

## СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПОЛЯРНЫХ И ПРИПОЛЯРНЫХ РАЙОНОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2023 г. А. В. Фахретдинов\*

*Институт проблем освоения Севера, Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень, Россия*

*\*E-mail: arthurfahretdinov@gmail.com*

Поступила в редакцию 13.04.2023 г.

После доработки 21.11.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

По данным вегетационного индекса NDVI, полученных с применением сенсоров спутника MODIS-Terra за период 2000–2020 гг., выявлены тенденции климатогенной динамики фитомассы на участках, расположенных вблизи границ природных зон Западной Сибири (граница мерзлых и немерзлых болот, граница тайги и предтундровых редколесий, северная граница распространения древесной растительности). Оценка динамики растительности и факторов, ее определяющих, производилась по средним и максимальным значениям NDVI и связи индекса с основными климатическими параметрами. Повсеместно отмечен положительный тренд максимальных значений NDVI, вызванный ростом температуры воздуха и количества осадков. Наиболее сильно росла фитомасса предтундровых листовидных редколесий, здесь же отмечена наибольшая межгодовая изменчивость. Корреляционный анализ, проведенный на основе средних значений NDVI, показал, что улучшение условий произрастания растительности в тундре обусловлено, преимущественно влиянием средних летних температур. В таежных районах рост фитомассы в большей мере связан с наличием древостоя, лучше удерживающим снежный покров, что способствует меньшему промерзанию грунтов в зимний период.

*Ключевые слова:* тундровая растительность, таежная растительность, северные экотопы, межгодовые изменения фитоценозов, потепление климата, спутниковые методы, NDVI

**DOI:** 10.31857/S0869607123030059, **EDN:** PGRKPA

### ВВЕДЕНИЕ

Современные изменения климата на севере Западной Сибири приводят к росту температуры воздуха и увеличению атмосферных осадков [4, 9]. Это отражается на чувствительных полярных ландшафтах и приводит к трансформации многолетне-мерзлых пород (ММП), что увеличивает риск разрушения инженерных сооружений. Климатические воздействия на мерзлые толщи осуществляются через систему покровов (растительный, почвенный, грунт деятельного слоя) [9]. Так, снижение фитомассы мохово-лишайниковой растительности приводит к увеличению глубины сезонного протаивания [17].

Наиболее заметно климатогенное изменение растительности на границах природных зон. На севере Западной Сибири за последние 30 лет отмечено продвижение к северу предтундровых редколесий [8]. В тундровой зоне отмечено улучшение условий произрастания древесной растительности и устойчивое существование отдельных

лесных “островов” в речных поймах с выходом на водораздел [13]. Экосистемы переходных полос — экотонов — нестабильны и требуют тщательного изучения.

Эффективным методом при оценке многолетних изменений растительности выступают данные дистанционного зондирования, преимуществом которых является возможность изучения труднодоступных районов, высокая информативность и доступность. Наибольшее применение в таких исследованиях получил вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), рассчитываемый как разность спектральных яркостей в красной и ближней инфракрасной зонах спектра, деленное на их сумму. Индекс принимает положительные значения от 0 до 1 и пропорционален количеству фитомассы [19]. Использование данного показателя выявило неоднозначность оценок современной динамики полярной растительности. Ряд авторов на основе анализа серии космоснимков отмечают положительный тренд NDVI за последние несколько десятилетий [3, 16]. В тоже время есть работы, свидетельствующие об отсутствии увеличения фитомассы в тундре [18]. Это говорит о многофакторности влияния меняющихся климатических условий на фитобиоту, о многообразии ответных реакции разных фитоценозов на климатические изменения и определяет необходимость углубленного изучения климатогенной динамики растительности. Целью исследования стало выявление современных трендов динамики фитомассы полярных и приполярных районов Западной Сибири в связи с климатическими изменениями по данным индекса NDVI.

## РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Территория исследования охватывает север Западной Сибири от северотаежной подзоны до подзоны южных тундр ( $63^{\circ}$ – $68^{\circ}$  с.ш.). Климат района континентальный субарктический с продолжительной зимой и коротким летом. Среднегодовая температура варьирует от  $-3.5^{\circ}\text{C}$  в северной тайге до  $-8.4^{\circ}\text{C}$  в зоне тундр. Среднее количество осадков за год 455–555 мм, с увеличением на юг. Продолжительность вегетационного периода составляет 90–110 дней [1].

Для исследования были выбраны участки, где в ходе наземных наблюдений отмечено нестабильное состояние геосистем, вызванное климатическими изменениями и трансформацией геоэкологических условий. Участки площадью  $4 \text{ км}^2$  ( $2 \times 2 \text{ км}$ ) расположены в нескольких природных зонах: в северной тайге (природный парк “Нумто”, ХМАО–Югра), в предтундровых редколесьях Надымского района и в южной тундре (Тазовский полуостров, ЯНАО) (рис. 1). Первый участок расположен в зоне островного распространения многолетнемерзлых пород и находится на границе двух болотных зон — мерзлых бугристых болот и олиготрофных немерзлых сфагновых болот [2]. В ландшафтной структуре доминируют бугристые болота с ерниковыми кустарничково-лишайниково-сфагновыми сообществами мерзлых бугров и осоково-пушицево-сфагновыми немерзлыми мочажинами. В недавнее время здесь отмечена активизация процессов таяния мерзлоты, что вызывает усиление термокарста, деградацию бугристых болот и формирование хасыреев на месте спущенных озер [15]. Второй участок расположен на северном пределе таежной зоны с предтундровыми листовенными редкостойными лесами и редколесьями в комплексе с плоскобугристыми ерnikово-кустарничково-лишайниковыми и низинными травяно-сфагновыми болотами. Здесь острова мерзлоты приурочены к торфяникам и буграм пучения. Современные изменения климата вызвали рост температур корнеобитаемого слоя почв и ММП, смену сосново-кустарничково-сфагновых заторфованных редколесий пушицево-осоково-моховыми тальми болотами [12, 17]. Отмечено увеличение высоты и встречаемости кустарников и покрытия ими поверхности почвы, появление на торфяниках подроста березы, сосны и кедра [10]. Третий участок приурочен к подзоне южных (кустарниковых) тундр со сплошным распространением ММП. В растительном



**Рис. 1.** Карта-схема размещения ключевых участков: 1 – Природный парк “Нумто”, 2 – Надымский район, 3 – долина р. Монгаюрбей.

**Fig. 1.** Location of study sites: 1 – Natural park “Numto”, 2 – Nadym region, 3 – Mongayurbey River Valley.

покрове преобладают кустарниковые ивняковые и ерниковые лишайниково-моховые тундры, чередующиеся с полигональными и плоскобугристыми болотами. Особенностью участка является присутствие древесной растительности – разной степени сомкнутости лиственничников лишайниково-кустарничковых и кустарничково-зеленомошных, местами при участии ольхи. Таким образом, данный участок является своеобразным “форпостом” лесной растительности в зоне тундр.

В работе были использованы космоснимки спектрорадиометра MODIS (спутник Terra). Определение NDVI производилось по тематическому продукту MOD13Q1 V6 (16-дневные временные композиты с пространственным разрешением 250 м), что позволяет получить растровое изображение с рассчитанными индексами для каждого пикселя. Для оценки межгодовых изменений фитомассы были подсчитаны  $NDVI_{mean}$  – среднее значение индекса за вегетационный период и  $NDVI_{max}$  – максимальное значение за этот же временной интервал. Подсчет двух значений NDVI – максимального и среднего за сезон был проведен, поскольку данные индексы отражают разные биологические параметры и факторы температурного режима. Показатель  $NDVI_{max}$  показывает наиболее полное развитие надземной фитомассы за вегетационный период [6] и определяется температурой июля.  $NDVI_{mean}$  зависит прежде всего от продолжительности вегетационного периода, суммы его температур и от количества осадков, выпадающих в теплый период года. Подсчет  $NDVI_{mean}$  и  $NDVI_{max}$  осуществлялся для каждого

пиксела выбранных участков за вегетационные периоды (май–сентябрь) по 7–9 компонентам в зависимости от района исследования с 2000 по 2020 гг. Обработка спутниковых изображений выполнялась в программном комплексе (ПК) QGIS 3.10.14.

