Современная динамика природной и антропогенной растительности зоны предтундровых лесов Западной Сибири по данным вегетационного индекса

А. А. Тигеев, Д. В. Московченко, А. В. Фахретдинов

Институт проблем освоения Севера СО РАН ТюмНЦ СО РАН
Тюмень, 625026, Россия
E-mails: ttrruubbaa@mail.ru, moskovchenko@hotbox.ru, arthurfahretdinov@gmail.com

Для оценки современной динамики растительных сообществ на севере таёжной зоны Западной Сибири с использованием продукта MOD13A1 были определены значения индекса NDVI за период 2000–2020 гг. Значения индекса были подсчитаны для 77 точек на территории г. Надым и 57 точек на фоновом участке. В результате дешифрирования снимков и натурных наблюдений были определены классы растительности, для которых проведена оценка средних и максимальных значений NDVI, а также оценка зависимости NDVI от метеопараметров. На ненарушенной территории наибольшие значения NDVI отмечены в лесных сообществах, минимальные — в болотных. В зелёной зоне Надыма величины NDVI близки к величинам для фоновых участков, в промышленной зоне количество зелёной фитомассы минимально. На внутригодовую динамику индекса влияют метеорологические флуктуации, в частности кратковременные вторжения холодного арктического воздуха, вызывающие снижения индекса в последующий несколько недель. По данным корреляционного анализа, величина NDVI зависит от нескольких факторов, перечисленных в порядке уменьшения значимости: высоты снежного покрова в течение прошедшей зимы, количества летних осадков, температуры воздуха в ходе вегетационного периода. Анализ межгодовой динамики показал, что вследствие роста температуры воздуха и увеличения высоты снежного покрова значения NDVI как в городе, так на фоновом участке увеличиваются. Картографирование выявило, что рост значений NDVI за период 2000–2020 гг. наиболее сильно выражен для лесов поймы р. Надым. Тренды роста NDVI статистически значимы с высоким уровнем достоверности ($\alpha = 0{,}01$), что подтверждает современное «позеленение» приполярных регионов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, корреляционный анализ, индекс вегетации, динамика растительного покрова, климатогенные изменения экосистем

Одобрена к печати: 11.08.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177

Введение

Современная климатогенная и антропогенная динамика растительного покрова на севере Западной Сибири привлекает внимание многочисленных российских и зарубежных исследователей (Дегерменджи и др., 2020; Зуев и др., 2019; Esau et al., 2016; Walker et al., 2009). Причиной этого выступают значительные изменения климатических показателей в последние десятилетия, ключевая роль растительности региона в стабилизации температурного режима многолетнемёрзлых пород (ММП) и поддержании баланса парниковых газов, а также постоянный рост техногенной нагрузки, связанный с разработкой месторождений углеводородов. При анализе динамики растительности исследователи часто используют дистанционные методы, позволяющие объективно оценить происходящие изменения и обладающие такими достоинствами, как охват больших территорий, высокая оперативность, возможность многократно наблюдать исследуемые участки, достоверность и простота получения информации (Бондур, 2010). Эффективным инструментом для оценки пространственных и временных изменений растительного покрова выступает космический мониторинг, и в частности использование вегетационных индексов (Зуев и др., 2019). Наиболее широкое применение нашёл нормализованный разностный вегетационный индекс — NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), который характеризует количество фотосинтетически активной

биомассы. Анализ значений NDVI по разновременным снимкам позволяет получить динамическую картину процессов изменения границ и характеристик растительности, в том числе и связанную с глобальными климатическими изменениями (Walker et al., 2012). Таким образом, определение трендов динамики растительности на основании подсчёта вегетационных индексов с учётом особенностей растительности становится актуальной задачей, позволяющей дать прогноз дальнейших климатогенных изменений экосистем.

В последние два десятилетия было проведено множество исследований, нацеленных на изучение межгодовых трендов NDVI в полярных и субполярных регионах. Как правило, проведённые исследования констатируют тенденцию к росту значений NDVI (Варламова, Соловьев, 2014; Дегерменджи и др., 2020; Зуев и др., 2019; Epstein et al., 2012). Анализ межгодовых суммарных трендов изменений индекса показал, что в тундрах европейского северо-востока России 78,7 % площади характеризуется ростом значений NDVI (Елсаков, Телятников, 2013). Однако другие исследования не подтверждают увеличение фитомассы. На п-ове Ямал за 26 лет спутниковых наблюдений с использованием снимков AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer) не выявлено значимых трендов в динамике NDVI (Walker et al., 2009). В Большеземельской тундре (Ненецкий АО) был отмечен устойчивый тренд к падению величин NDVI за последние два десятилетия (Иванова, 2019). По данным исследования (Scott et al., 2005), за период 1981–2003 гг. в тундрах Северной Америки на 62,4 % территории не обнаружено статистически значимого тренда изменений фотосинтетически активной фитомассы. Отмечено, что максимальных значений в зоне тайги Западной Сибири NDVI достигал в 1997 г., а в зоне тундры — в 2001 г., после чего в обеих природных зонах наблюдалось снижение абсолютных значений индекса (Зуев и др., 2019). Разночтения в оценке трендов косвенно свидетельствуют, что реакция фитоценозов на климатические изменения — процесс сложный, зависящий от множества факторов, по-разному проявляющийся в различных растительных сообществах.

Одним из участков, где динамика растительности и геокриологических условий проявляется наиболее интенсивно, выступает Надымский р-н. Здесь под влиянием роста температуры воздуха на 0,04 °С в год отмечено увеличение мощности сезонноталого слоя, повышение температуры ММП, появление на торфяниках древесных растений, увеличение высоты и встречаемости кустарников и покрытия ими поверхности почвы (Москаленко, 2009). В связи с увеличением в последние десятилетия количества атмосферных осадков на плоских заболоченных участках кустарничково-лишайниково-сфагновые редины замещаются кустарничково-пушицево-осоково-сфагновыми талыми болотами (Москаленко, 2012). Отмечено внедрение более южных растений во флору населённых пунктов района (Письмаркина, 2019; Esau, Miles, 2016). Таким образом, растительность этого участка может быть использована в качестве индикатора климатических изменений.

Задачи исследования — определить тренды изменения межгодовых значений NDVI на ключевых участках в Надымском р-не, выявить зависимость NDVI от метеопараметров, оценить статическую значимость трендов, выявить растительные сообщества, в максимальной степени реагирующие на климатические изменения.

