.А., Пастухов А.В., Новаковский А.Б.** Динамика глубины сезонного протаивания тундровых мерзлотных почв (на примере площадки циркумполярного мониторинга деятельного слоя в Европейской России) // Криосфера Земли. — 2017. — Т. 21, № 6. — С. 35–45.
27. **Экологические принципы природопользования и природовосстановления на Севере** / Ред. И.Б. Арчегова. — Сыктывкар: Изд-во Коми науч. центра УрО РАН, 2009. — 176 с.
28. **Елсаков В.В.** Материалы спутниковых съемок в анализе значений хлорофилльного индекса тундровых фитоценозов // Исследование Земли из космоса. — 2013. — № 1. — С. 60–70.
29. **Елсаков В.В., Плюснин С.Н., Шанов В.М.** Технологии дистанционного зондирования в исследовании свойств растительных сообществ бассейна р. Новая Нерута // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2006. — Вып. 3, т. 2. — С. 315–319.

Поступила в редакцию 30.03.2020

После доработки 21.01.2021

Принята к публикации 13.10.2021