

Квашнина Анна Евгеньевна,

Федеральное государственное бюджетное учреждение государственный природный заповедник «Денежкин Камень», 624472, Россия, г. Североуральск Свердловской области, ул. Ленина, д. 6, e-mail: *akvaanna@gmail.com*

Возьмитель Фома Константинович,

Федеральное государственное бюджетное учреждение государственный природный заповедник «Денежкин Камень», 624472, Россия, г. Североуральск Свердловской области, ул. Ленина, д. 6, e-mail: *fomovoz@gmail.com*

Янцер Оксана Васильевна,

Кандидат географических наук, Уральский государственный педагогический университет
620019, Россия, г. Екатеринбург Свердловской области, пр. Космонавтов, 26; e-mail: *ksenia_yantser@bk.ru*

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ И ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ
СУММИРОВАННЫХ ФЕНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
В ВЫСОТНЫХ ПОЯСАХ ТЕРРИТОРИИ ЗАПОВЕДНИКА
«ДЕНЕЖКИН КАМЕНЬ»**

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты обработки данных по фенологии растительных сообществ в заповеднике «Денежкин Камень» за период с 2002 по 2021 годы. Фенологические исследования в заповеднике ведутся с применением метода суммирующих (комплексных) фенологических характеристик на семи пробных площадях, расположенных в типичных для территории заповедника типах растительных сообществ. Описаны пространственные и временные закономерности изменения фенологических характеристик в разных поясах растительности. Для низкогорных и среднегорных ценозов выявлены даты переходов в фенофазы “Проклевывание почек”, “Рост листа” и “Молодой лист”. Средние фенологические баллы рассчитаны по пентадам за каждый год наблюдений с использованием линейной интерполяции. Построены пространственные растровые модели распределения фенологических состояний. Проанализирован характер отражения фенологического состояния ценоза на картах распределения нормализованного индекса вегетации по данным дистанционного зондирования Земли низкого разрешения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мониторинг, фенология, фенофаза, фенологические наблюдения, растительные сообщества, вегетативный цикл, пространственный анализ, природные заповедники

Kvashnina Anna Evgenievna,

Russian Federal Nature Preserve (Zapovednik) «Denezhkin Kamen», Russia, Severouralsk

Vosmitel Foma Konstantinovich,

Russian Federal Nature Preserve (Zapovednik) «Denezhkin Kamen», Russia, Severouralsk

Yantser Oksana Vasilievna,

Ph.D., Ural State Pedagogical University (USPU), Ekaterinburg, Russia

SPATIAL AND TEMPORAL ANALYSIS OF THE AVERAGE PHENOLOGICAL INDEX ACROSS VEGETATION ZONES OF THE RUSSIAN FEDERAL NATURE PRESERVE (ZAPOVEDNIK) «DENEZHKIN KAMEN»

ANNOTATION. The paper represents the spatial and temporal trends, revealed through long term analysis of data on the seasonal plant communities' observations in the Zapovednik "Denezhkin Kamen" in years 2002-2021. The phenological data is collected across seven observation plots located in different vertical zones of the preserve's territory in typical types of plant communities. The study reveals turning points in the leaf development cycles of the communities located in the lower and higher parts of the mountain slopes. The average phenological index is calculated for equal five-day calendar periods using linear interpolation. The integrated phenological characteristics are used to describe seasonal development of the plant communities and to build a series of maps containing interpolation of the study results. The revealed spatial and temporal patterns of the plant communities' seasonal development were compared to the available Landsat 8 and Sentinel 2 imagery normalized difference vegetation index maps.

KEYWORDS: monitoring, phenology, phenological phase, phenological observations, plant communities, vegetation cycle, spatial analysis, nature reserves

Введение

Изучение природных процессов в эталонных экосистемах служит реперной точкой для формирования эффективной системы управления в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности. Непрерывный сбор информации об отдельных компонентах экосистем и о характере их взаимодействия необходим для сохранения природных комплексов и ландшафтов, оценки антропогенного воздействия на окружающую среду. Наблюдения за сезонным развитием растительных сообществ являются одним из основных направлений долгосрочного мониторинга, ведущегося в заповедниках Российской Федерации.

В заповеднике «Денежкин Камень» накоплен большой массив данных по фенологии растительных сообществ. Мы проанализировали их сезонное развитие за период с 2002 по 2021 год с целью выявить пространственные и временные закономерности изменения фенологических характе-

ристик, а также проанализировать, как отражается сезонное развитие листовой массы в данных в данных дистанционного зондирования Земли.

Материал и методы

Государственный природный заповедник «Денежкин Камень» расположен в Североуральском и Ивдельском районах Свердловской области. Территория его, площадью в 80 тыс. га, вытянута в меридиональном направлении и находится примерно в 40 км на северо-запад от г. Североуральска. Согласно схеме физико-географического районирования Урала, составленной Прокаевым В. И., дополненной Капустиным В.Г. [3], территория находится в пределах таежной области Уральской равнинно-горной страны, относится к ландшафтной провинции среднегорной полосы Северного Урала. В пределах заповедника различаются три пояса растительности - горно-таежный, подгольцовый и горно-тундровый. Основные ландшафты - темнохвойные леса, редкостойные темнохвойные леса, криволесье и мелколесье, и фрагментарные тундры с каменистыми россыпями.