Район исследований

Город Надым расположен на 65° с. ш., примерно в 100 км к югу от полярного круга. Климат — континентальный субарктический с продолжительной зимой и коротким летом. По данным метеостанции Надым, за период 1955–2020 гг. среднегодовая температура воздуха составила –5,5 °С. Период с отрицательными температурами воздуха длится более 7 мес — с начала октября до середины мая. Ранее данную территорию относили к южной границе зоны сплошного распространения ММП (Геокриология..., 1989), на современном этапе — к зоне островного распространения ММП, где острова мерзлоты приурочены к болотам, торфяникам и буграм пучения (Васильев и др., 2020). Надым расположен на крайнем пределе таёжной зоны, в подзоне предтундровых редколесий (Ильина и др., 1985). Растительный покров представлен

сообществами лиственничных редколесий и редкостойных лесов в комплексе с плоскобугристыми ерниково-кустарничково-лишайниковыми и низинными травяно-сфагновыми болотами. В настоящее время в Надыме проживает 44,8 тыс. человек, площадь города составляет 185 км^2 (http://www.nadymregion.ru/activity/economics/nadym-number.php).

Материалы и методы

Вычисление NDVI проведено по данным спектрорадиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) — одного из ключевых инструментов на борту американских спутников Terra и Aqua серии EOS (*англ.* Earth Observing System). Был использован продукт MOD13A1 версии 6 с пространственным разрешением 500 м, который для каждого пикселя снимка содержит значения индекса растительности за 16-дневный период. Космоснимки были получены с сайта Геологической службы США (*англ.* United States Geological Survey — USGS). Обработка была выполнена в программной оболочке QGIS-3.12. Было выбрано два ключевых участка: на территории города и вне его, на условно-фоновой территории с высокой сохранностью растительности (*рис. 1*).

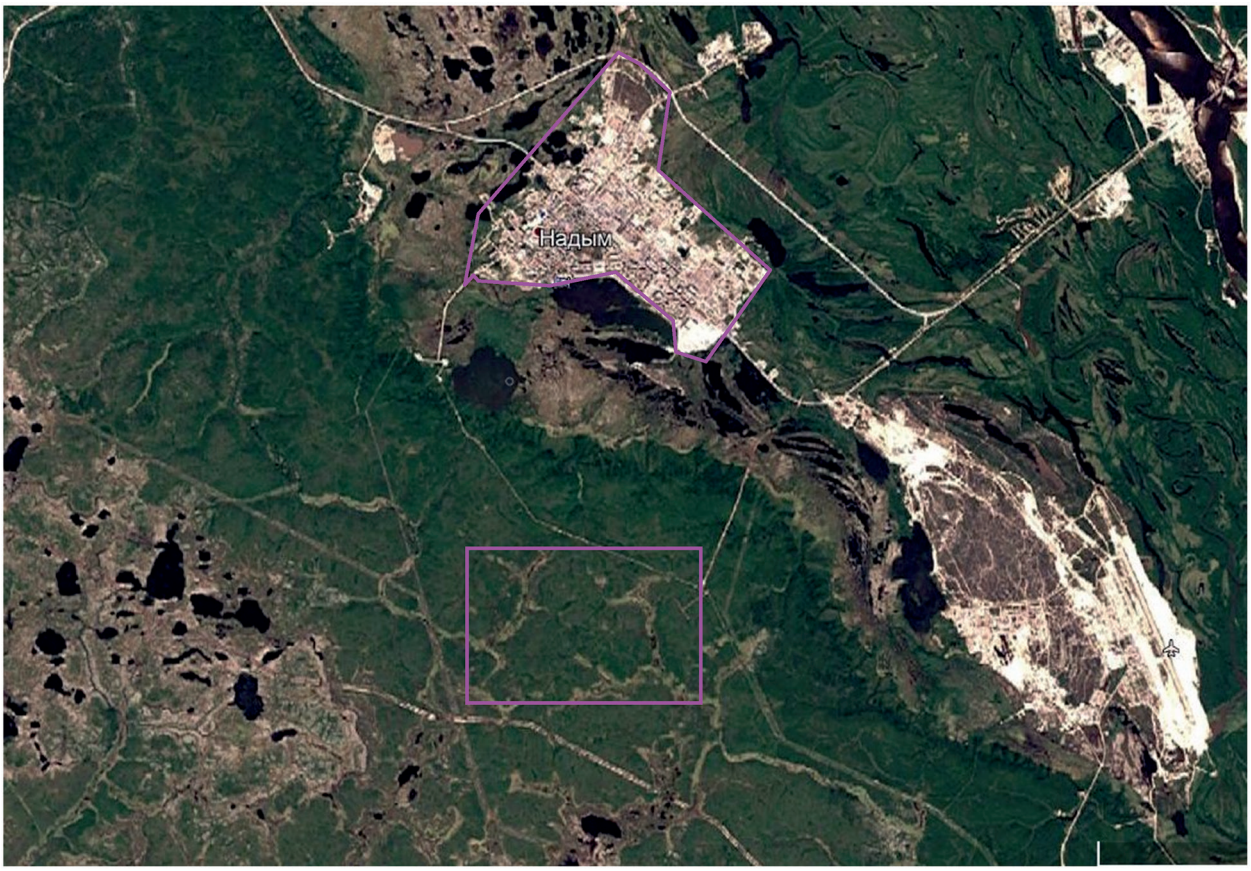

Рис. 1. Схема размещения ключевых участков (город, фоновый участок)

Для подсчётов NDVI на каждом участке по сетке были расставлены точечные объекты, каждый из которых соответствовал определённому пикселю на снимке. Всего были обработаны данные с 77 точек-пикселей на территории Надыма и 57 точек на фоновом участке за 21 год наблюдений: с 2000 по 2020 г. При расстановке точек-пикселей учитывалась их принадлежность к классу пространственных объектов. На фоновом участке с использованием снимка сверхвысокого разрешения сервиса Google Планета Земля (*англ.* Google Earth) и данных наземных полевых исследований были выделены леса, тундры и болота. Данные типы

растительности имеют отчётливые дешифровочные признаки и достоверно различаются на снимках высокого и сверхвысокого разрешения (Корниенко, Якубсон, 2011). По данным натурных наблюдений, лесная растительность фонового участка представлена лиственнично-сосновыми кустарничково-зеленомошными и кустарничково-лишайниковыми сообществами. Тундровые фитоценозы — ерниково-кустарничково-мохово-лишайниковые, болота преимущественно кустарничково-пушицево-осоково-сфагновые. В городе по снимкам сверхвысокого разрешения аналогичным образом были выделены основные функциональные зоны: участки жилой застройки, промзоны, зелёные зоны. В тех случаях, когда в пикселе из-за больших пространственных размеров (500×500 м) присутствовали различные классы объектов, отнесение к тому или иному классу проводилось по доминирующему из них (занимающему максимальную площадь).