Для выявления связей индекса NDVI с климатическими условиями были использованы данные наблюдений на ближайших метеостанциях (Юильск – участок 1, Надым – участок 2 и Тазовский – участок 3). В расчет брались такие метеопараметры, как среднегодовая и летняя температура воздуха, сумма осадков за год и за летний период, максимальная высота снежного покрова за предшествующий наблюдениям зимний период.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

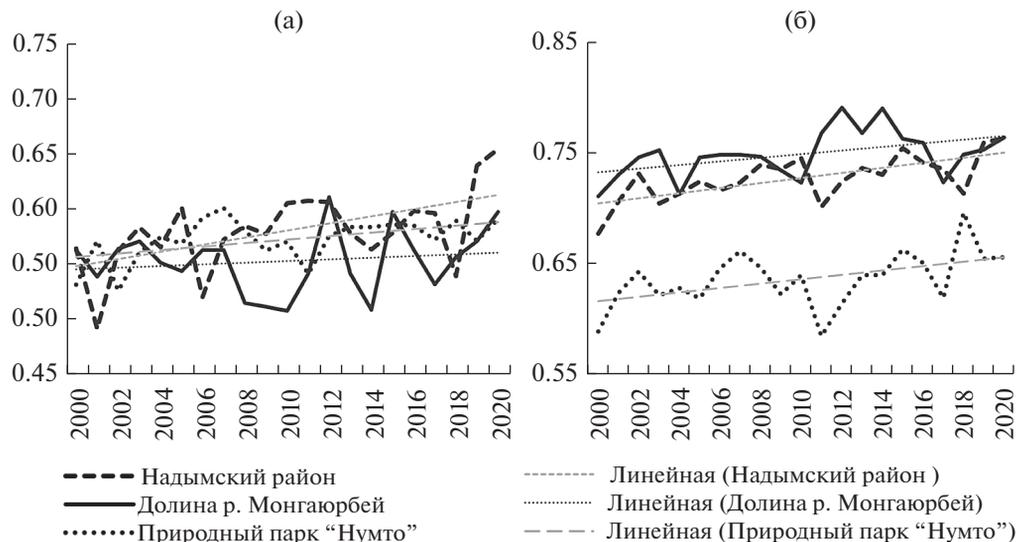
Анализ метеоданных за период с 2000 по 2020 гг. показал рост среднегодовой температуры воздуха на всех рассматриваемых участках с наибольшим и статистически достоверным трендом ( $p < 0.05$ ) в тундровой зоне ( $0.19^\circ\text{C}/\text{год}$ ). В северотаежной подзоне темпы роста температуры воздуха менее заметны и составляют в среднем  $0.06^\circ\text{C}$  в год. Потепление в районе исследований выражено более интенсивно, чем в среднем по России, где линейный тренд среднегодовой температуры составляет в настоящее время  $+0.049^\circ\text{C}/\text{год}$  [5]. Наиболее сильно росла температура воздуха в весенний период, тренды летней температуры воздуха не столь выражены и статистически не значимы. Отмечается также увеличение количества атмосферных осадков, как за зимний период, так и за летний.

Растительность изученной территории по значениям  $\text{NDVI}_{\text{mean}}$  согласно [14] можно охарактеризовать как “разреженную” – среднее за 20 летний период значение NDVI таежных участков –  $0.62 \pm 0.019$  (№ 1) и  $0.62 \pm 0.035$  (№ 2); тундрового –  $0.60 \pm 0.028$  (№ 3). Небольшие различия между таежными и тундровыми фитоценозами объясняются малой сомкнутостью крон редкостойных северотаежных лесов, схожим флористическим составом травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов. Тем не менее, по  $t$ -критерию Стьюдента отмечены значимые различия NDVI между тундровыми и таежными участками ( $p < 0.05$ ).

