



Информативность вегетационных индексов для исследования видового состава и фитомасс древостоя в горно-лесных ландшафтах хребта Тукурингра

Александр Владимирович ХОРОШЕВ¹
доктор географических наук, профессор
avkh1970@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5254-2651>

Мария Витальевна БОНДАРЕНКО²
студентка
mariabondarenko46@gmail.com

Федор Константинович КИРЬЯНОВ-ГРЕФ³
аспирант
f.kgref@gmail.com

¹⁻³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

Аннотация. Непрерывные по площади и во времени оценки фитомассы и растительных сообществ востребованы в связи с проблемой неодинаковой чувствительности ландшафтов к климатическим изменениям. Для лесных ландшафтов заповедника «Зейский» (хребет Тукурингра) оценена информативность вегетационных индексов как индикаторов структуры фитоценоза. По данным измерений 2755 деревьев на 4 площадках в поясах хвойных и смешанных лесов рассчитаны фракции надземной древесной фитомассы с использованием моделей Усольцева. Проведена количественная оценка связей между вегетационными индексами (NDVI и др.), рассчитанными по космоснимкам Landsat, и характеристиками структуры фитоценоза. Оценена сезонная изменчивость связей. Построены мультирегрессионные модели зависимости индексов от показателей структуры фитоценоза и фитомасс. Установлено, что годовой ход вегетационных индексов отражает в основном изменения соотношения зеленой фитомассы лиственных и хвойных пород. Летом повышенные NDVI характерны в случае большой доли лиственных пород, а весной и осенью – хвойных вечнозеленых. Для еловых лесов характерно наличие резкого июльского пика NDVI, а для хвойно-лиственных – равномерно высокие значения индекса в течение летнего периода. NDVI индицирует фактическую фитомассу только на межландшафтном уровне, охватывающем разнообразие различных высотных поясов и фитоценозов. Сравнение информации, которая содержится в вегетационных индексах, между высотными поясами показала, что индексы более тесно связаны с соотношением лиственных и хвойных пород и фактической фитомассой листвы, чем с плотностью древостоя, полной фитомассой, фитомассой других фракций и свойствами травяного яруса. На внутриурочищном уровне NDVI индицирует фитомассы только в переходные сезоны в березово-кедрово-лиственных лесах. NDVI является более информативным индикатором соотношений сумм площадей сечений лесообразующих пород, особенно дуба монгольского и ели аянской, чем их расчетных фитомасс.

Ключевые слова: древостой, фитомасса, фракция, NDVI, сезон

Для цитирования: Хорошев А.В., Бондаренко М.В., Кирьянов-Греф Ф.К. Информативность вегетационных индексов для исследования видового состава и фитомасс в горно-лесных ландшафтах хребта Тукурингра // Тихоокеанская география. 2025. № 3. С. 30–43. https://doi.org/10.35735/26870509_2025_23_3.

Original article

Informativeness of vegetation indices for studying species composition and phytomass in mountain-forest landscapes of the Tukuringra ridge

Alexander V. KHOROSHEV¹

Doctor of Geographical Sciences, Professor

avkh1970@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5254-2651>

Maria V. BONDARENKO²

Student

mariabondarenko46@gmail.com

Fedor K. KIRYANOV-GREF³

Post-graduate student

f.kgref@gmail.com

¹⁻³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. Continuous estimates of phytomass and plant communities over area and time are in demand due to the problem of different sensitivity of landscapes to climate change. The information derived from vegetation indices as indicators of phytocenosis structure was estimated for forest landscapes of the Zeisky Reserve. Fractions of aboveground woody phytomass were calculated using Usoltsev models based on measurements of 2755 trees at 4 sample plots in coniferous and mixed forest belts. We assessed quantitatively the relationships between vegetation indices (NDVI, etc.) calculated from Landsat satellite images and phytocenosis structure characteristics. Seasonal variability of the relationships was assessed. Multiple regression models were applied to reveal how vegetation indices indicate phytocenosis structure indicators and phytomass. We found evidence that the annual course of vegetation indices mainly reflects changes in the ratio of green phytomass of deciduous and coniferous species. In summer, elevated NDVI is typical for a large proportion of deciduous species, while in spring and autumn for coniferous non-deciduous ones. Spruce forests exhibit a sharp peak of NDVI in July, while coniferous-deciduous forests show uniformly high index values in summer. NDVI indicates the actual phytomass only at the interlandscape level that cover the diversity of different altitudinal belts and phytocenoses. Comparison of information contained in vegetation indices between altitudinal belts showed that the indices are more closely associated with the ratio of deciduous and coniferous species and the actual phytomass of foliage than with the density of the tree stand, total phytomass, phytomass of other fractions, and the properties of the herbaceous layer. At the local level, NDVI indicates phytomass only in transitional seasons in birch-cedar-larch forests. NDVI is a more informative indicator for the ratios of basal areas of forest-forming species, especially *Quercus mongolica* and *Picea ajanensis*, than their estimated phytomass.

Keywords: forest stand, phytomass, fraction, NDVI, season

For citation: Khoroshev A.V., Bondarenko M.V., Kiryanov-Gref F.K. Informativeness of vegetation indices for studying species composition and phytomass in mountain-forest landscapes of the Tukuringra ridge. *Pacific Geography*. 2025;(3):30-43. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2025_23_3.

Введение

В последние десятилетия оценка надземной фитомассы лесов с использованием данных дистанционного зондирования привлекает повышенное внимание в связи со спросом на глобальные сценарии изменения климата, утраты биоразнообразия, изменений углеродного баланса [1]. Необходимы именно непрерывные по площади и во времени оценки фитомассы и продуктивности растительных сообществ, которые отражали бы неодинаковую чувствительность ландшафтов к климатическим изменениям. Очевидна целесообразность использования многолетних рядов относительных показателей состояния растительности, получаемых на основе спектральных индексов, тесно коррелирующих с уровнем фотосинтетической активности и влагосодержанием [2]. Однако отмечается, что многие важные параметры лесов оптические методы надежно не отражают: проблематично отличить молодой лес от старого или выявить средние диаметр и высоту древостоев [3]. В то же время длительные ряды данных о продуктивности обеспечиваются дендрохронологическими методами, которые, к сожалению, всегда имеют точечный характер. Поэтому требуется изучение вопроса согласованности данных о ежегодных приростах древесины и о зеленой фитомассе, индицируемой космоснимками. Наконец, поскольку лесные ландшафты представляют собой сложные многоярусные геосистемы, важно рассмотреть возможность использования дистанционной информации для оценки пространственного распределения разных фракций фитомассы. Трудоемкость непосредственных измерений фитомассы лесов заставляет обращаться к моделям, связывающим ее с таксационными показателями [3, 4].