Подсчёты NDVI в каждый год выполнены для девяти временных интервалов, начиная с третьей декады мая по третью декаду сентября, что соответствует вегетационному периоду. Были подсчитаны средние для каждого года значения за период вегетации ($NDVI_{mean}$) и максимальные летние значения ($NDVI_{max}$), оценена достоверность различий между разными выборками с использованием *t*-теста. $NDVI_{max}$ с высокой точностью индицирует количество наземной биомассы (Raynolds et al., 2012), что делает его весьма эффективным для оценки изменений растительного покрова.

Для оценки зависимости вегетационных индексов от климатических показателей было проведено сопоставление полученных значений NDVI с метеопараметрами, полученными из архивов станции Надым. Были рассчитаны коэффициенты корреляции между значениями NDVI и средней за вегетационный период температурой воздуха, температурой отдельных месяцев, количеством осадков в сумме и помесячно, высотой снежного покрова за предшествующий зимний период. Достоверность межгодовых трендов NDVI и метеопараметров была оценена с использованием теста Манна – Кендалла (Mann-Kendall trend test), реализованного в оболочке программы Excel (https://en.ilmatieteenlaitos.fi/makesens).

Результаты и обсуждение

Обобщение данных за период 2000–2020 гг. показало, что максимальные величины показателя NDVI за вегетационный сезон как в городских условиях, так и на фоновой территории приходятся на первую половину июля. В отдельные годы (2003, 2006, 2007, 2011, 2018) наблюдалось снижение величин в третьей декаде июля, после чего в августе снова происходило возрастание. Вследствие этого обобщённый за 21 год наблюдений график сезонного хода значений NDVI (*рис. 2*) не совпадает с обычным «куполообразным» распределением, когда кривая величин NDVI согласуется с кривой хода температуры, достигающей пика в июле. Снижение в середине лета на фоновом участке выражено сильнее, чем в городе. Оценка сезонного хода величин NDVI по отдельным годам показала, что снижение в середине лета было явно выражено в 2006 и 2018 гг., когда между первой и третьей декадой июля произошло падение значений соответственно от 0,76 до 0,46 и от 0,75 до 0,54 с последующим восстановлением значений в августе. В другие годы подобного снижения не отмечалось или оно носило характер незначительных колебаний.

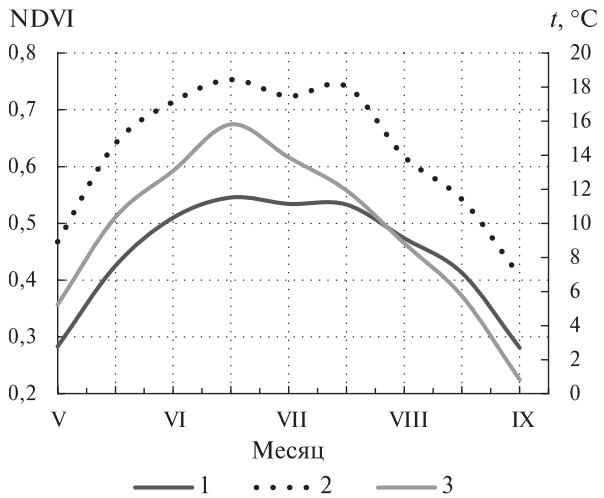

Рис. 2. Годовой ход NDVI и температуры воздуха (средние значения за период 2000–2020 гг.): 1 — территория города; 2 — фоновый участок; 3 — кривая хода среднемесячной температуры воздуха

Анализ метеопараметров в июле 2006 и 2018 гг. показал, что в эти годы в июле наблюдалось кратковременное понижение температуры воздуха до +1,7...+4,5 °С в результате вторжения арктического воздуха. Это, вероятно, и послужило причиной отмирания неустойчивых к заморозкам растений и снижения зелёной фитомассы в последующие 1–3 нед. Отмечалось, что в таёжной зоне, где благоприятная для роста температура в дневные часы часто перемежается с ночными заморозками, растения страдают от них гораздо чаще, чем в тундре (Швецова, 2001).

Аномалии в сезонном ходе величин NDVI иногда происходят вследствие погрешностей, вызванных облачным покровом на космоснимках. Однако в июле, по данным многолетних наблюдений на метеостанции Надым, наблюдается наименьшая облачность, поэтому влияние «шумов» и погрешностей на отклонение величин NDVI представляется маловероятным — в этом случае наибольшее снижение NDVI отмечалось бы в месяцы, когда облачность повышена. Таким образом, неустойчивый характер погоды в субарктике становится причиной внутригодовых изменений вегетационного индекса и отклонения от его нормального хода, скоррелированного с усреднёнными показателями температуры воздуха. Другое возможное объяснение снижения NDVI в июле было предложено в работе Е. В. Варламовой и В. С. Соловьёва (2010), где, по данным изучения сезонного хода NDVI в Якутии, отмечалось, как и в нашем случае, снижение значений в начале июля и небольшой рост в конце июля – начале августа. Было высказано предположение, что это явление связано с оттаиванием многолетнемёрзлых пород во второй половине лета, что обеспечивает достаточный уровень влагосодержания почв для роста и поддержания растительности в условиях низкого количества атмосферных осадков.

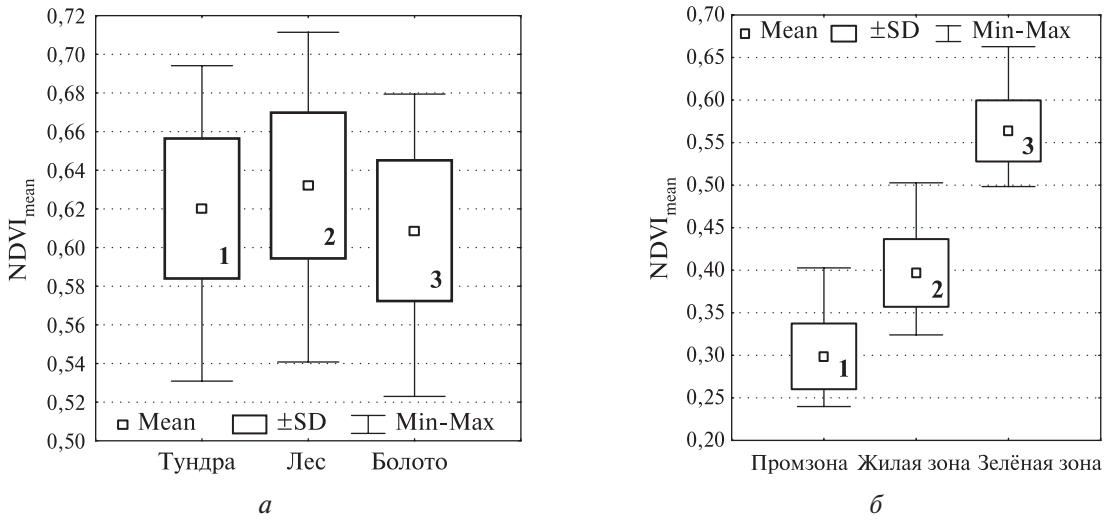

Рис. 3. Значения $NDVI_{mean}$ на участках с разным типом растительности на фоновом участке (*а*) и разных функциональных зонах г. Надым (*б*). Фоновый участок: 1 — тундра; 2 —лес; 3 — болото. Город: 1 — промышленная зона; 2 — жилая зона; 3 — зелёная зона

