

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-70-94>

УДК 551.513.7+551.582: 581.526.42(477.75)

Влияние крупномасштабных климатических сигналов на растительный покров на территории Крымского полуострова

***В.С. Красовская, Е.Н. Воскресенская,
В.Н. Маслова, А.С. Лубков***

*Институт природно-технических систем, г. Севастополь, Россия
veronika_maslova@mail.ru*

Исследуется реакция растительности Крыма (лиственные, сосновые, можжевельные породы, степная яйла) на изменения дальнодействующих климатических индексов, на примере вегетационного нормализованного разностного индекса NDVI по данным дистанционного зондирования за период 2000–2023 гг. Рассмотрена взаимосвязь NDVI и девяти климатических индексов в Северном полушарии с использованием коэффициента корреляции Пирсона, мультирегрессионного моделирования и композитного анализа. Обнаружено, что Североатлантическое, Восточно-Атлантическое, Арктическое и Полярное/Евразийское колебания с декабря по май объясняют 80 % изменения вегетационного индекса лесных сообществ в апреле–июне. При этом сигналы Восточно-Атлантического и Средиземноморского колебаний с января по май объясняют 59 % изменения индекса NDVI степных сообществ в апреле–июне. Вегетационный индекс всех растительных сообществ возрастает при тех фазах климатических индексов, которые сопровождаются, как правило, усилением циклонической активности. При этом NDVI лесных сообществ увеличивается при ослаблении циклонической активности в зимние месяцы, что может быть связано с более морозными условиями для сохранения твердых осадков в горах.

Ключевые слова: ненарушенные растительные сообщества, Черноморский регион, барические моды, предикторы биомассы, лиственные породы, сосновые породы, можжевельные породы, степная яйла

The impact of large-scale climate oscillations on the vegetation cover on the Crimean Peninsula

***V.S. Krasovskaya, E.N. Voskresenskaya,
V.N. Maslova, A.S. Lubkov***

*Institute of Natural and Technical Systems,
Sevastopol, Russia
veronika_maslova@mail.ru*

The paper examines the response of Crimean vegetation (deciduous, pine, juniper species, mountain steppe yayla) to the changes in teleconnection indices using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) based on remote sensing data for the period of 2000–2023. The interrelation of the NDVI and nine Northern Hemisphere teleconnection patterns is analyzed using the Pearson's correlation coefficient, multiregression modeling, and composite analysis. It was found that 80% of variability of the vegetation index of forest species

in April–June is associated with the joint impact of the North Atlantic Oscillation, East Atlantic pattern (EA), Arctic Oscillation, and Polar/Eurasia pattern from December to May. At the same time, 59 % of variability of in the NDVI index for steppe species in April–June is explained by the EA and Mediterranean Oscillation indices from January to May. The vegetation index of all plant communities increases during the phases of teleconnection patterns that are accompanied, as a rule, by increased cyclone activity. At the same time, the NDVI of forest communities increases with a decrease in cyclone activity in the winter months, which may be due to more frosty conditions for maintaining solid precipitation in the mountains.

Keywords: undisturbed plant communities, Black Sea region, teleconnection indices, biomass predictors, deciduous species, pine species, juniper species, mountain steppe yayla

Введение

Растительный покров играет важную роль в глобальном углеродном цикле, выполняя функцию поглощения углекислого газа и влияя на климатические процессы [12, 27]. Изменения в экосистемах могут быть обусловлены различными факторами, включая изменения климата. Климатические условия, как на глобальном, так и на локальном уровне, оказывают значительное воздействие на динамику растительности через атмосферные процессы, а в средних широтах преимущественно посредством циклонической активности. Одними из ключевых факторов, определяющих эти изменения, являются глобальные климатические процессы, или процессы в системе океан – атмосфера. Учитывая очевидную связь между состоянием растительного покрова и атмосферными процессами [17], можно считать, что, помимо ботанических и местных факторов окружающей среды, на развитие растительности по всей планете оказывают влияние крупномасштабные дальнедействующие процессы через взаимодействие центров действия атмосферы (ЦДА) и изменение направления и интенсивности шторм-треков.

Много научных исследований было посвящено этой проблематике в приложении к различным регионам мира [18]. В частности, в [20] обнаружено, что теплые явления Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК) или положительные фазы Североатлантического колебания (САК) способствовали росту растительности в степных экосистемах Евразии в результате повышения температуры и увеличения количества осадков. Холодные события ЭНЮК или отрицательные фазы САК, сопровождающиеся похолоданием и неравномерным уменьшением количества осадков, пагубно влияли на состояние лугов Евразийской степи.

Однако, несмотря на важную роль этих процессов, влияние крупномасштабных атмосферных колебаний на растительность Крымского полуострова остается практически неизученным. Особую актуальность таким исследованиям придают уникальные климатические и географические условия региона, который расположен на пересечении средиземноморских и степных экосистем.

Целью данного исследования является изучение реакции растительности Крымского полуострова на изменения дальнедействующих климатических сигналов, проявляющихся посредством циклонической активности, на примере вегетационного нормализованного разностного индекса NDVI по данным дистанционного зондирования. Понимание этих взаимосвязей имеет значение для прогнозирования долгосрочных тенденций изменения климата и его воздействия на экосистемы Крымского полуострова, что может способствовать разработке эффективных стратегий управления окружающей средой и адаптации к климатическим изменениям.

1. Материалы и методика исследования

1.1. Индекс NDVI

Индекс NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) – это нормализованный разностный показатель количества фотосинтетически активной биомассы. Он представляет собой числовой показатель качества и количества растительности и зависит от того, как растения отражают и поглощают световые волны разной длины. Зеленые растения содержат пигмент хлорофилл, который хорошо отражает зелёные волны и поглощает красные волны, а клеточная структура растения отражает ближние инфракрасные волны. Таким образом, здоровое растение, в котором много хлорофилла и хорошая клеточная структура, активно поглощает красный свет и отражает ближний инфракрасный, а увядающее или больное растение – наоборот [6]. Отношение разницы инфракрасного и красного света к их сумме позволяет нормализовать индекс от -1 до 1. Таким образом, NDVI вычисляется по следующей формуле:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}, \quad (1)$$

где NIR и RED – спектральные измерения отражательной способности растений в красной (видимой) и ближней инфракрасной областях спектра соответственно.