Для наблюдений за фенологией растительных сообществ в заповеднике «Денежкин Камень» применяется метод суммированных фенологических характеристик [4, 5, 6]. Фенологический маршрут протяженностью составляет 4,6 км пересекает среднюю часть среднегорной полосы Северного Урала. Он проложен по северному склону г. Шарпинская Сопка – восточного отрога массива Денежкин Камень, от р. Шарп до перевала на восточном плече г. Шарпинская Сопка и характеризуется перепадом высот в 503 м.

На маршруте заложены 7 пробных площадей:

Площадь №15 - Еловый лес пойменный вейниковый нитрофильный, 285.8 м над ур. м., 60.485474 N, 59.642427 E.

Площадь №16 - Пихтово-кедровый лес разнотравный, 321.0 м над ур. м., 60.477814 N, 59.640182 E.

Площадь №17 - Сосновый лес кустарничково-зеленомошный, 409.5 м над ур. м., 60.470326 N, 59.637363 E.

Площадь №18 - Сосновый лес с примесью ели и пихты мелкотравно-кустарничково-зеленомошный, 430.9 м над ур. м., 60.468115 N, 59.636557 E.

Площадь №19 - Еловый лес кустарничково-зеленомошный, 577.7 м над ур. м., 60.455465 N, 59.63178 E.

Площадь №20 - Кедровое редколесье кустарничково-зеленомошное, 599.0 м над ур. м., 60.454257 N, 59.631357 E.

Площадь №21 - Березовое криволесье кустарничково-зеленомошное, 787.7 м над ур. м., 60.4477876 N, 59.6294835 E.

Размер и конфигурация фенологической площади определяется конкретной фацией, в пределах которой она представлена. Регистрация фенологического состояния видов производится во время вегетационного периода, в среднем с третьей декады мая до второй декады сентября, с периодичностью один раз в семь дней.

На территории сообщества в пределах учётной феноплощади определяется фенологическое состояние каждого вида путём оценки его учётных единиц соответственно стандартам отдельно по генеративному и вегетативному процессам развития растений (табл. 1). Полученные показатели переводятся в относительные: процент видов растений, находящихся в определенной фенологической фазе на день обследования. Рассчитывается соотношение этих показателей – суммированная (комплексная) фенологическая характеристика (СФХ) растительности и средний балл ($\bar{K}_{\text{ср}}$) – фенологическая характеристика, учитывающая состояние всех видов растений площадки, выраженная одним числом [6].

Таблица 1.
Фенологические стандарты процессов развития растений (в баллах)

Балл	Генеративный	Вегетативный (развитие ассимиляционного аппарата)
0	Покой	Зимний покой
1	Появление слабо дифференцированных бутонов	Набухание почек
2	Активная бутонизация (окрашенный бутон)	Проклевывание почек
3	Зацветание	Рост листа
4	Активное цветение	Молодой лист
5	Отцветание	Зрелый лист (летняя вегетация)
6	Завязывание плодов и семян	Начало окрашивания (отмирания) - < 50%
7	Поспевание плодов и семян	Интенсивное окрашивание (отмирание) - >50%
8	Обсеменение	Полное отмирание (опадение)
9	Постгенеративная	-

Суммированные фенологические характеристики (СФХ) маркируют фенологическое состояние сообщества в день наблюдений. Обработка по каждому отдельному процессу ведётся независимо. В связи с тем, что основную роль в общем облике природного комплекса играет стадия развития ассимиляционного аппарата, обработка данных по срокам наступления фенологических фаз была проведена только для вегетативного процесса. Всего под наблюдением находятся 128 видов растений, из них: 90 травянистых, 25 кустарников и кустарничков, 1 полукустарничек, 12 древесных.

Для определения даты перехода каждой площадки через рубеж фенологической фазы бралось суммарное число регистраций каждой фазы в отдельный срок наблюдения, и вычислялось их процентное соотношение. В нашем исследовании за основу взято условие перехода растительного сообщества в следующее фенологическое состояние при регистрации этой фазы развития более чем 50% видов растений на площади. Пробные площади со сходными датами перехода в следующее фенологи-

ческое состояние были объединены в группы, в пределах которых суммарно подсчитывались число регистраций наступления каждой фазы и их процентное соотношение. В результате площади №№ 15, 16, 17 и 18 сформировали одну группу, №№ 19, 20 и 21 - другую.

Для анализа процессов развития фитоценоза на пробной площади был рассчитан средний фенологический балл по пентадам за каждый год наблюдений с использованием линейной интерполяции, или скорости фенологического развития [1]. Для построения пространственных растровых моделей распределения фенологических состояний (фенологических карт) для пар площадей 17-18 и 19-20, расположенных довольно близко, был высчитан объединенный средний фенологический балл.

С целью оценки пространственного распределения средних баллов СФХ на феномаршруте в разные годы произведена интерполяция поверхности растра на основании средних значений СФХ на площадях с использованием метода обратно взвешенных расстояний (<https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/2.7/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm>). Для построения растра использован программный продукт ARC PRO 2.9.0. Применялись параметры, установленные для данного метода по умолчанию: значение экспоненты 0.05 количество ближайших входных опорных точек, используемых для выполнения интерполяции 6.