Внутри изучаемых площадей наибольшая пространственная вариабильность индекса  $\text{NDVI}_{\text{mean}}$  отмечается на участке 2 (коэффициент вариации ( $C_v$ ) – 14.5%), что обусловлено сочетанием нескольких типов растительности (лесной и болотной). Наиболее однородным по показателю  $\text{NDVI}_{\text{mean}}$  ( $C_v$  на уровне 5%) можно считать участок 1 с выраженным доминированием бугристых болот.

Линейный тренд  $\text{NDVI}_{\text{max}}$  и  $\text{NDVI}_{\text{mean}}$  на всех исследуемых территориях положительный (рис. 2). Таким образом, результаты подтверждают тенденцию возрастания значений NDVI в таежной зоне Западной Сибири [7]. Наблюдаются различия в динамике максимальной и средней за вегетационный период фитомассы. Если тренд  $\text{NDVI}_{\text{max}}$  приблизительно одинаков для всех участков, то значения  $\text{NDVI}_{\text{mean}}$  изменяются неоднозначно. Наиболее сильно выражен тренд для предтундровых лиственничных редколесий (участок 2), несколько слабее возросло количество фитомассы ерниковых кустарничково-лишайниково-сфагновых сообществ бугристых торфяников (участок № 1). Среднее за вегетационный период количество фитомассы на участке в тундровой зоне изменялось незначительно.

Сравнение величин  $\text{NDVI}_{\text{max}}$  и  $\text{NDVI}_{\text{mean}}$  выявило наибольшую разницу в ландшафтах, где присутствуют лиственничные редколесья (участок вблизи Надыма – 0.15, долина р. Монгаюрбей – 0.20). Весьма слабое отличие отмечено для растительности бугристых торфяников (участок 1), где разница между  $\text{NDVI}_{\text{max}}$  и  $\text{NDVI}_{\text{mean}}$  всего 0.05. Слабые различия указывают на господство в структуре фитоценозов мхов и лишайни-



**Рис. 2.** Хронология средних (а) и максимальных (б) значений NDVI за вегетационные периоды 2000–2020 гг.

**Fig. 2.** Chronology of mean (a) and maximum (b) NDVI values for the vegetation periods 2000–2020.

ков, спектральные характеристики которых слабо меняются в течение летнего сезона, и малое количество травянистых растений и листопадных кустарников.

Среднегодовые значения NDVI варьируют от года к году в зависимости от изменчивости климатических показателей (рис. 2). При положительных трендах температур воздуха весенне-летнего периода, как для зоны тайги, так и для зоны тундры наблюдается статистически значимое увеличение NDVI [7]. Корреляционный анализ между  $NDVI_{mean}$  и температурой за летний период показал снижение силы связи с понижением широты — для лиственничного редколесья в подзоне южных субарктических тундр коэффициент парной корреляции  $r = 0.69$  (при  $p > 0.01$ ), для растительных сообществ северотаежной подзоны данный показатель не образует достоверных зависимостей ( $r < 40$ ). Такой результат говорит о сильном воздействии летних температур на рост фитомассы на обследованном участке в тундре, в то время как в таежной зоне влияние температурного режима не имеет определяющего влияния. Ранее сходный эффект был отмечен для растительности полуострова Ямал, где NDVI слабо чувствителен к изменению температуры и больше зависит от орографии, типа ландшафта и особенностей почв [18].

Отмечалось, что рост значений NDVI в тундре и лесотундре при потеплении климата связан главным образом с разрастанием кустарников [6, 17]. Кустарники и деревья лучше удерживают снежный покров, что способствует меньшему промерзанию грунтов в зимний период и улучшению термических и влажностных условий для роста и поддержания растений в период вегетации [6, 12]. В нашем исследовании корреляционный анализ показал статистически значимую связь вегетационного индекса с высотой снежного покрова за предшествующий зимний период ( $r < 0.47$ , при  $p > 0.01$ ) на участке № 2 лиственничного редколесья в Надымском районе, что обусловлено снегозадерживающей ролью древостоя. На остальных участках зависимость не обнаружена.