Ряд исследований показал, что нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) является эффективным показателем фотосинтетически активной биомассы [22]. Также было показано, что NDVI хорошо коррелирует с физическими климатическими переменными, включая количество осадков, температуру [5, 26]. Таким образом, можно считать, что NDVI отражает реакцию растительности на климатические воздействия.

Для целей настоящего исследования требовался ряд наблюдений, отвечающих условиям непрерывности, однородности и малой дискретности по времени. Для выявления межгодовых изменений в структуре изучаемого растительного покрова необходимы данные наблюдений за длительный отрезок времени, включающий 2–3 периода межгодовой изменчивости.

С учетом перечисленных условий был сделан выбор в пользу снимков, полученных со спутника «TERRA» (радиометр «MODIS») с 250-метровым пространственным и 16-дневным временным разрешением на базе продукта MODIS/Terra (MOD13Q1) (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) [16]. Выбор данных MODIS обусловлен также наличием качественной системы предоставления обработанных снимков в виде растров с указанием уровня достоверности полученных значений, что позволило выбрать лишь надежные данные.

Для изучения временной изменчивости вегетационного индекса NDVI за вегетационный период (апрель–октябрь) с 2000 по 2023 год включительно всего было получено 312 спутниковых снимков на геопортале NASA (Национальное агентство по аэронавтике и исследованию космического пространства, англ. NASA – National Aeronautics and Space Administration) [24]. В качестве индикатора состояния растительных геосистем Крыма в настоящей работе для получения средних оценок вегетационного индекса был выбран трёхмесячный промежуток апрель–июнь по критерию наличия пика NDVI в мае (с 9 по 24 мая).

На этапе предварительной обработки данных дистанционного зондирования была составлена модель, в которой каждый растр, содержащий значения вегетационного индекса, был подвергнут фильтрации на основе слоя качества. Для разделения пикселей NDVI была использована европейская классификация ландшафтных комплексов CORINE Land Cover (CLC) [13] и визуальное дешифрирование. Полученные ряды были отфильтрованы по данным спутниковой классификации, включающей в себя леса и степные участки. Таким образом, была получена сеть из 9 тыс. тестовых точечных данных по Крыму с шагом 1×1 км, включающая все насаждения площадью 6,25 га (рис. 1).

На следующем этапе проводилась агрегация данных в соответствии с выбранным периодом наблюдений. Для приведения 16-дневных наблюдений NDVI к данным с месячной дискретностью применялся метод взвешенных коэффициентов.

1.2. Индексы атмосферной циркуляции

Атмосферная циркуляция характеризуется наличием достаточно устойчивых областей с максимальной амплитудой низкочастотной (межгодовой – междесятилетней) изменчивости. Обычно эта изменчивость проявляется в наблюдающихся в течение определенного устойчивого периода аномалиях температурных полей и осадков, сопровождающихся смещениями основных центров действия атмосферы и интенсивности струйных течений. Такие аномалии существенно влияют на частоту, интенсивность и траектории циклонов. Типичные проявления низкочастотной изменчивости атмосферной циркуляции называют «дальнодействующими» низкочастотными колебаниями или крупномасштабными сигналами системы океан – атмосфера.

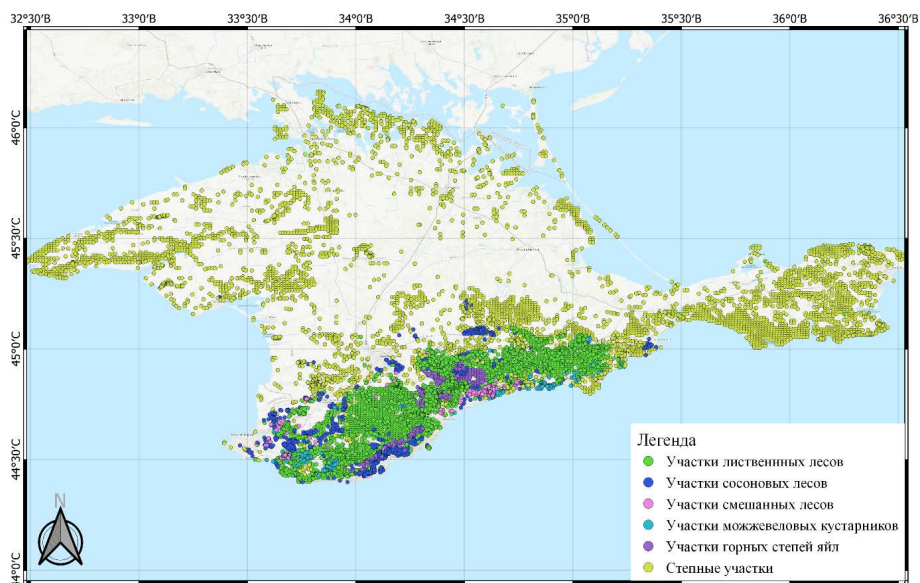


Рис. 1. Карта Крыма с нанесенным точечным слоем по типам растительности.

Fig. 1. Map of Crimea with the indication of the type of vegetation species.

Главные центры дальнего действия, влияющие на аномалии природной среды и климат Евразии, концентрируются над Североатлантическим – Европейским сектором, экваториальной и северной частями Тихого океана и Северной Америкой. В качестве меры изменчивости перечисленных сигналов системы океан – атмосфера обычно используют характеристики их интенсивности, чаще всего выражаемые как перепад давления между центрами действия атмосферы или как пространственные эмпирические моды в разложении поля давления. Временные масштабы основных мод составляют от нескольких лет до нескольких десятилетий [25].