Отдельная часть исследования посвящена выявлению отражения фенологического состояния на картах распределения нормализованного индекса вегетации по данным космических снимков низкого разрешения. Для этого нами были отобраны продукты обработки серии снимков открытого доступа Landsat 8 за июнь и август 2014, 2016, 2018 гг. и Sentinel-2 за июнь, июль и август 2019, 2020, 2021 гг., а именно карты распределения нормализованного индекса вегетации (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index). Не всегда возможно использовать для анализа результаты съемки в дни посещения феномаршрута, поскольку количество снимков с отсутствующей облачностью в районе наблюдений весьма ограничено.

Для настоящей работы мы использовали классический вариант NDVI, рассчитанный автоматически, доступный на информационном ресурсе компании EOS Data Analytics (<https://eos.com/ru/make-an-analysis/ndvi/>) [7].

Результаты и обсуждение

Даты наступления каждой фенологической фазы на пробных площадях различаются в пределах от 7 до 23 дней, однако в половине случаев развитие растительных сообществ совпадает по срокам. Весенне-летняя динамика комплекса растительности площадок в горно-таежном поясе, в среднем, опережает таковую в криволесье (табл. 2).

Таблица 2

Даты переходов низкогорных и среднегорных ценозов в фенофазы «Проклевывание почек», «Рост листа» и «Молодой лист» за период с 2002 по 2021 годы

Год/Наименование фенофазы	Площади 15, 16, 17, 18 – горно-таежный пояс			Площади 19, 20, 21 – подгольцовый пояс, криво-лесье		
	Проклевывание почек	Рост листа	Молодой лист	Проклевывание почек	Рост листа	Молодой лист
2002	10 июня	25 июня	1 июля	17 июня	1 июля	9 июля
2003	-	2 июня	9 июля	27 июля	-	9 июля
2004	13 июня	-	5 июля	13 июня	3 июля	10 июля
2005	27 мая	10 июня	1 июля	3 июня	25 июня	1 июля
2006	13 июня	-	11 июля	13 июня	27 июня	11 июля
2007	11 июня	25 июня	9 июля	25 июня	2 июля	9 июля
2008	24 мая	30 июня	14 июля	16 июня	30 июня	7 июля
2009	9 июня	2 июля	14 июля	14 июня	-	28 июля
2010	25 мая	6 июля	13 июля	25 мая	6 июля	
2011	1 июня	-	19 июля	1 июня	-	19 июля
2012	22 мая	-	26 июня	22 мая	-	3 июля
2013	26 мая	-	2 июля	11 июня	-	16 июля
2014	16 мая	2 июня	23 июня	27 мая	-	1 июля
2015	22 мая	9 июня	23 июня	1 июня	-	30 июня
2016	30 мая	-	28 июня	30 мая	-	5 июля
2017	14 июня	-	12 июля	23 июня	-	18 июля
2018	19 июня	-	17 июля	26 июня	-	17 июля
2019	27 мая	-	2 июля	6 июня	-	9 июля
2020	18 мая	-	25 июня	2 июня	-	30 июня
2021	18 мая	-	15 июня	18 мая	-	6 июня

Продолжительность межфазных периодов в криволесье по сравнению с нижерасположенными площадками сокращается от проклевывания почек до роста листа на 4 суток, от роста листа до молодого листа в 2 раза (на 8 суток). Средние многолетние различия в сроках наступления фенофаз между растительными сообществами горно-таежного и подольцового поясов сокращаются от мая к июлю. Максимальной разницы они достигают по фенофазе «рост листа» – 12 суток, минимальной – 4 суток по развитию молодого листа. В целом, начальные фазы вегетации, представленные в табл. 2., более растянуты по времени в нижних и средне-верхних частях феномаршрута по сравнению с площадками криволесья.

Наиболее раннее фенологическое развитие ценозов наблюдалось в 2014, 2020 и 2021 гг., наиболее позднее – в 2017 и 2018 гг. При этом прослеживается общая тенденция в смещении дат наступления явлений на более ранние сроки (рис. 1). За весь период наблюдений 2002, 2004, 2006 и 2007 годы отличались более короткими периодами развития ассимиляционного аппарата.

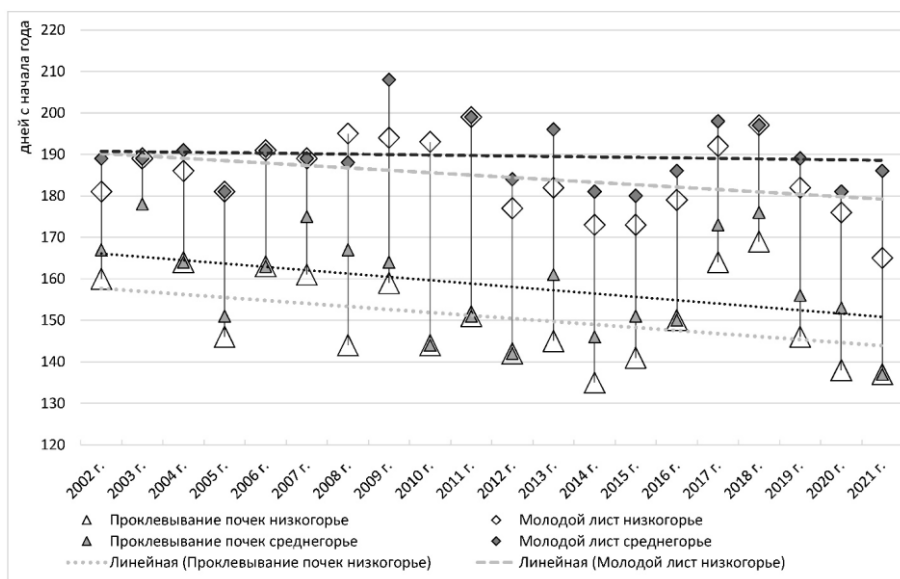


Рис. 1. Погодичная динамика дат переходов низкогорных и среднегорных ценозов в фенофазы “Проклевывание почек” и “Молодой лист” за период с 2002 по 2021 годы.