На фоновом участке наибольшие величины $NDVI_{mean}$ отмечены для лесной растительности, наименьшие — для осоково-пушицево-сфагновых болот (*рис. 3а*). Тундровые ерниково-кустарничково-мохово-лишайниковые сообщества занимают промежуточное положение. Минимальные значения для болот связаны с наличием в их пределах значительного числа малых внутриболотных озёр, лишённых растительности. Различия значений $NDVI_{mean}$ для разных типов растительности невелики и статистически недостоверны. Как можно судить по аналогичным работам в Большеземельской тундре (Иванова, 2019), малые различия величин NDVI между разными типами растительности в пределах одного ключевого участка — обычное явление. Значительные различия наблюдаются только в начале вегетации и связаны с неравномерным таянием снега в лесу и на открытых участках, в середине лета эти различия существенно сглаживаются.

В городе ожидаемо наибольшие величины NDVI отмечены в зелёной зоне, где по своим абсолютным значениям (в среднем 0,57) мало уступают показателям фоновой территории. Минимально количество фитомассы в промышленной зоне, где величины NDVI изменяются от 0,25 до 0,4 (*рис. 3б*). Значения NDVI жилой и промышленной зон существенно различаются, что связано с озеленением, которое началось с момента строительства города в 1970–1980-е гг. За последние 25 лет большой вклад в формирование растительности селитебных и рекреационных зон городов Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) внесла нарастающая деятельность по благоустройству территорий: применение газонных травосмесей, внесение удобрений и посадки интродуцентов, а также стихийный и непреднамеренный занос новых адвентивных видов (Копцева, Абакумов, 2021). Повышение значений NDVI связано с посадками древесных пород.

Корреляционный анализ NDVI и метеопараметров (температурного режима, количества осадков по месяцам и в сумме за вегетационный период, максимальной глубины снежного покрова в зимний период текущего года) показал, что развитие растительности зависит от множества факторов. Ни один из параметров не продемонстрировал сильной зависимости с величинами $NDVI_{mean}$. Как в городе, так и на фоновой территории средняя за год величина вегетационного индекса связана слабой корреляционной зависимостью со средней температурой вегетационного периода ($r = 0{,}40$ — в городе и 0,34 — на фоновом участке). $NDVI_{max}$ зависит от температуры только июля — т. е. месяца, когда наблюдаются наибольшие величины вегетационного индекса. Однако зависимость слабая и статистически недостоверная ($r = 0{,}32$), что объясняется нелинейным характером зависимости фитомассы от температуры. Как в аномально холодные, так и в аномально тёплые, засушливые годы величина $NDVI_{max}$ была низкой. Исследование продуктивности растительности в сходных природно-климатических условиях (северная тайга республики Коми) показало, что продуктивность травостоя ограничивается не только низкой, но и высокой температурой, поскольку жаркая и сухая погода вызывает дефицит влаги на глубине корневой системы, что приводит к существенному замедлению ростовых процессов, которое сохраняется до конца вегетационного периода (Швецова, 2001).

На $NDVI_{max}$ в естественных фитоценозах влияет суммарное количество осадков — как в целом за вегетационный период ($r = 0{,}42$), так и в июле ($r = 0{,}31$). Зависимость $NDVI_{max}$ от увлажнения, вероятно, связана с преобладанием почв лёгкого гранулометрического состава, хорошо дренированных и содержащих мало влаги, что ограничивает вегетацию при недостатке осадков. В городе подобные зависимости выражены крайне слабо (соответственно $r = 0{,}27$ и 0,24). Наиболее сильно $NDVI_{max}$ зависит от максимальной высоты снежного покрова в предшествующий зимний период ($r = 0{,}56$ в городе и 0,47 на фоновом участке). Только эта связь статистически достоверна при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$.

Зависимость вегетационных индексов от снежного покрова связана с его влиянием на температурный режим почв и ММП. Мёрзлый грунт проводит тепло лучше, чем талый, поэтому теплопотери зимой больше, чем поступление тепла летом (Семенов, 2012). Увеличение глубины снежного покрова приводит к уменьшению глубины промерзания почв в зимний период, увеличению температуры сезонно-талого слоя и ММП. Отмечалось, что наибольшее опускание кровли мерзлоты в зоне лесотундры зафиксировано на хорошо дренированных участках с высоким кустарниковым покровом, способствующим снегонакоплению (Васильев и др., 2020). Наибольшие современные термические изменения в верхних горизонтах криолитозоны происходят при одновременном повышении температуры воздуха и высоты снежного покрова (Решетько, Моисеева, 2016). Поскольку продуктивность фитоценозов зависит от температуры корнеобитаемого слоя, рост высоты снежного покрова благоприятствует увеличению фитомассы.

Значения NDVI, как средние за вегетационный период, так и максимальные летние, варьируют год от года при общей тенденции к возрастанию (*рис. 4*, см. с. 172). Наибольшие значения $NDVI_{mean}$ и $NDVI_{max}$ были отмечены в 2019–2020 гг. Ранее при анализе трендов $NDVI_{max}$ за период 2000–2014 гг. было отмечено, что в Надыме наблюдается слабоотрицательная динамика NDVI, в то время как на близлежащей фоновой территории — положительная (Esau et al., 2016).