В настоящей работе были использованы индексы следующих мод Северного полушария за период с 2000 по 2023 год:

- Североатлантическое колебание (САК) [32];
- Восточно-Атлантическое колебание (ВАК) [32];
- Колебание Восточная Атлантика/Западная Россия (ВА/ЗР) [32];
- Скандинавское колебание (СКАНД) [32];
- Полярное/Евразийское колебание (ПОЛ/ЕВР) [32];
- Колебание Тропики/Северное полушарие (ТСП) [32];
- Арктическое колебание (АК) [32];
- Средиземноморское колебание (СК) [21];
- Западно-Средиземноморское колебание (ЗСК) [23].

Расположение центров колебаний для используемых индексов приведено на рис. 2.

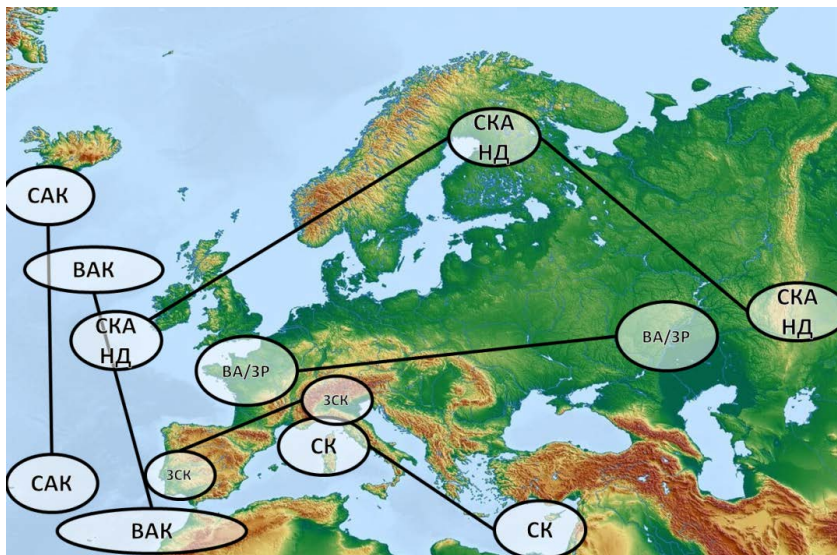


Рис. 2. Расположение центров действия индексов САК, ВАК, ВА/ЗР, СКАНД, СК и ЗСК.

Fig. 2. The location of the centers of action of the NAO, EA, EAWR, SCAND, MO and WMO indexes.

1.3. Циклоническая активность

Временные ряды частоты циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе были получены по четырехсрочным данным реанализа NCEP/NCAR за период 1951–2017 гг. с помощью методики объективной идентификации и трекинга М.Ю. Бардина [2]. Закономерности связи климатических сигналов с циклонической активностью обобщены в монографии [3]. В работах [3, 8] исследованы особенности многолетней изменчивости временных рядов урожайности агрокультур Северного Причерноморья в связи с циклонической деятельностью и глобальными климатическими процессами межгодового-междесятилетнего масштаба.

1.4. Методика исследования закономерностей

Возможная связь NDVI с климатическими индексами определялась с помощью корреляционного анализа, множественной линейной регрессии и композитного анализа. Между NDVI и климатическими индексами рассчитывались коэффициенты корреляции Пирсона, для оценки значимости использовался t -критерий Стьюдента (t -статистика).

Коэффициент детерминации (R^2), определяемый по коэффициенту корреляции (r^2), использовался для оценки доли дисперсии индекса NDVI, объясняемой корреляционной связью с индексами климатических сигналов.

Выявление совместного вклада климатических индексов в изменчивость вегетационного индекса осуществлялось по формуле на основе метода множественной линейной регрессии (МЛР):

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n, \quad (2)$$

где X_n – независимые переменные; Y – зависимая переменная; b_n – коэффициент наклона для X_n ; b_0 – точка пересечения с осью y .

Смысл МЛР заключается в подборе оптимальных коэффициентов b , для которых используется минимизация с помощью суммы квадратов разностей между модельным расчетом и фактическим значением. Для МЛР применялся набор независимых переменных, отобранных на основе результатов анализа корреляции и значимости коэффициентов. Модель оптимизировалась с применением пошагового алгоритма, предложенного в [33], в результате чего выделялись те факторы, на основе которых модель наиболее успешна.

Для проверки множественной линейной регрессии можно использовать несколько подходов, которые позволяют оценить качество, надежность и статистическую значимость построенной модели. В настоящей работе были использованы метод статистики Фишера (F -статистика с p -значением – вероятностью того, что случайная величина с данным распределением Фишера превысит данное значение статистики), тест на мультиколлинеарность (фактор роста дисперсии VIF – Variance Inflation Factor) и тест Шапиро-Уилка (W с p -значением). Значение W – это статистическая оценка, которая указывает, насколько данные отклоняются от нормального распределения. Значение W варьируется от 0 до 1. Близкие к 1 значения W указывают на то, что данные близки к нормальному распределению. Уровень значимости, или p -значение, представляет собой вероятность того, что наблюдаемое отклонение от нормального распределения (или любое другое отклонение) произошло бы случайно, если бы данные действительно были нормально распределены. Высокое p -значение в тесте Шапиро – Уилка ($>0,05$) указывает на то, что нет достаточных оснований для отвержения нулевой гипотезы о нормальности распределения данных. Низкое p -значение ($\leq 0,05$) указывает на то, что данные значительно отклоняются от нормального распределения и нулевая гипотеза может быть отвергнута. Таким образом, тест Шапиро – Уилка позволяет оценить, насколько данные соответствуют нормальному распределению, что является важным аспектом для многих статистических методов и моделей.