Информативность вегетационных индексов относительно подробно исследована с точки зрения чувствительности продуктивности к климатическим трендам и флуктуациям [5–7]. Динамика NDVI используется для распознавания типов растительных сообществ [8]. Разработаны методы разделения вклада фотосинтезирующей и нефотосинтезирующей составляющих фитомассы на основе мультиспектральной информации [9]. Исследовался вопрос о зависимости изменчивости NDVI от температур поверхности [10]. В работах Э.Г. Коломыца с соавторами информативность NDVI оценивалась по связи с нетто-продукцией, которая рассчитывалась по пространственной модели ее зависимости от параметров рельефа; при этом корреляции для Кавказа оказались довольно слабыми, а для лесов Волжского бассейна значимыми [11, 12]. Обращалось внимание на ослабление корреляций в зависимости от масштабного уровня исследования в связи с неоднозначной зависимостью фотосинтетической активности от материально-энергетических ресурсов среды [12].

Целью нашего исследования была оценка информативности вегетационных индексов как индикаторов структуры фитоценозов лесных ландшафтов на примере хребта Тукурингра в Амурской области. Для этого решались следующие задачи: а) расчет фракций древесной фитомассы лесов по данным полевых исследований с использованием моделей В.А. Усольцева, б) количественная оценка связей между вегетационными индексами и характеристиками структуры фитоценоза, в) анализ сезонной изменчивости информативности вегетационных индексов как показателей структуры фитоценозов.

Материалы и методы

Сбор полевого материала производился в июле и августе 2023 и 2024 гг. в Амурской области на территории государственного природного заповедника «Зейский» в пределах южного макросклона хребта Тукурингра на четырех пробных полигонах (см. рис.). На высотах 350–500 м распространены дубово-черноберезовые леса с маньчжурскими видами на северной границе ареала (*Quercus mongolica*, *Tilia amurensis*, *Betula davurica*, *Lespedeza bicolor*) на буроземах и подбурях; по мере увеличения высоты дуб выпадает из

состава древостоя и смешанные дубово-черноберезовые леса сменяются почти чистыми черноберезниками с примесью березы плосколистной (*Betula platyphylla*) и лиственницы (*Larix gmelinii*); высоты 1000–1100 м занимает пояс темнохвойной тайги с елью аянской (*Picea ajanensis*) на буроземах и подзолистых гумусово-иллювиальных почвах [13].

Полигон ПП-1 («Гольцы») расположен на северо-западе заповедника, на пологом (10–20°) южном склоне (см. рис.) на абсолютной высоте 1335 м. Представлен еловый лес (*Picea ajanensis*) с участием березы плосколистной (*Betula platyphylla*) бруснично-зеленомошный и разнотравный, а в верхней части площадки возрастает участие кедрового стланика (*Pinus pumila*). Наиболее часто на площадках встречались фитоценозы: березово-еловый с кедровым стлаником мелкотравно-мохово-брусничный лес и еловый с развитым кедровым стлаником травяно-моховый лес.



Рис. Расположение полигонов исследования в пределах южного макросклона хребта Тукурингра. Источник – Google Earth.

Fig. Location of the sample plots within the southern macroslope of the Tukuringra ridge. Source: Google Earth.

Полигон ПП-2 расположен на высотах 340–359 м на юго-западном волнистом склоне (20–25°) вблизи залива Теплый. Характерны лиственничные леса с осинкой и березой (*Betula platyphylla*, *Betula davurica*) травяные. Более чем на половине площадок произрастает лиственничный с березой и осинкой с зарослями леспедецы (*Lespedeza bicolor*) травяной лес. Также встречаются лиственничный с березой, осинкой (*Populus tremula*) и дубом (*Quercus mongolica*) крупнотравный лес и березово-лиственничный с леспедецей и шиповником травяной лес. Для этих лесов характерны бурые лесные и подзолистые гумусово-иллювиальные почвы [13].

Полигон ПП-3 расположен на высотах 366–373 м на южном крутом (25–35°) склоне. Характерны сложные лиственничные (*Larix gmelinii*) леса с березой черной (*Betula davurica*) и участками кедра корейского (*Pinus koraiensis*) травяные, а также разреженный березовый лес с лиственницей. В нижней части склона в большей степени распространен лиственничный с березой и осинкой с зарослями леспедецы и кустарниками травяной или

с единичной сосной и редкими кустарником травяной лес. Выше встречается чередование открытых участков с сосной и участков с березово-лиственничным травяным с леспедецей лесом, разреженный березовый с лиственницей травяной с таволгой лес, разреженный березовый с лиственницей травяной с таволгой и зарослями леспедецы лес.

Полигон ПП-4 расположен на высотах 339–363 м на юго-западном (20–25°) склоне. Характерны дубовые и дубово-черноберезовые разнотравные леса. Наиболее распространенные фитоценозы: березово-дубовый с леспедецей травяной лес и березово-дубовый с лиственницей с леспедецей травяной лес

На каждом из четырех полигонов была разбита регулярная сетка с 25–26 площадками 30×30 м, центр которых совпадал с центральной точкой пикселей космических снимков Landsat. Соответствие пикселям Landsat позволяет в дальнейшем сопоставлять характеристики ландшафтов и растительности, полученные в поле, с их спектральными характеристиками. Местонахождение центров пикселей на местности определялось с помощью GPS-навигатора. На каждой площадке измерены: сумма площадей сечений деревьев релаксометром Биттерлиха; высоты деревьев электронным высотометром, обхвата случайных 30 деревьев. Всего были получены характеристики 2755 экземпляров деревьев различных пород, которые в дальнейшем использовались для расчета фракций фитомассы древесного яруса (табл. 1).

Для расчета спектральных характеристик растительности использовались мультиспектральные снимки Landsat 9, находящиеся в открытом доступе (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Даты безоблачных снимков выбирались исходя из необходимости относительно равномерного обзора летнего и переходных сезонов.

Фитомасса деревьев рассчитывалась по регрессионным моделям на основе полевых данных о полноте древостоя, высоте и диаметре ствола случайных деревьев на каждой из 25 точек на четырех площадках работ. Для расчета использовались регрессионные модели, в основе которых лежит зависимость фракционного состава фитомассы модельных деревьев от их диаметра и высоты. Для большей части древесных пород использовались регрессионные модели В.А. Усольцева [4], основанные на обширной базе данных о структуре фитомассы, сопряженной с основными морфометрическими показателями модельных деревьев, взятых на пробных площадях лесов Евразии. База данных включает информацию о породе дерева, его диаметре и высоте, а также фактическую массу дерева, его ствола, ветвей и листвы (хвои). В моделях, основанных на аллометрической функции, зависимой переменной является фитомасса дерева или его фракций, независимыми переменными – диаметр и высота ствола дерева [14].