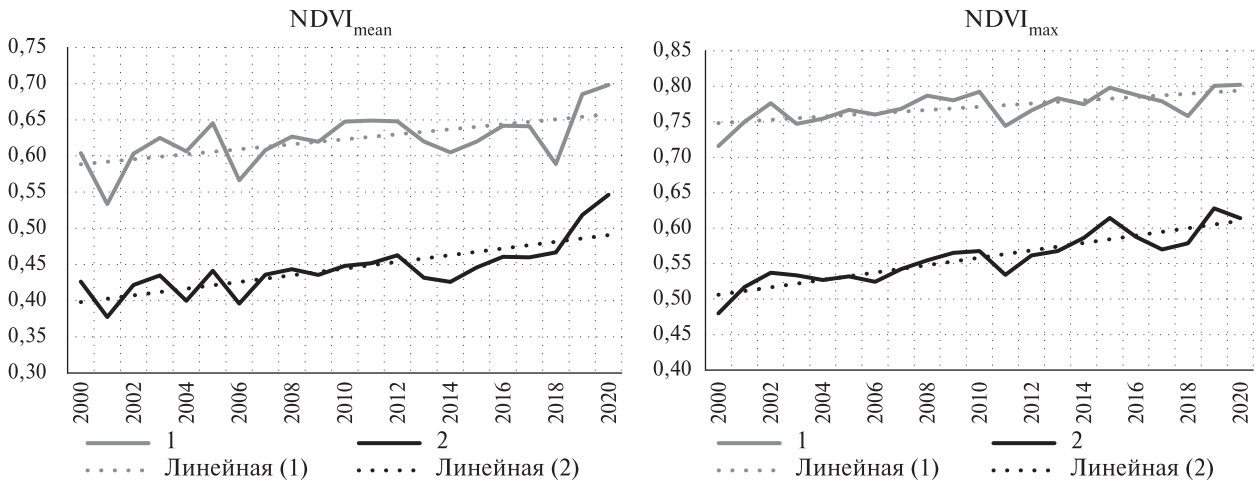

Рис. 4. Средние значения NDVI за период 2000–2020 гг.:
1 — фоновый участок (n = 57); 2 — городская территория (n = 77)

Высокие значения NDVI в 2015, 2019 и 2020 гг. обозначили явный положительный тренд. Таким образом, в районе исследований наблюдается тенденция роста фотосинтетически активной фитомассы, что соответствует общепланетарной тенденции к «позеленению» тундровых и предтундровых регионов, вызванному современным потеплением климата (Walker et al., 2012). Примечательно, что в городе тренд выражен сильнее, чем на фоновой территории (в особенности NDVI$_{max}$). Вероятно, причинами этого оказывается целенаправленное озеленение города и постепенное зарастание нарушенных участков травянистой растительностью. Развитие производных фитоценозов на территории города специально не изучалось, однако было зафиксировано внедрение большого числа чужеродных видов, как рудеральных, так и дичающих культивируемых (Письмаркина, 2019). Пришлые виды становятся всё более распространёнными в населённых пунктах ЯНАО, что, вероятно, связано с глобальным потеплением (Письмаркина, Быструшкин, 2019).

В Западной Сибири ранее неоднократно отмечалось увеличение фитомассы на полярных и приполярных территориях (Esau et al., 2016; Macias-Fauria et al., 2012). Как правило, тенденцию увеличения фитомассы в тундрах связывают с потеплением климата (Дегерменджи и др., 2020; Зуев и др., 2019; Walker et al., 2009, 2012). Однако, как было показано ранее, на обследуемой территории корреляционная зависимость NDVI от температуры слабая, несколько сильнее она для количества осадков и наиболее сильная — для высоты снежного покрова в предшествующую зиму. По данным метеостанции Надым, температурный режим демонстрирует слабоположительный тренд при значительной межгодовой вариабельности, количество осадков за тёплое время года отличается крайней нестабильностью, тренд отсутствует (*рис. 5*, см. с. 173). Вместе с тем отчётливо выраженный положительный тренд наблюдается для максимальной высоты снежного покрова в предшествующий зимний период, практически совпадающий с трендом NDVI (*рис. 6*, см. с. 173).

Проверка статистической значимости с использованием критерия Манна – Кендалла показала, что тренды роста NDVI статически значимы как в городе, так и на фоновом участке с высоким уровнем достоверности ($\alpha = 0{,}01$). Также значим тренд роста максимальной высоты снежного покрова ($\alpha = 0{,}05$). Тренды температурного режима и осадков незначимы, что связано со значительным межгодовым варьированием. Полученные результаты подтверждают тренд увеличения NDVI для растительности таёжной зоны Западной Сибири (Зуев и др., 2019). Как можно судить по результатам корреляционного анализа, увеличение фитомассы вызвано совокупным воздействием роста температуры и содержания влаги в почве. Помимо увеличения температуры воздуха, на температурный режим почв оказывает влияние рост глубины снежного покрова. Это приводит к уменьшению промерзания почв, росту их температуры и скорейшему оттаиванию сезонно талого слоя в тёплое время года, что также влияет на рост влагозапаса в почве.

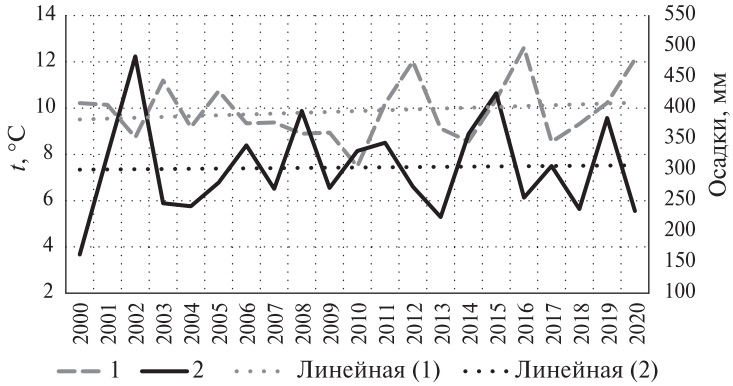

Рис. 5. Межгодовое варьирование средней температуры воздуха в течение вегетационного периода и суммы осадков. Метеостанция Надым. 1 — средняя температура вегетационного периода; 2 — сумма осадков вегетационного периода

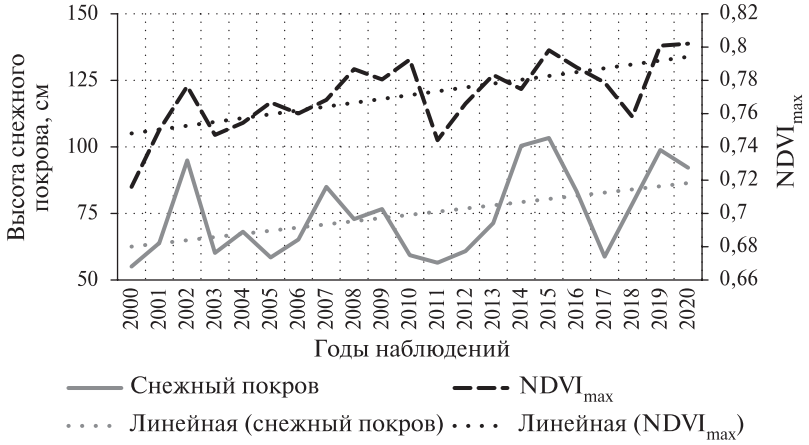

Рис. 6. Межгодовое варьирование высоты снежного покрова перед началом снеготаяния (март) и максимальных значений NDVI на фоновом участке (метеостанция Надым)