Согласно данным метеорологических наблюдений, проводимым на территории заповедника «Денежкин Камень» [2], в 2004 году зафиксиро-

рованы самые минимальные значения средней температуры воздуха фенологических сезонов «Начало весны» и «Лето», сезон «Зелёная весна» также характеризовался низкой средней температурой, а сезон «Лето» имел наиболее короткую продолжительность за весь период наблюдений. Низкая средняя температура воздуха в сезон «Зелёная весна», вероятно, обусловила и более позднее развитие фитосообществ в 2018 году.

Характер изменения средних фенологических показателей на площадях, выявленный в результате интерполяции по пентадам, различается как по площадям, так и по годам. В настоящей статье приводим СФХ для декад по всему исследуемому периоду (табл. 3).

Таблица 3

Средний фенологический коэффициент (балл) по декадам за каждый год наблюдений
с использованием линейной интерполяции

Год	№№ пробн. площади	21 мая	31 мая	10 июня	15 июня	20 июня	30 июня	10 июля	20 июля	30 июля	9 августа	19 августа	29 августа
2002	15	2.10	2.64	3.13	3.33	3.60	4.27	4.88	4.97	5.00	5.03	5.42	5.84
	16	1.12	1.67	2.61	2.87	3.32	4.42	4.81	4.96	5.11	5.00	5.14	6.09
	17 и 18	1.05	1.64	2.33	2.61	3.10	4.24	4.67	4.92	4.99	5.03	5.21	5.87
	19 и 20	1.16	1.57	1.80	2.29	2.79	3.90	4.35	4.59	4.77	5.04	5.04	6.10
	21	-	-	-	1.71	2.57	4.07	4.47	4.86	4.81	5.15	5.42	6.04
2003	15	1.65	3.35	3.81	3.88	3.95	4.25	4.84	4.94	5.01	5.17	5.44	5.72
	16	2.06	3.40	3.69	3.71	3.73	3.98	4.69	4.91	5.09	5.12	5.35	5.63
	17 и 18	1.06	2.70	3.27	3.43	3.58	4.02	4.70	4.77	4.87	5.14	5.45	5.77
	19 и 20	0.38	1.67	2.36	2.63	2.90	3.56	4.42	4.61	4.88	5.41	5.71	5.92
	21	-	-	2.36	2.73	3.10	3.82	4.49	4.73	4.95	5.53	6.11	6.64
2004	15	1.40	2.20	2.92	3.22	3.67	4.37	4.82	4.93	5.00	5.00	5.56	6.18
	16	0.90	1.80	2.64	2.91	3.29	4.05	4.75	5.00	5.00	5.13	5.59	6.07
	17 и 18	1.00	1.48	2.42	3.32	3.45	4.00	4.83	4.98	5.05	5.21	5.60	6.00
	19 и 20	0.25	1.07	2.03	2.50	2.83	3.53	4.32	4.76	4.96	5.24	5.62	6.02
	21	1.36	2.00	2.78	3.18	3.57	4.39	4.74	5.00	5.08	5.25	5.59	5.69

2005	15	2.21	2.77	3.51	3.85	4.18	4.77	4.86	4.98	5.07	5.32	5.39	5.53
	16	1.41	2.57	3.39	3.68	3.98	4.50	4.77	5.04	5.16	5.22	5.37	5.98
	17 и 18	1.79	2.72	3.62	3.79	3.95	4.47	4.67	4.99	5.07	5.34	5.46	5.75
	19 и 20	1.26	2.27	3.11	3.38	3.65	4.20	4.49	4.92	5.00	5.31	5.50	5.89
	21	1.36	2.00	2.78	3.18	3.57	4.39	4.74	5.00	5.08	5.25	5.59	5.69
2006	15	-	0.90	2.31	2.71	2.97	4.07	4.26	4.62	4.73	5.03	5.80	6.23
	16	-	0.51	1.94	2.47	2.64	3.55	4.24	4.89	5.04	5.19	5.91	6.37
	17 и 18	-	0.27	2.03	3.00	3.34	3.97	4.34	4.93	5.08	5.11	5.85	6.26
	19 и 20	-	0.16	1.93	2.94	3.27	3.87	4.18	4.96	5.01	5.12	5.83	6.31
	21	-	-	2.16	3.15	3.20	4.16	4.76	5.22	5.11	5.18	5.97	6.77
2007	15	-	-	-	3.18	3.37	4.04	4.83	4.98	5.11	5.38	5.82	6.20
	16	-	-	-	3.15	3.40	4.15	4.94	5.00	5.11	5.29	5.52	5.82
	17 и 18	-	-	-	3.04	3.36	3.96	4.75	4.98	5.20	5.48	5.70	6.03
	19 и 20	-	-	-	1.80	2.30	3.58	4.54	4.93	5.10	5.33	5.69	5.99
	21	-	-	-	-	1.97	3.59	4.63	4.95	5.14	5.43	5.88	6.21
2008	15	-	2.30	2.56	2.79	3.06	3.70	4.39	4.76	5.09	5.25	5.50	5.89
	16	-	2.21	2.37	2.62	2.91	3.68	4.44	4.72	5.07	5.32	5.61	5.87
	17 и 18	-	2.17	2.32	2.57	2.89	3.63	4.53	4.78	5.11	5.23	5.49	5.82
	19 и 20	-	1.47	1.81	2.28	2.69	3.59	4.52	4.68	5.02	5.19	5.50	5.83
	21	-	1.94	2.07	2.44	2.82	3.67	4.50	4.82	5.11	5.38	5.72	6.19
2009	15	-	1.66	2.75	3.03	3.18	3.67	4.30	4.70	4.98	5.37	5.67	5.96
	16	-	1.60	2.71	2.99	3.25	3.70	4.23	4.63	5.03	5.35	5.70	5.91