На основе полученных моделей были рассчитаны значения зависимой переменной NDVI. Отклонения NDVI для каждого значения нормировались на стандартное отклонение за период 2000–2023 гг. согласно формуле:

$$I = \frac{NDVI - \overline{NDVI}}{CKO}, \quad (3)$$

где I – центрированный и нормированный индекс NDVI, $\overline{\text{NDVI}}$ – среднее NDVI, СКО – среднеквадратическое отклонение.

Обратная нормировка и смещение являются важными шагами в процессе прогнозирования, когда используются центрированные и нормированные данные. При центрировании и нормировании зависимой переменной преобразуются ее значения в новый масштаб, где среднее значение равно нулю, а стандартное отклонение равно единице. Это часто применяется для улучшения стабильности и точности моделей, а также для интерпретации коэффициентов модели.

Однако после того, как модель сделала прогнозы на основе центрированных и нормированных данных, эти прогнозы преобразуются в исходный масштаб. Для этого используется обратное преобразование модельных расчетов в NDVI по формуле:

$$\text{NDVI}(i) = I' \times \text{СКО} + \overline{\text{NDVI}}, \quad (4)$$

где I' – рассчитанный индекс NDVI; $\overline{\text{NDVI}}$ – среднее; СКО – среднеквадратическое отклонение.

Для оценки степени влияния положительной и отрицательной фаз климатических индексов, характеризующих интенсивность крупномасштабных процессов системы океан – атмосфера, на реакцию NDVI использовался композитный анализ. К положительной и отрицательной фазе атмосферных индексов относилось по 25 % выборки за 2000–2023 гг. с каждого «хвоста» распределения, для которых рассчитывались средние значения индекса NDVI.

Описанная методика исследования была применена для выявления отклика растительности Крымского полуострова на климатические факторы с целью выявления закономерностей в динамике растительного покрова, обусловленных изменением климатических условий.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Корреляционные связи и моделирование изменчивости NDVI

В табл. 1 представлены коэффициенты корреляции среднегодовых глобальных климатических индексов с 2000 по 2023 год со средним значением NDVI растительных сообществ за апрель–июнь.

Для Крымского полуострова обнаружены значимые корреляции только для колебания межгодового масштаба ПОЛ/ЕВР с индексами состояния лесов. Коэффициенты корреляции между NDVI различных типов леса с индексом ПОЛ/ЕВР составляют -0,54 и -0,58.

В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции глобальных климатических индексов по месяцам с декабря по июнь с 2000 по 2023 год со средним значением NDVI лесных сообществ за апрель–июнь. Такое рассмотрение помогает выявить возможные запаздывания влияния климатических факторов на NDVI.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции среднегодовых индексов глобальных климатических сигналов со средним значением NDVI за апрель–июнь с 2000 по 2023 год. Значимые на 90 % уровне величины выделены жирным шрифтом со звездочкой

Table 1. Correlation coefficients between the average annual indices of global climate signals and the average (April–June) NDVI value from 2000 to 2023. Values significant at the 90 % level are highlighted in bold with an asterisk

Климатический индекс	Лиственные леса	Сосновые и можжевельн. леса	Степь	Степь яйл	Все леса
ВАК	0,07	0,13	-0,13	-0,04	0,07
САК	0,16	0,15	-0,17	0,07	0,16
СКАНД	0,01	-0,02	-0,08	-0,1	0,03
ПОЛ/ЕВР	-0,58*	-0,54*	-0,19	-0,16	-0,57*
АК	0,02	-0,1	-0,24	-0,03	-0,09
ВА/ЗР	-0,32	-0,15	-0,16	-0,21	-0,25
ТСП	0,25	0,2	-0,19	-0,05	0,21
СК	-0,04	-0,06	-0,28	-0,1	-0,08
ЗСК	-0,1	-0,01	-0,13	0,08	-0,09

Таблица 2. Коэффициенты корреляции глобальных климатических сигналов за декабрь–июнь по месяцам со средним значением NDVI всех лесных сообществ за апрель–июнь с 2000 по 2023 год. Значимые величины выделены жирным шрифтом: на 90 % уровне – *, на 95 % уровне – **. Подчеркнуты те значения коэффициентов корреляции, которые усваивались моделью

Table 2. Correlation coefficients between monthly (December–June) global climate signals and the average (April–June) NDVI value of all forest communities from 2000 to 2023. Significant values are shown in bold: at the 90 % level – *, at the 95 % level – **. The values of the correlation coefficients that were assimilated by the model are underlined

Сигнал	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
ВАК	<u>0,39*</u>	-0,20	0,06	0,21	0,24	<u>-0,35*</u>	0,05
САК	<u>0,41*</u>	0,15	<u>0,32</u>	-0,11	-0,05	-0,17	0,05
СКАНД	-0,28	0,18	-0,08	-0,15	0,05	<u>0,32</u>	-0,11
ПОЛ/ЕВР	-0,15	<u>-0,44**</u>	<u>-0,52**</u>	-0,12	<u>-0,44**</u>	0,18	-0,08
АК	<u>0,34*</u>	-0,18	-0,02	-0,16	<u>-0,49</u>	-0,24	0,18
ВА/ЗР	0,04	-0,16	<u>-0,29</u>	0,04	-0,23	0,03	-0,20
ТСП	<u>0,39*</u>	-0,07	-0,03				
СК	-0,21	0,28	<u>-0,34*</u>	0,14	0,21	0,03	0,07
ЗСК	0,24	0,28	<u>-0,54**</u>	-0,22	-0,27	-0,28	-0,19

Изменчивость NDVI наиболее отчетливо реагирует на такие крупномасштабные климатические явления, как Североатлантическое колебание, Восточно-Атлантическое колебание и Полярное/Евразийское колебание. Проявления сигналов будут рассмотрены ниже отдельно.

В результате проведенного анализа данных с использованием множественной линейной регрессии была построена модель, которая включала в себя 14 сигналов, полученных на основе корреляционного анализа. В табл. 2 подчеркнуты те значения коэффициентов корреляции, которые участвовали в модели. В итоге моделью были отобраны восемь наиболее значимых характеристик с декабря по май (R^2 в табл. 3), вклад которых объясняет 80,52 % дисперсии зависимой переменной.