Модель Усольцева для деревьев использовалась для расчета фитомасс березы плосколистной, березы черной, дуба монгольского, ели аянской, лиственницы Гмелина, липы амурской, осины обыкновенной, кедра корейского:

$$\ln P_i = a_0 + a_1(\ln H) + a_2(\ln H)^2 + a_3(\ln D) + a_4(\ln D)^2 + a_5(\ln D \cdot \ln H) + \sum(a_i X_i), \quad (1)$$

где P_i – масса i -й фракции дерева в абсолютно сухом состоянии, кг (ствола, ветвей, листвы или хвои и надземная, соответственно P_{st} , P_{br} , P_f , P_a – см. ниже), a_0 – a_5 – константы при независимых переменных (коэффициенты регрессии), $\sum(a_i X_i)$ – константа для i -й фракции дерева X -го экорегиона (фиктивная переменная), H – высота дерева, м (независимая переменная), D – диаметр ствола дерева на высоте 130 см (независимая переменная).

По моделям Усольцева (1) и собственным полевым данным были рассчитаны общие наземные фитомассы, фитомассы стволов, ветвей и листвы всех измеренных деревьев. Для минимизации возможности ошибок после расчета фитомасс каждой породы полученные данные проверялись на наличие экстремальных значений. Для этого использовались таксационные таблицы, составленные Усольцевым по его регрессионным моделям для некоторых пород деревьев путем табулирования моделей фитомассы по задаваемым значениям высоты и диаметра дерева. В ходе сравнения было выявлено значительное расхождение табличных значений с рассчитанными фитомассами всех фракций ели аянской

и фитомассами листвы дуба монгольского. Оказалось, что наземная фитомасса деревьев начинает резко расти при превышении значения диаметра 25 см. Так как высоты деревьев измерены в поле с меньшей точностью, чем диаметры стволов, были составлены следующие регрессионные модели, где за независимую переменную был взят именно диаметр ствола:

$$\begin{aligned} Pa &= 14.8018 \cdot D - 128.6952, \text{ (коэффициент детерминации КД } 0.956); \\ Pst &= -100.8645 + 11.65954 \cdot D, \text{ (КД } 0.962); \\ Pbr &= -19.97523 + 2.24102 \cdot D, \text{ (КД } 0.936); \\ Pf &= -7.78553 + 0.89684 \cdot D, \text{ (КД } 0.777), \end{aligned} \tag{2}$$

где P_a – масса надземной фракции, P_{st} – масса ствола, P_{br} – масса ветвей, P_f – масса листвы или хвои, D – диаметр ствола дерева на высоте 130 см.

Было принято решение использовать для всех экземпляров ели аянской с диаметром до 23 см значения фитомассы по моделям Усольцева, а для всех экземпляров с диаметром более 23 см – фитомассы, рассчитанные по уравнениям (2) зависимости от диаметра. Таким образом, рассчитанные фитомассы оказались близки к значениям таксационных таблиц.

Расчеты фитомасс были проведены для 2755 экземпляров деревьев, измеренных при полевых работах. Для каждой из 101 площадок рассчитаны: суммы площадей сечений ($\text{м}^2/\text{га}$), плотность древостоев для каждой породы ($\text{шт}/\text{га}$), фитомассы надземных фракций деревьев в $\text{т}/\text{га}$. Затем рассчитывались медианные значения для каждого из 4 полигонов.

Для каждой площадки, соответствующей пикселу Landsat 9, по данным 7 снимков (февраль, апрель, июнь, июль, август, сентябрь 2023 г.) рассчитаны нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) и индекс ARVI, косвенно характеризующие фотосинтетически активную фитомассу, и индекс NDWI, отражающий содержание жидкой влаги в листьях. Согласно [15], NDWI менее чувствителен к атмосферным воздействиям по сравнению с NDVI, но при этом более восприимчив к эффектам отражения почв.

В силу несоответствия распределения основных характеристик растительности и рассчитанных фактических фитомасс деревьев нормальному для оценок тесноты связи между вегетационными индексами и измеренными и рассчитанными характеристиками фитоценоза использованы непараметрические коэффициенты корреляции Спирмена (КК).

Для всех полигонов и для каждого месяца составлялись мультирегрессионные уравнения, где зависимой переменной был NDVI, а независимыми – сумма площадей сечений лесообразующих пород, расчетные фитомассы фракций древостоя, сомкнутость крон, проективное покрытие трав и мхов. Для отбора значимых переменных применялся прямой пошаговый выбор при критерии Фишера $F=1$. Вклады переменных в дисперсию NDVI оценивались по модулям стандартизованных регрессионных коэффициентов, суммарная доля объясненной дисперсии NDVI – по коэффициентам детерминации (КД). По аналогии для всего массива данных и отдельно для четырех полигонов строились мультирегрессионные уравнения, где независимыми переменными были NDVI за 7 сроков в месяцы с февраля по сентябрь, а зависимыми – суммы площадей сечений отдельных пород и соотношение хвойных и лиственных.

Результаты

Сравнительный анализ информативности индексов показал следующее. В феврале рост NDVI сопровождается ростом ARVI (КК 0.74), но уменьшением NDWI (КК -0.51). В апреле и мае также наблюдается высокая положительная корреляция между NDVI и ARVI (КК 0.89 и 0.84 соответственно). В мае наблюдается слабая, но статистически достоверная связь NDVI с NDWI (КК 0.25) и ARVI с NDWI (КК 0.23). В летний период во все месяцы между всеми индексами наблюдается высокая положительная связь (КК

0.82–0.99). На осеннем снимке NDVI имеет высокую связь и с ARVI (КК 0.79), и с NDWI (КК 0.77), но связь между ARVI и NDWI слабее (КК 0.39). Таким образом, индексы NDVI и ARVI в течение всего года взаимозаменяемы. Индекс NDWI можно считать источником независимой информации о влагосодержании в зеленой фитомассе.

Значения NDVI в летние месяцы возрастают от хвойного пояса (ПП-1) к хвойно-лиственному (ПП-2, ПП-3, ПП-4) (табл. 1).