	17 и 18	-	1.42	2.59	2.95	3.19	3.50	4.01	4.46	4.96	5.32	5.60	5.91
	19 и 20	-	1.04	2.37	2.79	3.12	3.35	3.74	4.28	4.82	5.10	5.63	5.89
	21	-	1.28	2.23	2.81	3.04	3.39	3.80	4.33	4.91	5.35	5.80	6.14
2010	15	2.30	2.89	3.09	3.19	3.29	3.79	4.40	4.73	4.96	5.28	5.75	6.32
	16	2.30	2.93	3.11	3.19	3.30	3.71	4.28	4.64	4.91	5.23	5.66	6.20
	17 и 18	2.12	2.93	3.08	3.15	3.25	3.63	4.16	4.48	4.74	5.12	5.67	6.13
	19 и 20	1.89	2.64	3.00	3.13	3.23	3.52	4.05	4.43	4.78	5.19	5.69	6.17
	21	2.11	2.76	3.00	3.06	3.15	3.54	4.17	4.66	5.05	5.54	6.16	6.59
	15	-	2.76	3.11	3.22	3.31	3.69	4.27	4.78	5.01	5.33	5.74	6.24
	16	-	2.58	2.98	3.14	3.25	3.67	4.26	4.73	4.99	5.43	5.76	6.17
2011	17 и 18	-	2.45	2.96	3.15	3.20	3.58	4.08	4.60	4.90	5.24	5.64	5.97
	19 и 20	-	2.18	2.79	2.95	3.12	3.55	3.99	4.52	4.86	5.38	5.70	6.08
	21	-	2.25	2.75	2.87	2.98	3.43	4.08	4.65	5.05	5.42	5.68	6.26
	15	-	2.98	3.39	3.61	3.84	4.46	4.84	5.11	5.42	5.89	6.17	6.44
	16	-	2.90	3.39	3.62	3.85	4.45	4.81	5.12	5.39	5.72	6.03	6.35
2012	17 и 18	-	2.87	3.37	3.62	3.79	4.43	4.74	5.02	5.29	5.70	6.00	6.28
	19 и 20	-	2.66	3.27	3.49	3.67	4.25	4.71	5.04	5.33	5.60	6.00	6.27
	21	-	2.81	3.26	3.56	3.83	4.57	4.87	5.13	5.44	5.81	6.20	6.60
	15	-	2.49	2.93	3.21	3.51	4.24	4.75	4.89	5.11	5.59	6.11	6.28
	16	-	2.47	2.90	3.17	3.46	4.18	4.69	4.86	5.13	5.52	5.99	6.23
2013	17 и 18	-	2.33	2.86	3.14	3.47	4.18	4.65	4.81	5.10	5.46	5.84	6.21
	19 и 20	-	2.28	2.55	2.94	3.26	3.93	4.53	4.78	5.07	5.44	5.82	6.13
	21	-	1.75	2.68	2.96	3.22	3.99	4.66	4.90	5.09	5.44	6.02	6.30

2014	15	2.58	3.53	3.95	4.09	4.31	4.76	4.91	4.97	5.29	5.58	5.88	6.23
	16	2.39	3.37	3.73	3.98	4.25	4.75	4.84	4.91	5.21	5.51	5.76	6.08
	17 и 18	2.29	3.40	3.76	4.02	4.31	4.68	4.79	4.85	5.23	5.49	5.77	6.01
	19 и 20	1.68	2.93	3.49	3.61	3.89	4.49	4.73	4.83	5.07	5.34	5.61	5.89
	21	2.04	2.61	3.20	3.31	3.73	4.60	4.82	4.89	5.13	5.33	5.66	6.12
2015	15	2.41	2.99	4.04	4.35	4.64	4.94	5.02	5.33	5.60	5.85	5.74	6.38
	16	2.41	2.94	3.97	4.28	4.59	4.90	4.97	5.20	5.46	5.77	5.64	6.18
	17 и 18	-	2.86	3.79	4.20	4.51	4.82	4.95	5.22	5.48	5.81	5.87	6.25
	19 и 20	-	2.49	3.48	3.84	4.25	4.74	4.91	5.04	5.28	5.61	5.72	6.21
	21	-	-	3.23	3.52	3.97	4.75	4.94	5.05	5.27	5.63	5.71	6.14
2016	15	-	2.89	3.34	3.57	4.08	4.72	4.89	4.97	5.13	5.22	5.83	6.23
	16	-	2.90	3.39	3.69	4.06	4.63	4.85	5.00	5.13	5.17	5.60	6.03
	17 и 18	-	2.83	3.23	3.49	3.81	4.50	4.80	5.00	5.11	5.22	5.51	5.81
	19 и 20	-	2.26	2.91	3.20	3.60	4.33	4.71	4.98	5.09	5.19	5.45	5.90
	21	-	2.26	2.83	3.10	3.47	4.18	4.70	5.00	5.16	5.35	5.70	6.14
2017	15	-	-	-	2.86	3.17	3.83	4.39	4.83	4.99	5.31	5.55	5.97
	16	-	-	-	2.80	3.09	3.79	4.43	4.81	4.98	5.20	5.57	5.91
	17 и 18	-	-	-	2.62	2.93	3.63	4.34	4.72	4.94	5.25	5.54	5.84
	19 и 20	-	-	-	2.17	2.54	3.38	4.18	4.68	4.86	5.07	5.36	5.84
	21	-	-	-	2.01	2.42	3.11	4.03	4.67	4.90	5.09	5.48	6.00
2018	15	-	1.40	2.41	2.74	3.01	3.78	4.49	4.90	5.01	5.19	5.46	5.78
	16	-	1.05	2.06	2.47	2.85	3.75	4.46	4.88	4.99	5.15	5.50	5.76