Отдельно в модели с целью получения прогностической оценки были использованы атмосферные индексы за декабрь–март включительно, из которых отобраны три основных индекса за декабрь–февраль (прR2 в табл. 3). Таким образом, была построена прогностическая модель, которая объясняет 55 % дисперсии NDVI лесных сообществ.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции и детерминации для глобальных климатических индексов, отобранных для моделирования NDVI всех лесных сообществ за апрель–июнь

Table 3. Coefficients of correlation and determination for global climate indices that were selected for modeling April–June NDVI of all forest communities

Сигнал	Коэффициент корреляции	R^2	прR ² (прогностическая модель)
ВАК в мае	-0,35	0,12	
ВАК в декабре	0,35	0,12	0,12
ПОЛ/ЕВР в апреле	-0,44	0,19	
АК в апреле	-0,48	0,24	
САК в феврале	0,32	0,10	
САК в декабре	0,40	0,16	
ТСП в декабре	0,38	0,15	
СК в феврале	-0,34		0,12
ЗСК в феврале	-0,54		0,30
Результат модели		0,80	0,55

На основании полученных коэффициентов модели, с учетом индексов климатических сигналов с декабря по май, можно записать уравнение множественной линейной регрессии следующим образом:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,6521 - 0,0180 \times X_1 + 0,0135 \times X_2 - 0,0092 \times X_3 \\
 & - 0,0092 \times X_4 - 0,0071 \times X_5 + 0,0054 \times X_6 \\
 & - 0,0069 \times X_7 + 0,0186 \times X_8,
 \end{aligned} \quad (5)$$

где Y – значение зависимой переменной NDVI; X_1 – ВАК в мае; X_2 – САК в феврале; X_3 – Пол/ЕВР в январе; X_4 – Пол/ЕВР в апреле; X_5 – АК в апреле; X_6 – ВАК в декабре; X_7 – САК в декабре; X_8 – ТСП в декабре.

Значение F -статистики равно 12,37 (p -значение = $3,828 \cdot 10^{-5}$), что указывает на статистическую значимость модели в целом. Согласно результатам модели все предикторы имеют статистически значимые коэффициенты (p -значение $< 0,05$). Тест Шапиро – Уилка показывает, что нулевая

гипотеза о нормальности распределения остатков не может быть отвергнута (p -значение = 0,3956 > 0,05), т.е. предположение о нормальности распределения остатков выполняется. Коэффициенты VIF для всех предикторов в модели не превышают критического значения 5, что указывает на отсутствие мультиколлинеарности между предикторами.

Прогностическая модель, которая учитывает вклад индексов климатических сигналов с декабря по февраль, описывается с помощью следующего уравнения:

$$Y = 0,6560 + 0,0065 \times X_1 + 0,0059 \times X_2 - 0,0081 \times X_3 - 0,0176 \times X_4, \quad (6)$$

где Y – значение зависимой переменной NDVI; X_1 – ВАК в декабре; X_2 – АК в декабре; X_3 – Средиземноморское колебание в феврале; X_4 – Западно-Средиземноморское колебание в феврале.

Значение F -статистики, равное 7,644, является значимым при p -значении 0,05, что указывает на статистическую значимость модели. Остаточная стандартная ошибка модели составляет 0,02027, а тест Шапиро – Уилка на нормальность остатков показывает, что предположение о нормальности выполнено ($W = 0,97437$, p -значение = 0,7919). Значения VIF варьируются от 1,033 до 1,063, что указывает на отсутствие признаков мультиколлинеарности между прогностическими переменными.

Такая оценка об отсутствии мультиколлинеарности подтверждает то, что Средиземноморское колебание, исследуемое в работе [21], и Западно-Средиземноморское колебание, предложенное в работе [23], действительно могут рассматриваться как самостоятельные сигналы изменчивости давления в регионе Средиземного моря, несмотря смежные центры действия в окрестности Генуэзского залива. Здесь следует упомянуть, что АК, САК и ВАК – отдельные климатические сигналы, хотя имеют общие центры действия.

Также может возникнуть вопрос о том, почему индексы СК и ЗСК в феврале, отличаясь высокими коэффициентами корреляции с NDVI, не попадают в первую модель, но попадают во вторую (прогностическую). Это как раз можно объяснить тем, что региональные средиземноморские колебания являются зависимыми от более масштабных колебаний Атлантико-Европейского региона. Следовательно, индексы СК и ЗСК могут не попадать в первую модель из-за наличия мультиколлинеарности с другими климатическими индексами. При этом во второй модели (прогностической) главную роль играют именно региональные индексы, т.е. моделью учитываются в основном результирующие региональные изменения барического поля над Средиземноморским регионом под действием более масштабных климатических процессов.

Для иллюстрации точности двух моделей на рис. 3 представлены фактические значения NDVI лесных сообществ и расчетные значения зависимой переменной на основе полученных коэффициентов и значений климатических сигналов с декабря по май и с декабря по февраль.