Таблица 1

Медианы значений NDVI и фракций фитомассы древесного яруса

Table 1. Medians of NDVI values and fractions of tree layer phytomass (based on the results of measurements at 80 sites within 4 polygons. Goltzy is a coniferous belt; PP2-4 is a coniferous-broadleaf belt)

Показатели фитоценоза	Полигоны			
	ПП-1	ПП-2	ПП-3	ПП-4
Количество площадок	11	21	22	26
Средняя сомкнутость крон	0.42	0.35	0.37	0.32
Отношение хвойные/лиственные по суммам площадей сечений	4.33	1.50	1.53	0.11
NDVI 05.02.2023	0.34	0.22	0.09	0.08
NDVI 09.04.2023	0.20	0.06	0.16	0.11
NDVI 20.05.2023	0.20	0.20	0.25	0.19
NDVI 12.06.2023	0.29	0.35	0.38	0.43
NDVI 23.07.2023	0.37	0.37	0.41	0.45
NDVI 08.08.2023	0.34	0.35	0.39	0.43
NDVI 24.09.2023	0.23	0.16	0.25	0.21
Общая наземная фитомасса деревьев, т/га	64.29	39.70	27.82	78.49
Фитомасса стволов, т/га	45.09	28.70	19.16	39.59
Фитомасса ветвей, т/га	8.93	7.35	3.68	14.79
Фитомасса листвы, т/га	3.84	1.24	1.12	37.99
Фитомасса, сумма по фракциям, т/га	57.66	40.30	24.94	96.03

Примечание: по результатам измерений на 80 площадках в пределах 4 полигонов. Гольцы – площадка в хвойном поясе, ПП-2, ПП-3, ПП-4 – площадки в хвойно-широколиственном поясе.

В сентябре наибольшие значения NDVI наблюдаются на площадках ПП-1 и ПП-3 в силу распространения на них вечнозеленых пород. На этих же площадках наиболее велик разброс NDVI в течение года. Значения NDVI в хвойном поясе (ПП-1) в зимние месяцы сопоставимы с таковыми в летние месяцы в поясе смешанных лесов.

Наиболее высокие значения рассчитанной общей наземной фитомассы и фитомассы стволов характерны для еловых (ПП-1) и лиственнично-широколиственных лесов (ПП-4), более низкие – для площадок ПП-2 и ПП-3 с широколиственно-лиственничными лесами (см. табл. 1). Высокими значениями фитомассы листвы и большим их разбросом выделяется полигон ПП-4, где доминирует дуб и представлены оба вида березы, осина и лиственница.

Годовой ход NDVI несколько отличается в разных высотных поясах. На полигоне ПП-1 для NDVI характерен рост в течение мая и июня, максимум в июле и падение в августе и сентябре; повышение индекса от весны к июлю значительное. Это согласуется с данными для хвойных лесов [16], в отличие от более плавного хода в теплый сезон у лиственных пород [17]. Зимний максимум NDWI связан со снежным покровом. Раннелетний минимум NDWI связан с оголенной почвой, наличие которой, несмотря на высокую влажность, уменьшает значения индекса [15] одновременно с началом вегетации [18]. Дальнейшее возрастание NDWI летом связано с приростом хвои и развитием листьев березы. Осенний минимум связан с отмиранием листвы и ухудшением свойств хвои. На полигонах ПП-2 и ПП-3 для NDVI и NDWI хорошо выражена устойчивость значений с июня по август без резкого пика.

Исследование информативности вегетационных индексов на межландшафтном уровне, охватывающем данные всех 4 полигонов в поясах хвойных и хвойно-лиственных лесов, дало следующие результаты.

Увеличение значений индексов при росте сомкнутости крон характерно в переходные сезоны (КК 0.2...0.4) (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициент корреляции Спирмена между вегетационными индексами и характеристиками растительности

Table 2. Spearman correlation coefficient between vegetation indices and vegetation characteristics (based on measurements at 101 sites of four types of natural boundaries in the coniferous-forest and mixed-forest belts. 1 – *Picea ajanensis*, 2 – *Betula platyphylla*, 3 – *Betula davurica*, 4 – *Larix gmelinii*, 5 – *Populus tremula*, 6 – *Quercus mongolica*, 7 – *Pinus koraiensis*, 8 – Coniferous/deciduous ratio, 9 – crown density. Bold italics – significant values at $p<0.05$)

Индекс День/месяц	Сумма площадей сечений, м²/га									Плотность, шт/га						
	1	2	3	4	5	6	7	8		1	2	3	4	5	6	7
NDVI 05/02	0.46	-0.10	-0.46	-0.22	-0.27	-0.41	-0.34	0.07	0.55	0.39	0.10	-0.38	0.51	0.05	-0.06	0.04
ARVI 05/02	0.48	-0.07	-0.31	-0.38	-0.29	-0.09	-0.21	0.12	0.29	0.45	0.11	-0.37	0.24	-0.14	-0.09	0.02
NDWI 05/02	-0.20	-0.10	0.38	-0.13	-0.21	0.04	0.58	0.02	-0.18	0.42	0.10	0.57	-0.32	-0.04	-0.07	0.12
NDVI 09/04	0.42	-0.08	0.10	-0.35	-0.53	-0.22	0.33	0.27	0.34	0.19	0.16	0.53	-0.12	0.01	0.37	0.16
ARVI 09/04	0.40	0.00	0.07	-0.38	-0.39	-0.02	0.24	0.28	0.18	0.26	0.12	0.43	-0.22	0.02	0.35	0.07
NDWI 09/04	0.36	-0.16	-0.56	-0.41	-0.24	-0.42	-0.46	0.12	0.39	0.58	0.10	-0.50	0.29	0.01	-0.31	0.18
NDVI 20/05	0.14	0.13	0.27	0.32	-0.30	-0.28	0.62	0.20	0.45	0.12	0.13	0.40	0.24	-0.19	0.15	-0.23
ARVI 20/05	0.26	0.16	0.22	0.06	-0.31	-0.11	0.55	0.24	0.32	0.32	0.11	0.36	0.04	-0.19	0.36	-0.34
NDWI 20/05	0.37	-0.29	-0.27	-0.20	-0.60	-0.68	0.15	0.30	0.79	0.66	0.17	0.22	0.47	0.05	0.10	-0.13
NDVI 12/06	-0.34	0.32	0.43	0.27	0.50	0.71	0.16	-0.17	-0.75	-0.60	-0.18	-0.20	-0.46	-0.14	0.13	-0.30
ARVI 12/06	-0.31	0.34	0.42	0.24	0.47	0.70	0.18	-0.15	-0.73	-0.55	-0.16	-0.18	-0.46	-0.14	0.11	-0.25
NDWI 12/06	-0.36	0.34	0.38	0.31	0.53	0.72	0.10	-0.11	-0.70	-0.64	-0.19	-0.49	-0.33	-0.21	0.17	-0.26
NDVI 23/07	0.08	0.46	0.30	-0.05	0.32	0.66	0.04	-0.00	-0.59	0.19	0.02	-0.20	-0.42	-0.11	0.20	-0.42
ARVI 23/07	0.12	0.43	0.28	-0.13	0.25	0.62	0.05	-0.00	-0.54	0.19	0.05	-0.16	-0.42	-0.11	0.18	-0.39
NDWI 23/07	0.18	0.46	0.08	-0.15	0.31	0.63	-0.15	0.12	-0.47	0.20	0.03	-0.45	-0.29	-0.16	0.39	-0.35
NDVI 08/08	-0.05	0.42	0.39	0.05	0.34	0.68	0.12	-0.01	-0.64	0.02	-0.06	-0.20	-0.45	-0.16	0.17	-0.22
ARVI 08/08	0.02	0.42	0.37	-0.00	0.30	0.65	0.10	0.01	-0.61	0.12	-0.03	-0.12	-0.43	-0.14	0.12	-0.20
NDWI 08/08	0.22	0.46	0.14	-0.18	0.28	0.63	-0.11	0.17	-0.43	0.15	-0.04	-0.57	-0.35	-0.20	0.16	-0.19
NDVI 24/09	0.19	-0.11	0.19	-0.14	-0.48	-0.23	0.58	0.25	0.27	0.28	0.11	0.46	-0.08	-0.15	0.42	-0.42
ARVI 24/09	-0.15	0.07	0.40	0.06	-0.10	0.19	0.60	0.15	-0.13	0.31	0.02	0.54	-0.12	-0.14	0.37	-0.45
NDWI 24/09	0.26	-0.17	-0.08	-0.10	-0.55	-0.52	0.42	0.45	0.59	0.37	0.14	0.24	0.33	-0.11	0.08	-0.26