Следует остановиться на значении трендов NDVI для устойчивости ММП. Растительный покров имеет важнейшее значение для стабилизации температурного режима

грунтов и сохранению мерзлоты. Последствия современных климатических изменений потепления – развитие растительности, накопление органики в почве и увеличение ее влажности стабилизирует ландшафтно-мерзлотные и геоэкологические условия [9]. В этом отношении наиболее неблагоприятны условия на самом северном участке, где потепление проявляется наиболее сильно, но, судя по значениям  $NDVI_{mean}$ , приводит лишь к небольшому увеличению фитомассы за вегетационный период. Следовательно, функция саморегуляции здесь выражена слабо. Также следует учитывать, что в тундре формирование мерзлых толщ происходит в основном под воздействием климатических факторов, а роль почвенно-растительного покрова существенно снижается по сравнению с более южными территориями [8].

На самом южном участке, где мерзлота наиболее нестабильна, рост фитомассы препятствует деградации ММП. Отмечалось, что здесь регрессивные участки мерзлых бугров, подверженные термокарстовому проседанию и последующей гидроморфизации, сравнительно быстро заселяются растениями-торфообразователями [15]. Увеличение толщины мохово-лишайникового покрова приводит к снижению летнего протаивания и стабилизирует мерзлотные условия. Таким образом, саморегулирующая функция здесь выражена в максимальной степени, а ерниковые кустарничково-лишайниково-сфагновые сообщества бугристых торфяных болот можно считать относительно устойчивыми.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Климатические изменения на севере Западной Сибири проявляются очень интенсивно. Рост температуры воздуха превышает среднероссийские показатели, выявлено увеличение количества осадков. Это приводит к увеличению фитомассы растительности. Тренд  $NDVI_{max}$  и  $NDVI_{mean}$  за период 2000–2020 положительный как в тундровой, так и в таежной зонах. Влияние температурного режима на величину фитомассы в южной тундре выражено сильнее, чем в таежной зоне, где выявлена статистически достоверная зависимость  $NDVI$  от летней температуры. В северной тайге такой связи не отмечено, что свидетельствует о влиянии неклиматических факторов, определяющих устойчивость фитоценозов, а также о воздействии снежного покрова на продуктивность растительных сообществ. В сообществах с развитым кустарничковым или древесным ярусом усиливается снегонакопление, что способствует росту температуры корнеобитаемого слоя, тем самым улучшая условия для вегетации растительности. Наиболее стабильными к колебаниям климата за изученный период (2000–2020 гг.) можно считать ерниковые кустарничково-лишайниково-сфагновые сообщества бугристых торфяных болот (северная тайга).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ 23-27-00366.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Омск: Омская картографическая фабрика, 2004. 303 с.
2. Валеева Э.И., Московченко Д.В., Арефьев С.П. Природный комплекс парка “Нумто”. Новосибирск, 2008. 280 с.
3. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Исследование трендов  $NDVI$  и фенологических параметров растительности мерзлотного региона Сибири по спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 206–214.  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-206-214>
4. 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 Западном секторе Российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 2. С. 15–30.  
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2\(15-30\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30))
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Государственный гидрологический институт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации, 2023. 104 с.
  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 // Исследования Земли из космоса. 2019. № 6. С. 66–76.  
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019666-76>
  8. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) / Д.С. Дроздов, Н.Г. Украинцева, А.М. Царев, С.Н. Чекрыгина // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 1. С. 22–31.
  9. *Конищев В.Н.* Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестник Московского университета. Сер. 5. Геогр. 2009. № 4. С. 10–20.
  10. *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.
  11. Растительный покров Западно–Сибирской равнины / И.С. Ильина, Е.И. Лапшина, Н.Н. Лавренко и др. Новосибирск: Наука, 1985. 251 с.
  12. *Тигеев А.А., Московченко Д.В., Фахретдинов А.В.* Современная динамика природной и антропогенной растительности зоны предтундровых лесов Западной Сибири по данным вегетационного индекса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 166–177.  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177>
  13. *Фахретдинов А.В., Арефьев С.П., Московченко А.В.* Экологическое состояние лиственничников в экотоне лесотундры Западной Сибири (на примере долины р. Монгаюрбей) // Сибирский экологический журнал. 2022. Т. 29. № 4. С. 464–475.  
<https://doi.org/10.15372/SEJ20220407>
  14. *Черепанов А.С., Дружинина Е.Г.* Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.
  15. *Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Березина Н.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К.* Проявления регрессивных процессов на болотах южной части природного парка Нумто (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра) // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2016. Т. 121. № 3. С. 39–50.
  16. Dynamics of aboveground phytomass of the circumpolar Arctic tundra during the past three decades / H.E. Epstein, M.K. Reynolds, D.A. Walker et al. // Environmental Research Letters. 2012. V. 7. № 1. P. 015506.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/015506>
  17. *Moskalenko N.* Impact of climate warming on vegetation cover and permafrost in West Siberia northern taiga // Natural Science. 2013. V. 5. № 1. P. 144–148.  
<https://doi.org/10.4236/ns.2013.51A022>
  18. Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: Interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index / D.A. Walker, U.S. Bhatt, M.K. Reynolds et al. // Environmental Research Letters. 2009. Vol. 4, N 4. P. 045004. .  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045004>
  19. NDVI FAQ: All You Need To Know About Index. 2021. URL: <https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/> (Дата обращения 28.10.2021).