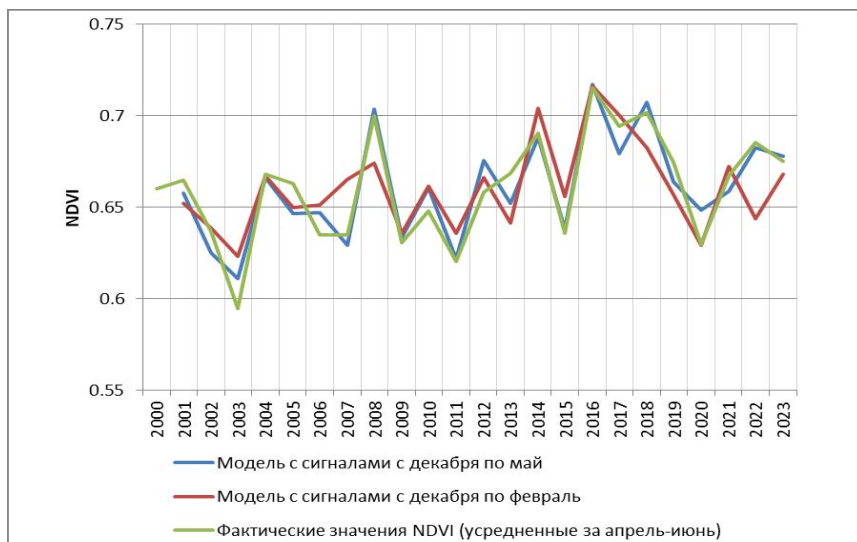


Рис. 3. Фактические значения NDVI и рассчитанные значения NDVI по двум моделям для лесных сообществ.

Fig. 3. Initial (green line) and calculated NDVI values of forest communities in two models with climate signals from December to May (blue line) and from December to February (red line).

Для выявления связи между атмосферными индексами и степной нарушенной растительностью так же, как и в предыдущем случае, были рассчитаны коэффициенты корреляции между глобальными климатическими индексами по месяцам с декабря по июнь с 2000 по 2023 год со средним значением NDVI всех степных сообществ за апрель–июнь (табл.4).

В результате проведенного анализа данных с использованием множественной линейной регрессии была построена модель, которая рассматривала вклад 10 предикторов (табл. 4), полученных на основе результатов анализа корреляции и значимости коэффициентов. В итоге моделью были отобраны по три наиболее значимых климатических сигнала с января по май (R^2 в табл. 5) и с января по февраль (prR^2 в табл. 5), которые объясняют, соответственно, 59,48 % и 49 % дисперсии зависимой переменной.

На основании полученных коэффициентов модели, можно записать уравнение множественной линейной регрессии следующим образом:

$$Y = 0,523393 - 0,006641 \times X_1 - 0,020325 \times X_2 - 0,022742 \times X_3, \quad (7)$$

где Y – значение зависимой переменной NDVI; X_1 – ВАК в январе; X_2 – ВАК в мае; X_3 – Средиземноморское колебание в феврале.

Значение F -статистики, равное 12,25, является значимым при p -значении 0,05, что указывает на статистическую значимость модели в целом.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции глобальных климатических индексов атмосферы по месяцам с декабря по июнь со средним значением NDVI степных сообществ за апрель–июнь с 2000 по 2023 год. Значимые величины выделены жирным шрифтом: на 90 % уровне – *, на 95 % уровне – **. Подчеркнуты те значения коэффициентов корреляции, которые усваивались моделью

Table 4. Correlation coefficients between monthly (December–June) global climate signals and the average (April–June) NDVI value of steppe communities from 2000 to 2023. Significant values are shown in bold: at the 90 % level – *, at the 95 % level – **. The values of the correlation coefficients that were assimilated by the model are underlined

Сигнал	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
ВАК	0,15	<u>-0,40**</u>	0,12	0,31	-0,14	<u>-0,53**</u>	0,07
САК	-0,03	-0,23	0,05	0,09	0,04	<u>-0,31</u>	-0,21
СКАНД	-0,17	0,11	-0,08	-0,09	0,18	-0,06	-0,17
ПОЛ/ЕВР	0,05	-0,13	-0,28	0,08	<u>-0,37*</u>	0,07	0,11
АК	-0,05	<u>-0,41*</u>	-0,05	0,13	-0,31	<u>-0,38*</u>	-0,02
ВА/ЗР	-0,12	-0,11	0,20	-0,24	-0,09	0,02	-0,08
ТСП	-0,11	-0,03	-0,18				
СК	-0,21	<u>0,34*</u>	<u>-0,67**</u>	0,05	<u>0,41*</u>	0,11	-0,05
ЗСК	-0,16	0,15	<u>-0,33*</u>	-0,01	0,19	-0,02	0,04

Таблица 5. Коэффициенты корреляции и детерминации глобальных климатических сигналов, отобранных для моделирования, с NDVI степных сообществ за апрель–июнь

Table 5. Coefficients of correlation and determination for global climate indices that were selected for modeling April–June NDVI of steppe communities

Сигнал	Коэффициент корреляции	R ²	прR ² (прогностическая модель)
ВАК в январе	-0,40	0,18	0,18
ВАК в мае	-0,53	0,28	
СК в феврале	-0,67	0,45	0,45
СК в январе	0,34		0,11
Результат модели		0,59	0,49

Тест Шапиро – Уилка показал нормальность распределения остатков, p -значение, равное 0,7017, указывает на то, что остаточные значения существенно не отличаются от нормального распределения. Коэффициенты увеличения дисперсии VIF варьируются от 1,067 до 1,117, что указывает на отсутствие признаков мультиколлинеарности между прогностическими переменными.

С целью прогностической оценки NDVI степных сообществ за апрель–июнь был рассмотрен вклад атмосферных индексов с декабря по март

включительно и была построена прогностическая модель с помощью следующего уравнения:

$$Y = 0,516995 - 0,008097 \times X_1 + 0,010207 \times X_2 - 0,023999 \times X_3, \quad (8)$$

где Y – значение зависимой переменной NDVI; X_1 – ВАК в январе; X_2 – Средиземноморское колебание в январе; X_3 – Средиземноморское колебание в феврале.

Значение F -статистики, равное 8,607, является значимым при p -значении 0,05, что указывает на статистическую значимость модели в целом. Для коэффициентов модели p -значение меньше 0,05, что указывает на то, что эти коэффициенты являются статистически значимыми.

Для проверки нормальности остатков использовался тест Шапиро – Уилка на нормальность. Оценка p -значения, равная 0,2612, указывает на то, что остатки существенно не отличаются от нормального распределения. Значения VIF варьируются от 1,030 до 1,117, что указывает на отсутствие признаков мультиколлинеарности между прогностическими переменными.