Примечание: по данным измерений на 101 площадке четырех видов урочищ хвойно-лесного и смешаннолесного поясов. 1 – ель аянская, 2 – береза плосколистная, 3 – береза черная, 4 – лиственница Гмелина, 5 – осина, 6 – дуб монгольский, 7 – кедр корейский, 8 – отношение хвойные/лиственные, 9 – сомкнутость крон. Жирный курсив – достоверные значения при уровне значимости $p<0,05$.

Уменьшение значений NDVI при росте проективного покрытия трав характерно в летний сезон, в переходные сезоны – также для NDWI. NDVI растет сопряженно с плотностью лиственных пород летом (КК 0.47...0.67), несколько слабее – с плотностью листопадных (лиственных и лиственницы Гмелина). Летом плотность хвойных отрицательно коррелирует с индексами NDVI и ARVI (КК -0.37...-0.68) в связи с существенным ростом зеленой массы лиственных пород. Низкие значения связи с NDWI характерны для июля и августа (КК -0.27...-0.29); весной и осенью наблюдается положительная умеренная связь (КК 0.58...0.73). Сумма площадей сечений лесообразующих пород (м²/га) отражается в значениях NDVI лучше, чем плотность (шт/га) для березы плосколистной и черной, осины, дуба, кедра; хуже – для лиственницы (табл. 2).

Мультирегрессионные уравнения (табл. 3) показали высокую зависимость NDVI от сумм площадей сечений лесообразующих пород во все месяцы, но особенно в летние при решающем вкладе обилия дуба, который резко доминирует на полигоне ПП-4. Совокупность NDVI семи месяцев наиболее эффективно индицирует обилие ели и дуба, в меньшей степени – березы плосколистной и лиственницы.

Таблица 3

Параметры зависимости между NDVI в 2023 г. и суммами площадей сечений лесообразующих пород

Table 3. Relationship between NDVI in 2023 and the basal areas of forest-forming species.
(Forward stepwise method with F=1. The calculation includes data on 101 sites at 4 model polygons in the coniferous and coniferous-broadleaf forest belts)

	Уравнение NDVI=F(Породы)							Уравнение Порода=F(NDVI)
Параметр уравнения	Дата в 2023 г.							Все даты
	05.02	09.04	20.05	12.06	23.07	05.08	24.09	
Коэффициент детерминации	0.52	0.43	0.45	0.63	0.68	0.67	0.37	Коэффициент детерминации
Стандартизованный регрессионный коэффициент								
Ель аянская	0.27	0.54	0.11	-0.26	–	–	0.17	0.65
Береза черная	-0.35	0.12	0.24	0.24	0.23	0.29	0.23	0.24
Дуб монгольский	-0.33	–	-0.08	0.36	0.48	0.47	–	0.61
Лиственница Гмелина	-0.22	-0.13	0.23	-0.32	-0.30	-0.29	-0.35	0.43
Кедр корейский	-0.27	0.21	0.56	0.18	0.15	0.22	0.35	0.36
Береза плосколистная	-0.17	-0.13	0.22	0.31	0.42	0.36	–	0.41
Осина	-0.13	-0.17	–	0.20	0.11	0.15	-0.09	0.26

Пр и м е ч а н и е : метод прямого пошагового выбора при критерии Фишера F=1. В расчет включены данные по 101 площадке на 4 модельных полигонах в поясах хвойных и хвойно-широколиственных лесов.

Проверим гипотезу об информативности вегетационных индексов, рассчитанных по снимкам разных сезонов, как индикаторов фактической фитомассы деревьев на площадках.

Для зимнего сезона (05.02.2023) между фитомассами и NDVI не прослеживается достоверной связи, в то время как индекс ARVI с фитомассами всех фракций имеет достоверную положительную слабую и умеренную связь (КК 0.25...0.39), а индекс NDWI достоверно отрицательно коррелирует с фитомассой ветвей (КК -0.26). В ранневесенний период (09.04.2023) выявляется только одна достоверная связь – между ARVI и фитомассой стволов (КК 0.21).

Поздней весной (20.05.23) зафиксирована достоверная отрицательная связь между общими фитомассами и фитомассами ветвей и листвы с NDVI и NDWI. Это могло быть связано с более ранним началом вегетации травяного яруса, однако вегетационные индексы на всех площадках отрицательно коррелировали с проективным покрытием трав. При исключении из выборки таежной площадки ПП-1 отрицательная связь между индексами и фактическими фитомассами усиливается. В осенний период корреляция между вегетационными индексами и фитомассами деревьев также отрицательная. Таким образом, отрицательная корреляция между NDVI, NDWI и фактическими фитомассами свойственна переходным сезонам. Указывалось [19], что отрицательное смещение вегетационных индексов в зимний период из-за влияния снежного покрова может приводить к повышению значений NDVI во время таяния снега, даже если это не связано с повышенной активностью растительности, что отражается в отрицательной связи между вегетационным индексом и фактической фитомассой.

Для всех вегетационных индексов за летний период характерна наибольшая корреляция с общей фитомассой и особенно с фитомассой листвы (КК 0.49...0.68). Меньшая теснота связи прослеживается и между вегетационными индексами и фитомассой ветвей, а на снимках за июль и август – с фитомассами стволов. В целом наиболее высокий уровень связи наблюдается между NDWI за 23.07.2023 и фитомассой листвы (КК 0.68). Наибольшее общее количество значимых связей также характерно для индексов за 23.07.2023, т.е. для пика вегетационного периода.

Рассмотрим зависимости между значениями индексов, суммой площадей сечений (СПС) и расчетными фитомассами для каждого полигона отдельно, т.е. на внутриучастковом уровне.