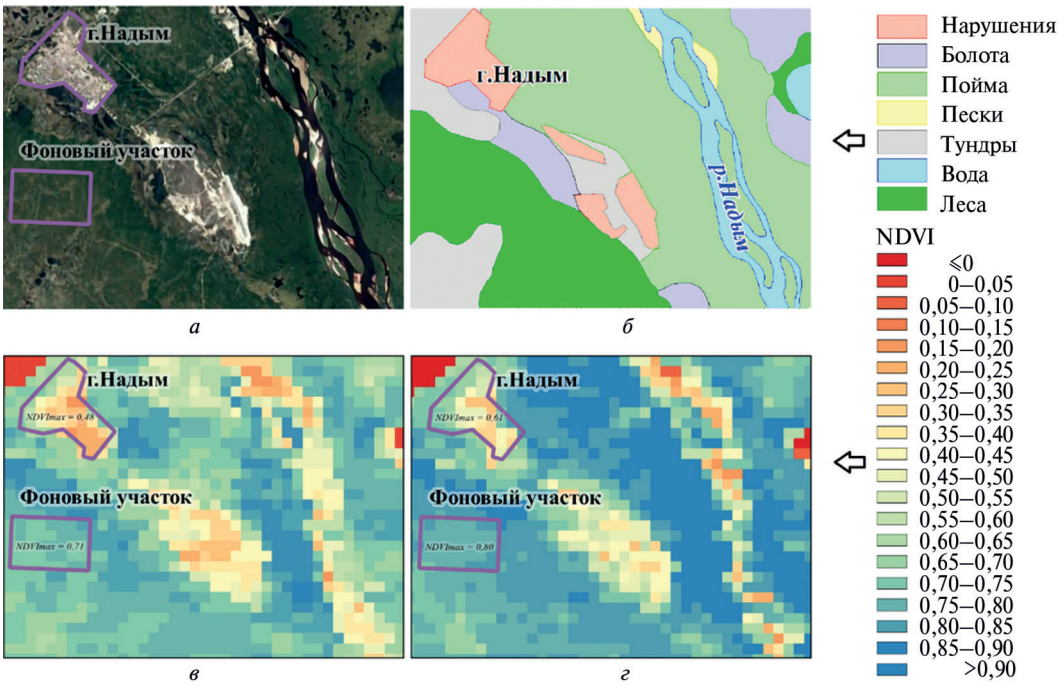

Рис. 7. Распределение $NDVI_{max}$ на территории исследований: *а* — общий вид района работ (Google Earth); *б* — преобладающие типы поверхности; *в* — $NDVI_{max}$, 2000 г.; *г* — $NDVI_{max}$, 2020 г.

Картографический анализ распределения NDVI на территории исследований показал, что наблюдается существенное варьирование значений (от 0 до >0,90), зависящее от типа растительности, заозеренности, наличия нарушений и участков песчаного аллювия в пойме р. Надым (*рис. 7*, см. с. 173). Наибольшие значения $NDVI_{max}$, достигающие 0,90, отмечены в пойме р. Надым на участках, покрытых берёзовыми и берёзово-елово-лиственничными травяно-кустарничково-моховыми лесами. На песчаном аллювии в пойме, обширных котловинах выдувания, песчаных раздувах, а также участках техногенных нарушений величины $NDVI_{max}$ варьируют в пределах 0,1–0,4. Сопоставление снимков, сделанных в начале 2000-х гг. и в современный период, выявило рост величин $NDVI_{max}$, наиболее сильно выраженный в пойме р. Надым к востоку от города (см. *рис. 7*). Вероятно, сказываются процессы увеличения фитомассы древесного яруса в силу климатических причин, а также постепенного зарастания трасс трубопроводов, проходящих на этом участке.

Выводы

Внутригодовая динамика NDVI на обследованной территории отличается от обычной плавной кривой с максимумом в середине лета, повторяющей ход температуры воздуха. Обобщение данных за период 2000–2020 гг. показало снижение значений индекса в первую декаду июля и последующий рост в августе. Сильнее всего такое падение количества фитомассы было выражено в годы, когда в июле происходило кратковременное, но резкое снижение температуры вследствие вторжения арктического воздуха. Это, вероятно, стало причиной отмирания фотосинтезирующих органов неустойчивых растений. Различия между разными классами ненарушенной растительности (лес – тундра – болото) по величине $NDVI_{max}$ невелики и статистически незначимы. В городе наблюдается существенное увеличение индексов в ряду «промзоны – жилые кварталы – зелёные зоны».

Зависимость NDVI от средней температуры воздуха в течение вегетационного периода слабая ($r = 0{,}32–0{,}4$), что связано с нелинейной зависимостью продуктивности растительности от температуры — как в аномально холодные, так и жаркие годы продуктивность снижается. Наиболее сильно NDVI зависит от глубины снежного покрова в предшествующую зиму ($r = 0{,}56$ в городе и 0,47 на фоновом участке), что связано с отепляющим воздействием снега. Увеличение глубины снежного покрова вызывает рост температуры ММП и обуславливает более благоприятный температурный режим в корнеобитаемом слое, что сказывается на количестве фитомассы. Анализ межгодовой динамики показал, что значения NDVI, как средние за вегетационный период, так и максимальные летние, варьируют год от года при общей тенденции к возрастанию. Рост NDVI отмечен как для различных классов ненарушенной растительности, так и для антропогенной. Тренды роста $NDVI_{mean}$ и $NDVI_{max}$ за период 2000–2020 гг. статистически значимы с высоким уровнем достоверности ($\alpha = 0{,}01$), что подтверждает современное «позеленение» приполярных регионов. Картографирование выявило, что рост NDVI наиболее сильно выражен для лесов поймы р. Надым, что свидетельствует об улучшении лесорастительных условий.

Работа выполнена по госзаданию № 121042000078-9.