Для иллюстрации точности двух моделей на рис. 4 представлены фактические значения NDVI степных сообществ и расчетные значения зависимой переменной на основе полученных коэффициентов и значений климатических сигналов за рассмотренный период вегетации и заблаговременный период.

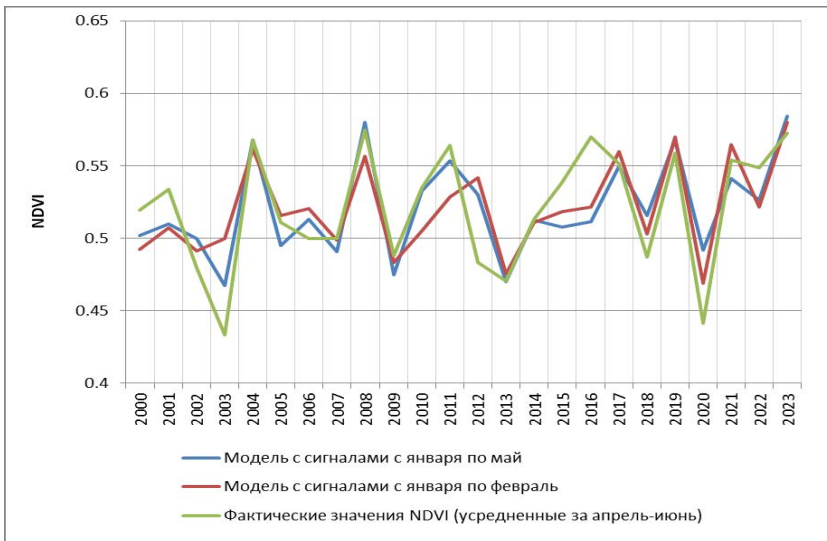


Рис. 4. Фактические значения NDVI и рассчитанные значения NDVI двух моделей для степных сообществ.

Fig. 4. Initial (green line) and calculated NDVI values of forest communities in two models with climate signals from January to May (blue line) and from January to February (red line).

Успешное использование прогностической модели возможно для вегетационного периода текущего года. Таким образом, зная индексы климатических сигналов с декабря по февраль, можно получить заблаговременную оценку ожидаемого среднего индекса NDVI по типам растительности за апрель–июнь. В каждом следующем году коэффициенты модели и основные климатические факторы должны быть актуализированы.

2.2. Проявления климатических сигналов

Результаты, приведенные в табл. 2 и 4, обобщены и сгруппированы по проявлениям климатических сигналов в индексах NDVI растительных сообществ.

Североатлантическое колебание (САК). Для лесных сообществ индекс NDVI за апрель–июнь (табл. 2) характеризуется положительной связью с индексом САК в декабре ($r = 0,41$) и феврале (0,32). Для степных сообществ (табл. 4) наблюдается отрицательная связь с индексом САК в мае (-0,31).

Восточно-Атлантическое колебание (ВАК). Для NDVI лесных сообществ (табл. 2) определяется положительная связь с индексом ВАК в декабре (0,39) и отрицательная связь с индексом ВАК в мае (-0,35). Для NDVI степей (табл. 4) наблюдается отрицательная связь с индексом ВАК в январе (-0,40) и мае (-0,53).

Полярное/Евразийское колебание (ПОЛ/ЕВР). В табл. 1 среди всех коэффициентов корреляции для разных типов растительности значимыми являются только отрицательные корреляции ($< -0,50$) между NDVI и среднегодовым индексом ПОЛ/ЕВР для разных типов леса. Для степей и степей яйл не наблюдается значимой корреляции даже и со среднегодовым индексом ПОЛ/ЕВР (табл. 1). Для NDVI лесов (табл. 2) наблюдается значимая отрицательная зависимость от индекса ПОЛ/ЕВР в декабре (-0,44), феврале (-0,44) и апреле (-0,52). Наибольшим откликом характеризуются лиственные породы (табл. 1). Для NDVI степей (табл. 4) наблюдается значимая отрицательная зависимость от индекса ПОЛ/ЕВР в апреле (-0,37).

Арктическое колебание (АК). Отклик NDVI всех лесных сообществ (табл. 2) характеризуется положительной корреляцией с индексом АК в декабре (0,34) и отрицательной корреляцией с индексом АК в апреле (-0,49). Отклик NDVI степных сообществ (табл. 4) имеет отрицательную связь с индексом АК в январе (-0,41) и мае (-0,38).

Тропики/Северное полушарие (ТСП). Отклик NDVI всех лесных сообществ (табл. 2) имеет положительную связь с индексом ТСП в декабре (0,39). Для NDVI степных участков нет значимой связи (табл. 4).

Средиземноморское колебание (СК). Отклик NDVI лесных сообществ (табл. 2) отрицателен на индекс СК в феврале (-0,34). Индекс NDVI степных сообществ (табл. 4) характеризуется положительным откликом на индекс СК в январе (0,34) и апреле (0,41), и отрицательным откликом на индекс СК в феврале (-0,67).

Западно-Средиземноморское колебание (ЗСК). Получен отрицательный отклик NDVI на индекс ЗСК в феврале (табл. 2 и 4) как для лесных сообществ (-0,54), так и для степных сообществ (-0,33).

На рис. 5 и 6 представлена реакция NDVI разных типов растительности, основанная на композитном анализе, на положительные (+) и отрицательные (-) фазы основных определяющих атмосферных индексов из табл. 2 и 5.