Для полигона ПП-1, включающего кедровостланиковые и лесные площадки, NDVI мая и летних месяцев с высокой достоверностью отражает сумму площадей сечений березы плосколистной (КК в июле 0.83) и ели аянской (КК в августе 0.73). На пике вегетационного периода в июле минимальные значения NDVI (0.32–0.36) наблюдались на площадках с кедровым стлаником, а на лесных площадках возрастали до 0.46 по мере роста СПС березы. При этом максимальные значения СПС ели соответствовали меньшим NDVI (0.40–0.42). Совокупность значений NDVI за 7 дат разных сезонов указывает на обилие ели и березы плосколистной, о чем свидетельствуют соответственно значения КД 0.63 и КД 0.60 в мультирегрессионном уравнении. Корреляции NDVI с СПС и фитомассами в массиве 11 площадок с лесной растительностью были недостоверными для всех месяцев. В течение теплого периода наблюдается достоверная отрицательная связь вегетационных индексов с проективным покрытием трав: весной с NDVI и ARVI, а летом и осенью – с NDWI.

На площадке ПП-2 с березово-лиственничными лесами в летний период значения вегетационных индексов достоверно возрастают с ростом проективного покрытия трав и уменьшением сомкнутости крон. При одинаковом проективном покрытии трав рост сомкнутости крон снижает июльский NDVI, что свидетельствует о существенном вкладе травяного яруса в сигнал, зафиксированный спутником при сомкнутости крон менее 0.4. В мае повышенный NDVI соответствует площадкам с максимальной СПС березы плосколистной (КК 0.37). Достоверная связь между вегетационными индексами и расчетной фитомассой не прослеживается. Совокупность значений NDVI за 7 дат разных сезонов описывает обилие отдельных лесообразующих пород недостоверно, а соотношение хвойных и лиственных с КД 0.26.

Для площадки ПП-3 с березово-кедрово-лиственничными лесами весной и осенью характерны достоверные положительные связи индексов NDVI, ARVI с фитомассой деревьев (особенно ветвей с КК до 0.52 в сентябре и 0.56 в мае), сомкнутостью крон, СПС лиственницы. В летний период эта связь недостоверна. Стандартизованные коэффициенты мультирегрессионных уравнений (см. табл. 3) показывают, что в мае и сентябре, когда не полностью сформирована или уже опадает листва, основной вклад в высокие NDVI вносит СПС лиственницы (КД 0.77), а в летние месяцы – березы черной (КД 0.46). Совокупность значений NDVI за 7 дат разных сезонов наиболее хорошо описывает обилие лиственницы с КД 0.76, березы черной с КД 0.46.

Для площадки ПП-4 с лиственнично-осиново-березово-дубовыми лесами единственная достоверная связь обнаружена между фитомассой листвы и NDWI за 08.08.2023. В дисперсию NDVI в мае основной положительный вклад вносит СПС лиственницы и, в меньшей степени, березы черной и осины (КД в мае 0.61, в сентябре 0.34). Для летних месяцев уравнения связи NDVI с характеристиками фитоценоза оказались незначимыми. Совокупность значений NDVI за 7 дат разных сезонов наиболее хорошо описывает обилие березы плосколистной с КД 0.60, лиственницы с КД 0.54, дуба с КД 0.28, отношение хвойных и лиственных с КД 0.46.

В нашей работе были проверены гипотезы об информативности вегетационных индексов NDVI, ARVI и NDWI относительно характеристик лесных фитоценозов. В целом информативность NDVI для индикации фитомасс, рассчитанных по моделям Усольцева, для горно-лесных ландшафтов хребта Тукурингра оказалась низкой. Исключение составил раннелетний период (июнь), когда по высоким значениям NDVI достаточно уверенно отделяются дубняки с участием мелколиственных и хвойных пород от лесов с преобладанием лиственницы или ели. Достоверная связь вегетационных индексов с фактическими фитомассами деревьев была выявлена на межландшафтном уровне, охватывающем два высотных пояса. Однако на внутриурочищном уровне подобная закономерность наблюдалась только в березово-кедрово-лиственничных лесах. В то же время наши данные показывают, что на внутриурочищном уровне NDVI могут индцировать соотношения сумм площадей сечений лесообразующих пород и различия формаций и стадий сукцес-

сии. NDVI растёт по мере возрастания доли лиственных пород. В частности, в поясе темнохвойных лесов в тёплый период NDVI фактически отражает различия сумм площадей сечений на уровне формаций (кедрового стланика, ели) и сукцессионных стадий березово-еловых лесов. В более низком поясе хвойно-лиственных лесов NDVI информативен для распознавания состава древостоя и соотношений пород в основном в конце весны и начале лета, когда ярко проявляются контрасты фаз хвойных и мелколиственных видов. Совокупность значений NDVI за разные месяцы несёт наиболее достоверную информацию о суммах площадей сечений лиственницы Гмелина и березы плосколистной.

Достоверные корреляции между дистанционными и наземными данными на межландшафтном уровне, охватывающем несколько высотных поясов и типов сообществ, и преобладание недостоверных корреляций на локальном внутриурочищном уровне согласуется с литературными данными [12, 20, 21] о большей информативности вегетационных индексов в региональном и глобальном масштабах, по сравнению с локальным. Отмечалась пространственная дифференциация NDVI в зависимости от условий рельефа и положения в катене: при благоприятном водном и минеральном режиме почв лесные сообщества могут достичь достаточно высокого уровня продуктивности при низком фотосинтетическом потенциале, а дефицит вещественно-энергетических ресурсов компенсируется увеличением содержания хлорофилла в хвое или листе [12].

Высокая сомкнутость елового древостоя в темнохвойно-лесном поясе способствует более высоким значениям вегетационных индексов в сравнении с слабосомкнутыми древостоями с травяным ярусом. Положение вблизи верхней границы леса может отражаться в нарушении взаимообусловленности размеров различных морфологических частей деревьев, отраженной в аллометрических формулах. В литературе указывалось, что неоднородная структура лесного сообщества по высотам и диаметрам может искажать количественные показатели связи фитомассы и вегетационных индексов [22]. В более разреженных мелколиственно-хвойных лесах заметную роль в значениях вегетационных индексов играют уже травяные сообщества в силу увеличения их видимости спутником. Вариабельность нижних ярусов растительности ранее отмечалась как причина изменчивости оптических признаков в открытых бореальных лесах [23, 24]. Ослабленное влияние нижних ярусов на значения NDVI в густых лесах связано с тем, что ближний инфракрасный канал может улавливать информацию от примерно восьми слоев листьев, в то время как красный канал «видит» только один слой, и, следовательно, при плотном древостое спутник не считывает вегетационные свойства травяных сообществ [25]. Отсутствие достоверных связей между вегетационными индексами и характеристиками фитомассы может быть связано с большой плотностью древостоя и большой фитомассой деревьев на площадке, что снижает достоверность оптических данных в лесах [21, 25]. Сложная структура мелколиственно-хвойных лесов, по сравнению с хвойными, может выравнивать летние значения индексов NDVI и NDWI из-за различий в пике вегетации различных видов. Этот результат согласуется с данными других исследователей, указывающими на ровный ход индекса в летний период при повышенной доле лиственных видов [17].