## Contemporary Dynamics in Vegetation of the Polar and Subpolar Regions of Western Siberia Using Remote Sensing Data

A. V. Fakhretdinov\*

*Institute of the Problems of Northern Development, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia*

\*E-mail: [arthurfahretdinov@gmail.com](mailto:arthurfahretdinov@gmail.com)

**Abstract**—Trends in the climatogenic dynamics of phytomass on the sites located along the borders of Western Siberia’s natural zones (the border of frozen and unfrozen bogs, the bor-

der of taiga and open boreal woodlands, and the northern boundary of the distribution of woody vegetation) were spotted based on the vegetation index NDVI derived using the sensors of the MODIS-Terra satellite for the period 2000–2020. The assessment of the vegetation dynamics and the factors that determine it was conducted with the use of the mean and maximum NDVI values and the relation of the index with basic climatic variables. A positive trend of NDVI caused by an increase in air temperature and precipitation was revealed in all the studied areas. The phytomass of open boreal larch woodlands grew the most strongly, and the greatest interannual variability was noted there. A correlation analysis conducted on the basis of the NDVI mean values displayed that improvements in vegetation growth conditions in tundra are mainly caused by the impact of the average summer temperature. The increase in phytomass in taiga is mostly connected with the presence of a tree stand that better retains snow cover, which contributes to less freezing of the ground during the cold season.

*Keywords:* vegetation dynamics, climate change, ecotones, Western Siberia, remote sensing, NDVI