2018	17 и 18	-	-	-	1.99	2.62	3.47	4.33	4.81	5.01	5.18	5.49	5.71
	19 и 20	-	-	-	1.25	1.95	3.18	4.15	4.68	4.99	5.09	5.45	5.77
	21	-	-	-	1.32	1.74	3.04	4.00	4.70	4.99	5.13	5.57	5.96
2019	15	-	2.82	3.25	3.58	3.92	4.45	4.84	5.03	5.23	5.56	5.90	6.25
	16	-	2.76	3.03	3.37	3.79	4.46	4.84	4.96	5.14	5.56	5.79	6.20
	17 и 18	-	2.53	3.04	3.39	3.76	4.33	4.74	4.92	5.07	5.51	5.75	6.12
	19 и 20	-	1.98	2.69	3.07	3.53	4.24	4.63	4.79	5.00	5.43	5.73	6.06
	21	-	1.75	2.56	2.94	3.34	4.14	4.67	4.89	5.05	5.37	5.81	6.19
2020	15	2.66	2.99	3.65	3.87	4.15	4.73	4.91	5.09	5.38	5.66	6.03	6.46
	16	2.47	2.86	3.49	3.75	4.07	4.65	4.87	5.07	5.36	5.64	6.02	6.41
	17 и 18	1.99	2.71	3.40	3.70	4.00	4.56	4.81	5.03	5.24	5.46	5.78	6.20
	19 и 20	-	2.12	3.12	3.43	3.72	4.38	4.73	4.97	5.21	5.44	5.71	6.06
	21	-	1.69	2.90	3.26	3.56	4.31	4.69	4.96	5.20	5.44	5.82	6.24
2021	15	2.92	3.31	4.15	4.57	4.65	4.82	5.01	5.24	5.62	5.93	6.17	6.53
	16	2.89	3.30	4.13	4.58	4.66	4.81	4.98	5.17	5.52	5.81	6.12	6.51
	17 и 18	2.81	3.27	4.04	4.47	4.57	4.77	4.96	5.15	5.46	5.74	6.06	6.31
	19 и 20	2.63	3.25	3.92	4.41	4.52	4.74	4.94	5.13	5.42	5.69	6.04	6.34
	21	2.80	3.21	3.65	3.92	4.04	4.27	4.44	4.52	4.67	4.83	5.00	5.26

В начале вегетационного периода прослеживается определенная закономерность: на самой нижней в высотном отношении площади, расположенной в пойме р. Шарп, отмечено более раннее развитие растений, на самой верхней, в криволесье – самое позднее. Такая высокая вариабельность сроков развития сохраняется примерно до середины июля (рис. 2). К концу вегетационного периода фенологические ритмы на всех пробных площадях выравниваются, а площадка в криволесье несколько опережает в развитии завершающих фенофаз участки, расположенные ниже по склону.

В 2018 году отмечены самые поздние сроки начала вегетации во всех ценозах на феномаршруте, в 2021 – самые ранние. Хотелось бы отметить тот факт, что на верхней площади, в криволесье, в 2021 году была наиболее высокая, за весь срок наблюдений, скорость развития ассимиляционного аппарата, которая сопровождалась рекордным по срокам увяданием. Вероятнее всего, сказался большой дефицит влаги в течение лета 2021 года. В связи с этим, 2021 год характеризовался наиболее вариабельными средними фенологическими баллами, особенно во второй половине лета за счет раннего увядания растений на верхних площадях, равно как и 2003 год. Наиболее выровненным, эталонным, по средним фенологическим баллам можно считать 2012 год.

Очень наглядно разница в фенологическом развитии ценозов в 2018 и 2021 гг., особенно в сравнении со среднегодовыми показателями, видна на растровых картах распределения средних баллов СФХ (рис. 3). Растровые карты распределения СФХ построены для одинаковых дат – 15 июня, 15 июля и 24 августа.

Для выявления закономерности отображения фенологического состояния ценоза необходимо иметь набор статистически значимого количества космоснимков. Территория заповедника расположена вдоль главного Уральского хребта, к сожалению, качественные снимки для района феномаршрута в течение вегетационного периода имеются лишь в двух-трех случаях из десятков снимков платформы Landsat 8 и в трех-пяти из сотен снимков Sentinel 2. Ниже приведены все безоблачные снимки за один вегетационный сезон 2021 года для рассматриваемого района (рис. 4). Еще одним обстоятельством, снижающим чувствительность NDVI, является преобладание хвойных деревьев в верхнем ярусе леса.