Заключение и выводы

Годовой ход вегетационных индексов отражает изменения соотношения зеленой фитомассы лиственных и хвойных пород. В летний период среднее значение NDVI увеличивается по мере роста доли лиственных пород, а в весенний и осенний периоды – хвойных вечнозеленых. Для еловых лесов характерно наличие резкого июльского пика NDVI, а для хвойно-лиственных – равномерно высокие значения индекса в течение летнего периода. Индикационная роль вегетационных индексов по отношению к фактической фитомассе древесного яруса проявляется только на межландшафтном уровне, охватывающем разнообразие различных высотных поясов и фитоценозов. На внутриурочищном

уровне NDVI индицирует фитомассы только в переходные сезоны в березово-кедрово-лиственничных лесах. На межландшафтном уровне значения вегетационных индексов NDVI, ARVI, NDWI более тесно связаны с соотношением лиственных и хвойных пород и фактической фитомассой листвы, чем с плотностью древостоя, полной фитомассой деревьев, фитомассой других их морфологических частей и свойствами травяного яруса. NDVI является более информативным индикатором соотношений сумм площадей сечений лесообразующих пород, особенно дуба монгольского и ели аянской, чем их расчетных фитомасс.

В нашей работе была изучена информативность вегетационных индексов как индикаторов фитопродукционного процесса только за один год. Для более глубокого понимания функционирования лесных ландшафтов в дальнейшем необходим анализ изменчивости связей между дистанционными, полевыми и расчетными данными в многолетнем ряду. Это позволит установить, в какой степени гидротермические флуктуации могут влиять на возможность использования дистанционной информации для мониторинга фитопродукционного процесса.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 24-17-00045). Авторы выражают признательность Е.В. Игнатенко, И.Г. Борисовой, Т.Н. Веклич за содействие в организации полевых исследований и консультации.

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 24-17-00045). The authors are grateful to E.V. Ignatenko, I.G. Borisova, T.N. Veklich for assistance in organizing field research and consultation.

Литература

1. Laurin G.V., Balling J., Corona P., Mattioli W., Papale D., Puletti N., Rizzo M., Truckenbrodt J., Urban M. Above-ground biomass prediction by Sentinel-1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel-2 data // *J. Appl. Remote Sens.* 2018. Vol. 12 (1). 016008.
2. Адамович Т. А., Кантор Г. Я., Ашихмина Т. Я., Савиных В. П. Анализ сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории государственного природного заповедника «Нургуш» // *Теоретическая и прикладная экология.* 2018. № 1. С. 18–24.
3. Щепаченко Д.Г., Швиденко А.З., Пергрер К., Дресел К., Фриц Ш., Лакида П.И., Мухортова Л.В., Усольцев В.А., Бобкова К.С., Осипов А.Ф., Мартыненко О.В., Карминов В.Н., Онтиков П.В., Щепаченко М.В., Кракснер Ф. Изучение фитомассы лесов: текущее состояние и перспективы // *Сибирский лесной журн.* 2017. № 4. С. 3–11.
4. Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург, 2016. 338 с.
5. Шевырногов А.П., Чернецкий М.Ю., Высоцкая Г.С. Многолетние тренды NDVI и температуры на юге Красноярского края // *Исследование Земли из космоса.* 2012. № 6. С. 77–87.
6. Fua B., Burgher I. Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater // *Journal of arid environment.* 2015. Vol. 113. P. 59–68.
7. Detsch F., Otte I., Appelhans T., Hemp A., Nauss T. Seasonal and long-term vegetation dynamics from 1-km GIMMS-based NDVI time series at Mt. Kilimanjaro, Tanzania // *Remote Sensing of Environment.* 2016. Vol. 178. P. 70–83.
8. Alcaraz-Segura D., Cabello J., Paruelo J. Baseline characterization of major Iberian vegetation types based on the NDVI dynamics // *Plant Ecology.* 2009. Vol. 202. P. 13–29.
9. Guerschman J.P., Hill M.J., Renzullo L.J., Barrett D.J., Marks A.S., Botha E.J. Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors // *Remote Sensing of Environment.* 2009. Vol. 113. P. 928–945.
10. Богдан Е.А., Белан Л.Н., Туктарова И.О., Вильданов И.Р., Сайфуллин И.Ю., Бахтиярова Р.С. Оценка влияния температуры поверхности земли на NDVI на примере геопарка «Янган-Тау» // *Вестн. Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология.* 2024. № 3. С. 14–21.
11. Залиханов М.Ч., Коломыц Э.Г., Шарая Л.С., Цепкова Н.Л., Сурова Н.А. Высокогорная геоэкология в моделях. М.: Наука, 2010. 487 с.
12. Коломыц Э.Г. Углеродный баланс и устойчивость лесных экосистем при глобальных изменениях климата. М.: Наука, 2020. 423 с.
13. Веклич Т.Н., Игнатенко Е.В., Павлова К.П. Заповедник «Зейский» (Амурская область): краткий очерк // *Биота и среда заповедных территорий.* 2019. № 4. С. 112–125.
14. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии. Методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.

15. Gao B. C. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote sensing of environment*. 1996. Vol. 58, N 3. P. 257–266.
16. Zhou L., Tucker C.J., Kaufmann R.K., Slayback D., Shabanov N.V., Myneni R.B. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 // *J. Geophysical Research*. 2001. 20,069 – 20,083.
17. Hwang T., Song C., Vose J.M., Band L.E. Topography-mediated controls on local vegetation phenology estimated from MODIS vegetation index // *Landscape Ecology*. 2011. Vol. 26. P. 541–556.
18. Delbart N., Le Toan T., Kergoat L., Fedotova V. Remote sensing of spring phenology in boreal regions: A free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982–2004) // *Remote Sensing of Environment*. 2006. Vol. 101, N 1. P. 52–62.
19. Beck P.S.A., Atzberger C.G., Høgda K.A., Johansen B., Skidmore A.K. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI // *Remote sensing of Environment*. 2006. Vol. 100, N 3. P. 321–334.
20. Galidaki G., Zianis D., Gitas I., Radoglou K., Karathanassi V., Tsakiri-Strati M., Woodhouse I., Mallinis G. Vegetation biomass estimation with remote sensing: focus on forest and other wooded land over the Mediterranean ecosystem // *Int. J. Rem. Sens.* 2017. Vol. 38 (7). P. 1940–1966.
21. Lu D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation // *Int. J. Rem. Sens.* 2007. Vol. 27 (7). P. 1297–1328.
22. Gomez C., White J., Wulder M., Alejandro P. Historical forest biomass dynamics modelled with Landsat spectral trajectories // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. Vol. 93. P. 14–28.
23. Chen J.M., Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images // *Remote sensing of Environment*. 1996. Vol. 55, N 2. P. 153–162.
24. Hu B., Inannen K., Miller J.R. Retrieval of leaf area index and canopy closure from CASI data over the BOREAS flux tower sites // *Remote Sensing of Environment*. 2000. Vol. 74, N 2. P. 255–274.
25. Lillesaeter O. Spectral reflectance of partly transmitting leaves: laboratory measurements and mathematical modeling // *Remote sensing of Environment*. 1982. Vol. 12, N 3. P. 247–254.