## REFERENCES

1. Atlas Khanty – Mansiiskogo avtonomnogo okruga – Yugry. Tom II. Priroda. Ekologiya. Khanty-Mansiisk. Moskva: OOO NPF “Talka–TDV”, 2004. 152 c.
2. Valeeva E.I., Moskovchenko D.V., Aref'ev S.P. Prirodnyi kompleks parka “Numto”. Novosibirsk, 2008. 280 c.w
3. Varlamova E.V., Solov'ev V.S. Issledovanie trendov NDVI i fenologicheskikh parametrov rastitel'nosti merzlotnogo regiona Sibiri po sputnikovym nablyudeniya // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2017. T. 14. № 3. S. 206–214. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-206-214>
4. Vasil'ev A.A., Gravis A.G., Gubar'kov A.A., Drozdov D.S., Korostelev Yu.V., Malkova G.V., Oblogov G.E., Ponomareva O.E., Sadurtdinov M.R., Streletskaya I.D., Streletskii D.A., Ustinova E.V., Shirokov R.S. Degradatsiya merzloty: rezul'taty mnogoletnego geokriologicheskogo monitoringa v Zapadnom sektore Rossiiskoi Arktiki // Kriosfera Zemli. 2020. T. 24. № 2. S. 15–30. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2\(15-30\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30))
5. Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2022 god. M.: Gosudarstvennyi gidrologicheskii institut Federal'noi sluzhby po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii, 2023. 104 s.
6. Elsakov V.V., Telyatnikov M.Yu. Mezhdogodovye izmeneniya indeksa NDVI na territorii evropeiskogo severo-vostoka Rossii i Zapadnoi Sibiri v usloviyakh klimaticheskikh fluktuatsii poslednikh desyatiletii // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2013. T. 10. № 3. S. 260–271.
7. Zuev V.V., Korotkova E.M., Pavlinskii A.V. Klimaticheski obuslovlennyye izmeneniya rastitel'nogo pokrova taigi i tundry Zapadnoi Sibiri v 1982–2015 gg. po dannym sputnikovyykh nablyudeniya // Issledovaniya Zemli iz kosmosa. 2019. № 6. S. 66–76. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019666-76>
8. Izmeneniya temperaturnogo polya merzlykh porod i sostoyaniya geosistem na territorii Urengoiiskogo mestorozhdeniya za poslednie 35 let (1974–2008) / D.S. Drozdov, N.G. Ukraintseva, A.M. Tsarev, S.N. Chekrygina // Kriosfera Zemli. 2010. T. 14. № 1. S. 22–31.
9. Konishchev V.N. Reaktsiya vechnoi merzloty na poteplenie klimata // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2009. № 4. S. 10–20.
10. Moskalenko N.G. Izmenenie temperatury porod i rastitel'nosti pod vliyaniem menyayushchegosya klimata i tekhnogeneza v Nadymskom raione Zapadnoi Sibiri // Kriosfera Zemli. 2009. T. 13. № 4. S. 18–23.
11. Pavlov A.V., Malkova G.V. Dinamika kriolitozony Rossii v usloviyakh sovremennykh izmenenii klimata XX–XXI vekov // Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. 2010. № 5. S. 44–51.
12. Rastitel'nyi pokrov Zapadno-Sibirskoi ravniny / I.S. Il'ina, E.I. Lapshina, N.N. Lavrenko i dr. Novosibirsk: Nauka, 1985. 251 s.
13. Tigeev A.A., Moskovchenko D.V., Fakhretdinov A.V. Sovremennaya dinamika prirodnoi i antropogennoi rastitel'nosti zony predtundrovyykh lesov Zapadnoi Sibiri po dannym vegetatsionnogo indeksa // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. T. 18. № 4. S. 166–177. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177>
14. Fakhretdinov A.V., Aref'ev S.P., Moskovchenko A.V. Ekologicheskoe sostoyanie listvennichikov v ekotone lesotundry Zapadnoi Sibiri (na primere doliny r. Mongayurbei) // Sibirskii ekologicheskii zhurnal. 2022. T. 29. № 4. S. 464–475. <https://doi.org/10.15372/SEJ20220407>

15. Cherepanov A.S. Druzhinina E.G. Spektral'nye svoistva rastitel'nosti i vegetatsionnye indeksy // Geomatika. 2009. № 3. S. 28–32.
16. Dynamics of aboveground phytomass of the circumpolar Arctic tundra during the past three decades / H.E. Epstein, M.K. Raynolds, D.A. Walker et al. // Environmental Research Letters. 2012. Vol. 7. № 1. P. 015506.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/015506>
17. Moskalenko N. Impact of climate warming on vegetation cover and permafrost in West Siberia northern taiga // Natural Science. 2013. Vol. 5. № 1. P. 144–148.  
<https://doi.org/10.4236/ns.2013.51A022>
18. Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: Interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index / D.A. Walker, U.S. Bhatt, M.K. Raynolds et al. // Environmental Research Letters. 2009. Vol. 4. № 4. P. 045004.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045004>
19. NDVI FAQ: All You Need To Know About Index. 2021. URL: <https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/> (Data obrashcheniya 28.10.2021).