Литература

1. *Бондур В. Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
2. *Варламова Е. В.*, *Соловьев В. С.* Исследование вариаций индекса NDVI тундровой и таежной зон Восточной Сибири на примере территорий Якутии // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 10. С. 891–894.
3. *Васильев А. А.*, *Гравис А. Г.*, *Губарьков А. А.*, *Дроздов Д. С.*, *Коростелев Ю. В.*, *Малкова Г. В.*, *Облогов Г. Е.*, *Пономарева О. Е.*, *Садуртдинов М. Р.*, *Стрелецкая И. Д.*, *Стрелецкий Д. А.*, *Устинова Е. В.*, *Широков Р. С.* Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в за-

падном секторе Российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 2. С. 15–30. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30).
4. Геокриология СССР. Западная Сибирь / под. ред. Ершова Е. Д. М.: Недра, 1989. 454 с.
5. *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. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 2. С. 103–106. DOI: 10.31857/S2686739720080046.
6. *Елсаков В. В.*, *Телятников М. Ю.* Межгодовые изменения индекса NDVI на территории европейского северо-востока России и западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 260–271.
7. *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. DOI: 10.31857/S0205-96142019666-76.
8. *Иванова К. В.* Динамика индекса NDVI для разных классов территориальных единиц растительности типичных тундр // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 194–202. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-194-202.
9. *Ильина И. С.*, *Лапшина Е. И. Лавренко Н. Н.*, *Мельцер Л. И.*, *Романова Е. А.*, *Богоявленский Б. А.*, *Махно В. Д.* Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. 251 с.
10. *Копцева Е. М.*, *Абакумов Е. В.* Особенности растительного покрова некоторых населенных пунктов севера Западной Сибири // Ботанический журн. 2021. Т. 106. № 2. С. 177–191. DOI: 10.31857/S0006813621020058.
11. *Корниенко С. Г.*, *Якубсон К. И.* Исследование трансформации растительности в районах Тазовского полуострова по данным космической съемки // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4(4). С. 46–57.
12. *Москаленко Н. Г.* Изменение температуры пород и растительности под влиянием меняющегося климата и техногенеза в Надымском районе Западной Сибири // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 4. С. 18–23.
13. *Москаленко Н. Г.* Изменения криогенных ландшафтов северной тайги Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенеза // Криосфера Земли. 2012. Т. 16. № 2. С. 38–42.
14. *Письмаркина Е. В.* Находки чужеземных видов сосудистых растений в городе Надым (Ямало-Ненецкий автономный округ, Россия) // Тр. Мордовского гос. природного заповедника им. П. Г. Смидовича. 2019. № 23. С. 233–238.
15. *Письмаркина Е. В.*, *Быструшкин А. Г.* Новые находки чужеродных видов сосудистых растений в Ямало-Ненецком автономном округе (Россия) // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2019. Т. 13. № 1. С. 107–113.
16. *Решетько М. В.*, *Моисеева Ю. А.* Климатические особенности и статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории севера Западной Сибири // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 4. С. 108–118.
17. *Семенов С. М.* Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М: Росгидромет, 2012. 511 с.
18. *Швецова В. М.* Продукционный процесс растений на севере и температура // Вестн. Ин-та биологии. 2001. Т. 49. № 11. URL: https://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/01-49/03.html (дата обращения 11.12.2020).
19. *Epstein H. E.*, *Raynolds M. K.*, *Walker D. A.*, *Bhatt U. S.*, *Tucker C. J.*, *Pinzon J. E.* Dynamics of aboveground phytomass of the circumpolar Arctic tundra during the past three decades // Environmental Research Letters. 2012. V. 7. No. 1. Art. No. 015506. DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/015506.
20. *Esau I.*, *Miles V.* Warmer urban climates for development of green spaces in northern Siberian cities // Geography. Environment. Sustainability. 2016. V. 9. No. 4. P. 48–62. DOI: 10.15356/2071-9388_04v09_2016_04.
21. *Esau I.*, *Miles V. V.*, *Davy R.*, *Miles M. W.*, *Kurchatova A.* Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. V. 16. P. 9563–9577. DOI: 10.5194/acp-16-9563-2016.
22. *Macias-Fauria M.*, *Forbes B.*, *Zetterberg P.*, *Kumpula T.* Eurasian Arctic greening reveals teleconnections // Nature Climate Change. 2012. No. 2. P. 613–618. DOI: 10.1038/nclimate1836.
23. *Raynolds M. K.*, *Walker D. A.*, *Epstein H. E.*, *Pinzon J. E.*, *Tucker C. J.* A new estimate of tundra-biome phytomass from trans-Arctic field data and AVHRR NDVI // Remote Sensing Letters. 2012. No. 3. P. 403–411. DOI: 10.1080/01431161.2011.609188.
24. *Walker D. A.*, *Leibman M. O.*, *Epstein H. E.*, *Forbes B. C.*, *Bhatt U. S.*, *Raynolds M. K.*, *Comiso J. C.*, *Gubarkov A. A.*, *Kaarlejärvi E.* Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index // Environmental Research Letters. 2009. V. 4. No. 4. Art. No. 045004. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045004.

25. *Walker D. A.*, *Epstein H. E.*, *Raynolds M. K.* Environment, vegetation and greenness (NDVI) along the North America and Eurasia Arctic transects // Environmental Research Letters. 2012. No. 7. Art. No. 015504. DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/015504.

Current trends in natural and anthropogenic vegetation in Western Siberia's sub-tundra forests based on vegetation indices data

A. A. Tigeev, D. V. Moskovchenko, A. V. Fahretdinov

Institute of the Problems of Northern Development SB RAS,
Tyumen Scientific Center SB RAS, Tyumen 625026, Russia
E-mails: ttrruubbaa@mail.ru, moskovchenko@hotbox.ru, arthurfahretdinov@gmail.com

To assess the current dynamics of plant communities in the northern taiga zone of Western Siberia using the MOD13A1 product, we determined NDVI values for the period 2000–2020. The index values were calculated for 77 points in the territory of Nadym and 57 points in the background site. As a result of image interpretation and in situ observations, vegetation classes were determined for which mean and maximum NDVI values were evaluated, and the dependence of NDVI on meteoparameters was assessed. According to the correlation analysis, the NDVI value depends on several factors listed in descending order of importance: the height of the snow cover during the past winter, the amount of summer precipitation, and the air temperature during the growing season. The intra-annual s of the index is influenced by meteorological fluctuations, particularly short-term Arctic cold air intrusions, which cause declines in the next few weeks. In the undisturbed area, the highest NDVI values are found in forest communities and the lowest values in the wetlands. In the green zone of the city of Nadym the NDVI values are close to the vegetation values of the background site plots; in the industrial zone the green phytomass amount is minimal. An analysis of interannual dynamics showed that NDVI values in both the city and the background were gradually increasing as air temperatures and depth of the snowpack gradually increased. NDVImean and NDVImax growth trends are statistically significant with a high level of confidence ($\alpha = 0.01$), which confirms the modern «greening» of circumpolar regions. Mapping revealed that NDVI growth over the period 2000–2020 is most pronounced for the forests of the Nadym River floodplain.