References

1. Laurin, G.V.; Balling, J.; Corona, P.; Mattioli, W.; Papale, D.; Puletti, N.; Rizzo, M.; Truckenbrodt, J.; Urban, M. Above-ground biomass prediction by Sentinel-1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel-2 data. *J. Appl. Remote Sens.* 2018, 12(1), 016008.
2. Adamovich, T.A.; Kantor, G.Ya.; Ashikhmina, T.Ya.; Savinykh, V.P. Analysis of seasonal and long-term dynamics of the NDVI vegetation index on the territory of the Nurgush State Nature Reserve. *Theoretical and Applied Ecology*. 2018, 1, 18–24. (In Russian)
3. Shchepashchenko, D.G.; Shvidenko, A.Z.; Perger, K.; Dresel, K.; Fritz, Sh.; Lakida, P.I.; Mukhortova, L.V.; Usoltsev, V.A.; Bobkova, K.S.; Osipov, A.F.; Martynenko, O.V.; Karminov, V.N.; Ontikov, P.V.; Shchepashchenko, M.V.; Kraxner, F. Study of forest phytomass: current state and prospects. *Siberian Forest Journal*. 2017, 4, 3–11. (In Russian)
4. Usoltsev, V.A. Phytomass of model trees of forest-forming species of Eurasia: database, climatically determined geography, taxation standards. Ekaterinburg, Russia, 2016; 338 p. (In Russian)
5. Shevymogov, A.P.; Chernetsky, M.Yu.; Vysotskaya, G.S. Long-term trends in NDVI and temperature in the south of Krasnoyarsk Krai. *Research of the Earth from Space*. 2012, 6, 77–87. (In Russian)
6. Fua, B.; Burgher, I. Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater. *Journal of arid environment*. 2015, 113, 59–68.
7. Detsch, F.; Otte, I.; Appelhans, T.; Hemp, A.; Nauss, T. Seasonal and long-term vegetation dynamics from 1-km GIMMS-based NDVI time series at Mt. Kilimanjaro, Tanzania. *Remote Sensing of Environment*. 2016, 178, 70–83.
8. Alcaraz-Segura, D.; Cabello, J.; Paruelo, J. Baseline characterization of major Iberian vegetation types based on the NDVI dynamics. *Plant Ecology*. 2009, 202, 13–29.
9. Guerschman, J.P.; Hill, M.J.; Renzullo, L.J.; Barrett, D.J.; Marks, A.S.; Botha, E.J. Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors. *Remote Sensing of Environment*. 2009, 113, 928–945.
10. Bogdan, E.A.; Belan, L.N.; Tuktarova, I.O.; Vildanov, I.R.; Saifullin, I.Yu.; Bakhtiyarova, R.S. Assessment of the influence of the earth's surface temperature on NDVI using the example of the Yangan-Tau Geopark. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2024, 3, 14–21. (In Russian)
11. Zalikhanov, M.Ch.; Kolomyts, E.G.; Sharaya, L.S.; Tsepkova, N.L.; Surova, N.A. High-mountain geoecology in models. Nauka: Moscow, Russia, 2010; 487 p. (In Russian)
12. Kolomyts, E.G. Carbon balance and sustainability of forest ecosystems under global climate change. Nauka: Moscow, Russia, 2020; 423 p. (In Russian)
13. Veklich, T.N.; Ignatenko, E.V.; Pavlova, K.P. Zeisky Nature Reserve (Amur Region): a brief essay. *Biota and environment of protected areas*. 2019, 4, 112–125. (In Russian)
14. Usoltsev, V.A. Biological productivity of forests of Northern Eurasia. Methods, database and its applications. Ural Branch of the Russian Academy of Sciences: Ekaterinburg, Russia, 2007; 636 p. (In Russian)

15. Gao, B. C. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*. 1996, 58(3), 257-266.
16. Zhou, L.; Tucker, C.J.; Kaufmann, R.K.; Slayback, D.; Shabanov, N.V.; Myneni, R.B. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *J. Geophysical Research*. 2001, 20,069 – 20,083.
17. Hwang, T.; Song, C.; Vose, J.M.; Band, L.E. Topography-mediated controls on local vegetation phenology estimated from MODIS vegetation index. *Landscape Ecology*. 2011, 26, 541–556.
18. Delbart, N.; Le Toan, T.; Kergoat, L.; Fedotova, V. Remote sensing of spring phenology in boreal regions: A free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982–2004). *Remote Sensing of Environment*. 2006, 101(1), 52-62.
19. Beck, P.S.A.; Atzberger, C.G.; Høgda, K.A.; Johansen, B.; Skidmore, A.K. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote sensing of Environment*. 2006, 100(3), 321-334.
20. Galidaki, G.; Zianis, D.; Gitas, I.; Radoglou, K.; Karathanassi, V.; Tsakiri-Strati, M.; Woodhouse, I.; Mallinis, G. Vegetation biomass estimation with remote sensing: focus on forest and other wooded land over the Mediterranean ecosystem. *Int. J. Rem. Sens*. 2017, 38(7), 1940-1966.
21. Lu, D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *Int. J. Rem. Sens*. 2007, 27(7), 1297–1328.
22. Gomez, C.; White, J.; Wulder, M.; Alejandro, P. Historical forest biomass dynamics modelled with Landsat spectral trajectories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014, 93, 14-28.
23. Chen, J.M.; Cihlar, J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote sensing of Environment*. 1996, 55(2), 153-162.
24. Hu, B.; Inannen, K.; Miller, J.R. Retrieval of leaf area index and canopy closure from CASI data over the BOREAS flux tower sites. *Remote Sensing of Environment*. 2000, 74(2), 255-274.
25. Lillesaeter, O. Spectral reflectance of partly transmitting leaves: laboratory measurements and mathematical modeling. *Remote sensing of Environment*. 1982, 12(3), 247-254.

Статья поступила в редакцию 14.02.2025; одобрена после рецензирования 11.03.2025; принята к публикации 20.03.2025.

The article was submitted on 14.02.2025; approved after reviewing on 11.03.2025; accepted for publication on 20.03.2025.