На снимках в обработке NDVI очевидна разница в отображениях ценозов в разные периоды развития листьев: начало лета, середина лета и начало увядания значимо различаются.

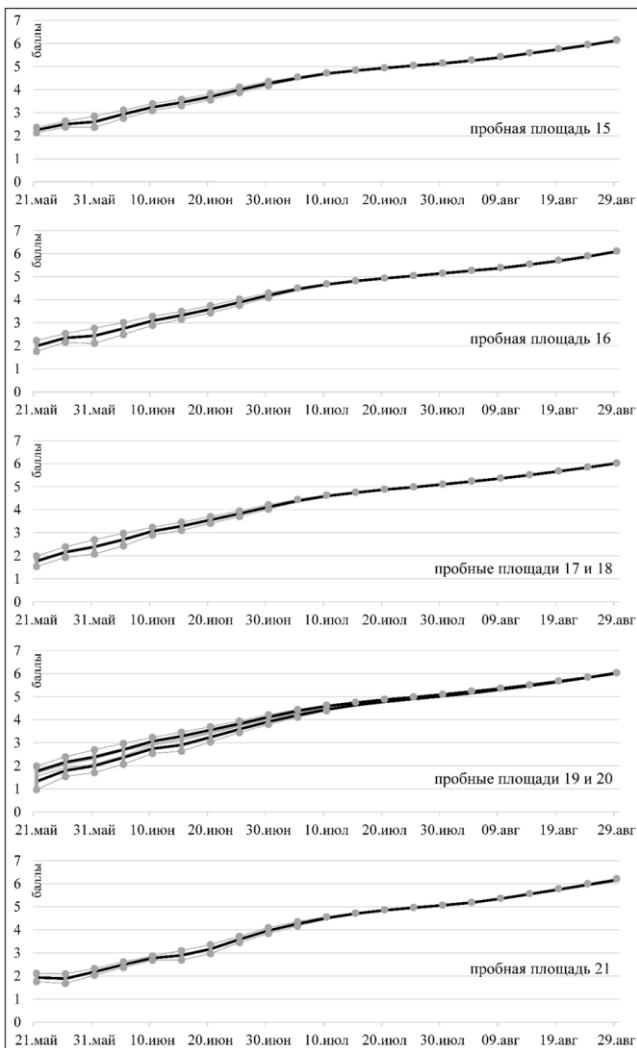


Рис. 2. Изменение усредненных фенологических показателей фенологических площадей и величина дисперсии за период с 2002 по 2021 год

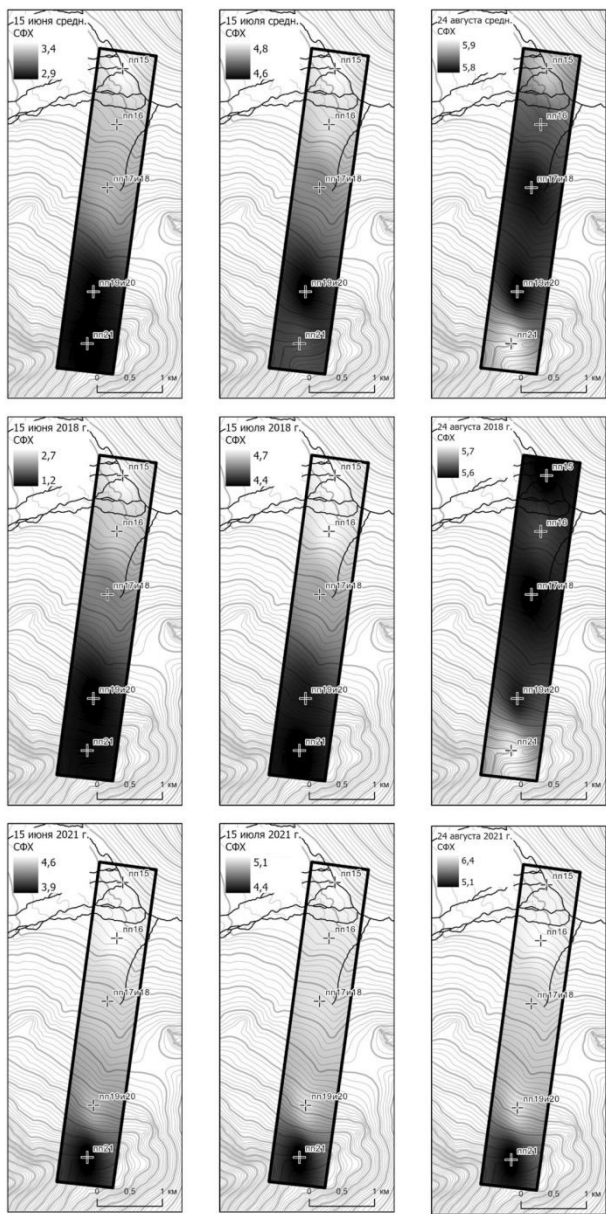


Рис. 3. Растровые карты распределения среднегодовых фенологических показателей для дат 15 июня, 15 июля и 24 августа, и карты фенологических показателей 2018 и 2021 годов.