Keywords: remote sensing, correlation analysis, vegetation index, vegetation cover dynamics, climate-related changes in ecosystems

Accepted: 11.08.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177

References

1. Bondur V. G., Aerospace methods and technologies for monitoring oil and gas areas and facilities, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 6, pp. 3–17 (in Russian).
2. Varlamova E. V., Solov'ev V. S., Study of NDVI variations at tundra and taiga areas of Eastern Siberia (Yakutia), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 10, pp. 891–894 (in Russian).
3. Vasil'ev A. A., Gravis A. G., Gubarkov A. A., Drozdov D. S., Korostelev Yu. V., Malkova G. V., Oblogov G. E., Ponomareva O. E., Sadurtdinov M. R., Streletskaya I. D., Streletskiy D. A., Ustinova E. V., Shirokov R. S., Permafrost degradation: results of the long-term geocryological monitoring in the western sector of Russian Arctic, *Kriosfera Zemli*, 2020, Vol. 24, No. 2, pp. 15–30 (in Russian), DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30).
4. *Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir'* (Geocryology of the USSR. Western Siberia), Ershov E. D. (ed.), Moscow: Nedra, 1989, 454 p. (in Russian).
5. Degermendzhi A. G., Vysotskaya G. S., Somova L. A., Pisman T. I., Shevyrnogov A. P., Long-Term Dynamics of NDVI-Vegetation for Different Classes of Tundra Depending on the Temperature and Precipitation, *Doklady RAN. Nauki o Zemle*, 2020, Vol. 493, No. 2, pp. 103–106 (in Russian), DOI: 10.31857/S2686739720080046.

6. Elsakov V. V., Teljatnikov M. Y., Effects of interannual climatic fluctuations of the last decade on NDVI in north-eastern European Russia and Western Siberia, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 260–271 (in Russian).
7. 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), DOI: 10.31857/S0205-96142019666-76.
8. Ivanova K. V., Dynamics of NDVI for different classes of territorial units of typical tundra vegetation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 194–202 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-194-202.
9. Ilyina I. S., Lapshina E. I., Lavrenko N. N., Mel'cer L. I., Romanova E. A., Bogoyavlenskij B. A., Mahno V. D., *Rastitel'nyi pokrov Zapadno-Sibirskoi ravniny* (Vegetation cover of West-Siberian plain), Novosibirsk: Nauka, 1985, 251 p. (in Russian).
10. Koptseva E. M., Abakumov E. V., Peculiarities of vegetation in some populated localities of northern West Siberia, *Botanicheskii zhurnal*, 2021, Vol. 106, No. 2, pp. 177–191 (in Russian), DOI: 10.31857/S0006813621020058.
11. Kornienko S. G., Yakubson K. I., Study of vegetation transformation in the Tazov Peninsula areasaccording to space survey data, *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2011, No. 4(4), pp. 46–57 (in Russian).
12. Moskalenko N. G., Permafrost and vegetation changes in the Nadym region of West Siberian northern taiga due to the climate change and technogenesis, *Kriosfera Zemli*, 2009, Vol. 13, No. 4, pp. 18–23 (in Russian).
13. Moskalenko N. G., Cryogenic landscape changes in the West Siberian northern taiga in the conditions of climate change and human-induced disturbances, *Kriosfera Zemli*, 2012, Vol. 16, No. 2, pp. 38–42 (in Russian).
14. Pismarkina E. V., Records of alien species of vascular plants in the Nadym town (Yamalo-Nenets autonomous okrug, Russia), *Trudy Mordovskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika im. P. G. Smidovicha*, 2019, No. 23, pp. 233–238 (in Russian).
15. Pismarkina E. V., Bystrushkin A. G., New findings of alien species of vascular plants in Yamalo-Nenets autonomous region (Russia), *Fitoraznoobrazie Vostochnoi Evropy*, 2019, Vol. 13, No. 1, pp. 107–113 (in Russian), DOI: 10.24411/2072-8816-2019-10043.
16. Reshetko M. V., Moiseeva Yu. A., Climatic features and statistical evaluation of climate change in permafrost regions in the north of Western Siberia, *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2016, Vol. 327, No. 4, pp. 108–118 (in Russian).
17. Semenov S. M., *Metody otsenki posledstvii izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* (Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems), Moscow: Rosgidromet, 2012, 511 p. (in Russian).
18. Shvetsova V. M., The production process of plants in the north and the temperature, *Vestnik Instituta biologii*, 2001, Vol. 49, No. 11, available at: https://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/01-49/03.html (accessed 11.12.2020) (in Russian, accessed 11.12.2020).
19. Epstein H. E., Raynolds M. K., Walker D. A., Bhatt U. S., Tucker C. J., Pinzon J. E., Dynamics of aboveground phytomass of the circumpolar Arctic tundra during the past three decades, *Environmental Research Letters*, 2012, Vol. 7, No. 1, Art. No. 015506, DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/015506.
20. Esau I., Miles V., Warmer urban climates for development of green spaces in northern Siberian cities, *Geography. Environment. Sustainability*, 2016, Vol. 9, No. 4, pp. 48–62, DOI: 10.15356/2071-9388_04v09_2016_04.
21. Esau I., Miles V. V., Davy R., Miles M. W., Kurchatova A., Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, Vol. 16, pp. 9563–9577, DOI: 10.5194/acp-16-9563-2016.
22. Macias-Fauria M., Forbes B., Zetterberg P., Kumpula T., Eurasian Arctic greening reveals teleconnections, *Nature Climate Change*, 2012, No. 2, pp. 613–618, DOI: 10.1038/nclimate1836.
23. Raynolds M. K., Walker D. A., Epstein H. E., Pinzon J. E., Tucker C. J., A new estimate of tundra-biome phytomass from trans-Arctic field data and AVHRR NDVI, *Remote Sensing Letters*, 2012, No. 3, pp. 403–411, DOI: 10.1080/01431161.2011.609188.
24. Walker D. A., Leibman M. O., Epstein H. E., Forbes B. C., Bhatt U. S., Raynolds M. K., Comiso J. C., Gubarkov A. A., Kaarlejärvi E., Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index, *Environmental Research Letters*, 2009, Vol. 4, No. 4, Art. No. 045004, DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045004.
25. Walker D. A., Epstein H. E., Raynolds M. K., Environment, vegetation and greenness (NDVI) along the North America and Eurasia Arctic transects, *Environmental Research Letters*, 2012, No. 7, Art. No. 015504, DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/015504.