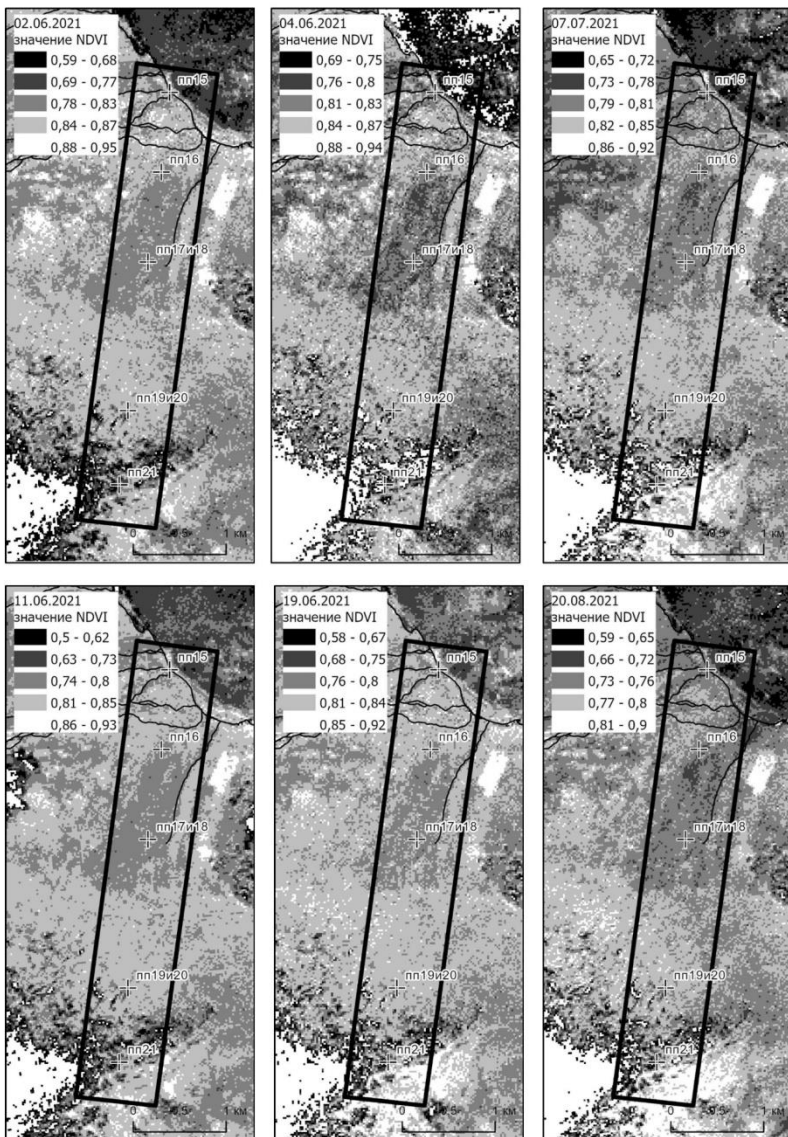


Рис. 4. Карты значений вегетационного индекса NDVI по материалам обработки спутниковых снимков Sentinel 2 для района фенологического маршрута в вегетационный период 2021 года.

Заключение

Многолетние данные по фенологии растительных сообществ, собранные в заповеднике «Денежкин Камень», позволили выявить закономерности развития растительных сообществ в разных высотных поясах, различия в характеристиках развития сообществ по годам, а также общие тенденции их вегетативного развития в течение 20-летнего периода.

Возможно, более полные серии качественных космоснимков для исследуемой территории во время вегетационного периода позволят выявить корреляцию вегетационного индекса и фенологической стадии развития фитокомпонента природных комплексов.

Список литературы

1. Батманов В.А. 1967. Заметки по теории фенологического наблюдения // Ритмы природы Сибири и Дальнего Востока. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, С. 7-30.

2. Возьмитель К.А., Квашнина А.Е. 2021. Некоторые закономерности наступления и течения фенологических сезонов по результатам обработки многолетних данных по погоде и фенологии в заповеднике «Денежкин камень» // Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 22–24 апреля 2021 года. Екатеринбург: [б.и.]. С. 289-298. <https://doi.org/10.26170/KFG-2021-42>

3. Гурьевских О.Ю., Капустин В.Г., Скок Н.В., Янцер О.В. Физико-географическое районирование и ландшафты Свердловской области: коллективная монография / Екатеринбург, УрГПУ, 2016. – 280 с.

4. Терентьева Е.Ю. 2000. Сезонный мониторинг растительности через суммированные фенологические характеристики фитоценозов // Актуальные проблемы регионального, географического, экологического и биологического образования: материалы региональной научно-практической конференции. Екатеринбург: УрГПУ. С. 16-17.

5. Терентьева Е.Ю. 2001. Комплексные фенологические показатели фитоценозов и их использование при организации феномониторинга.: автореф. дис. канд. биол. наук (03.00.05) / Терентьева Елена Юрьевна; УрГПУ. Екатеринбург. С. 3-16.

6. Янцер О.В. 2005. Сезонная динамика ландшафтных геокомплексов среднегорий Северного Урала (на примере заповедника «Денежкин Камень»). Дисс. на соиск.уч степ. канд.геогр.наук, Пермь. – 269 с.

7. ЭОС система. Индекс NDVI. Режим доступа: <https://eos.com/ru/make-an-analysis/ndvi/> (Дата обращения: 01.06.2022)