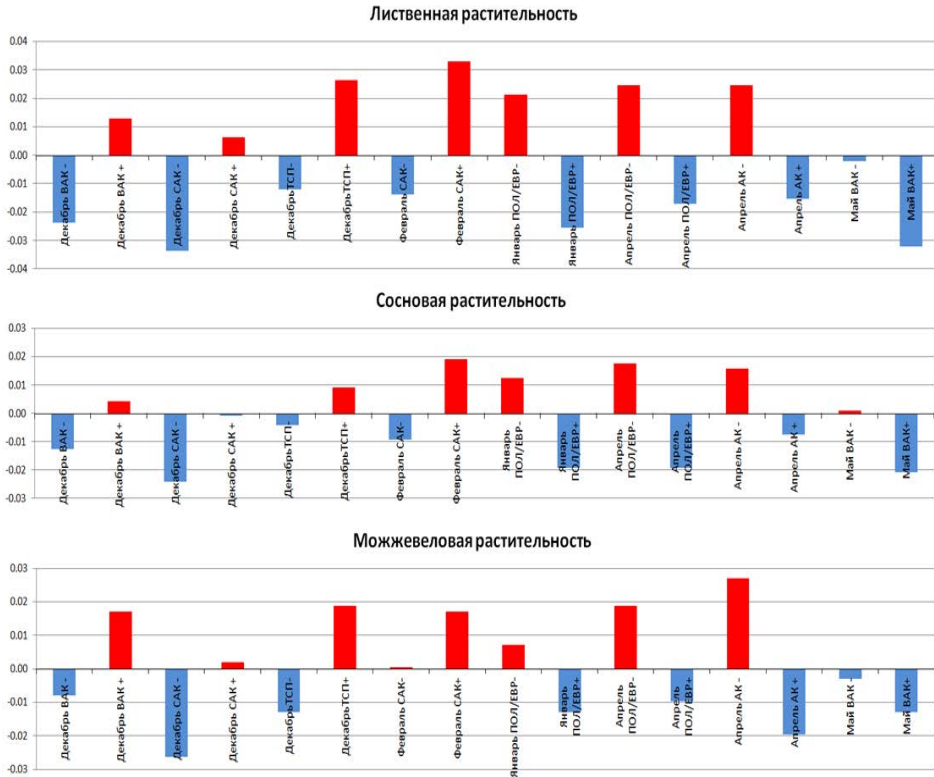


Рис. 5. Реакция NDVI различных типов леса на положительные (+) и отрицательные (-) фазы климатических индексов в разные месяцы.

Fig. 5. NDVI response to the positive (+) and negative (-) phases of monthly climate indices for different forest types.

Как видно на рис. 5, для лиственной и сосновой растительности наиболее высокие средние значения NDVI наблюдаются при положительной фазе САК в феврале, при которой происходит понижение частоты циклонов Черноморского региона в зимне-весенний период. Для можжевеловой растительности самый высокий средний индекс NDVI – при отрицательной фазе Арктического колебания в апреле, при которой частота циклонов Черноморского региона возрастает весной и уменьшается летом. Самые низкие средние значения индекса NDVI всех типов леса – при отрицательной фазе САК в декабре, которая сопровождается повышением частоты циклонов в декабре.

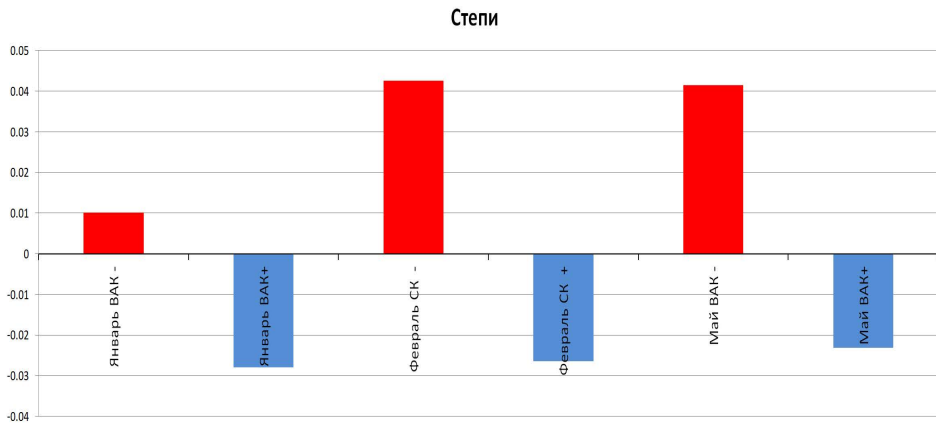


Рис. 6. Реакция NDVI степей на положительные (+) и отрицательные (-) фазы климатических индексов в разные месяцы.

Fig. 6. NDVI response to the positive (+) and negative (-) phases of monthly climate indices for steppe communities.

Из рис. 6 в изменении индекса NDVI для степной растительности видно, что Средиземноморское колебание в феврале и BAK в мае больше проявляются в своей отрицательной фазе (индекс NDVI $> +0,04$), когда циклоническая активность возрастает, чем в положительной фазе (индекс NDVI до $-0,25$) и ослаблении циклонической активности. При этом NDVI степных сообществ больше реагирует на ослабление циклонической активности (недостаток увлажнения) в январе в положительную фазу BAK (NDVI $-0,28$), чем при большем количестве циклонов (достаточном увлажнении) в отрицательную фазу BAK (NDVI $+0,01$).

2.3. Обсуждение и интерпретация результатов

Известно, что положительные и отрицательные фазы рассмотренных климатических процессов значимо проявляются в изменении частоты, глубины циклонов и смещении их траекторий [3]. В целом, повышение циклонической активности приводит к увеличению количества осадков, смягчению температур холодных месяцев и охлаждению теплых месяцев. Понижение активности циклонов (т. е. увеличение активности антициклонов), напротив, уменьшает количество выпадающих осадков, сопровождается морозными зимами и жарким летом.

Рассмотрим закономерности проявлений климатических сигналов в изменчивости индекса NDVI посредством циклонической активности на примере САК как наиболее изученного колебания.

Ранее в исследованиях [1, 28] было подтверждено влияние САК на изменчивость характеристик циклонов и антициклонов, что влияет на температурно-влажностный режим в Черноморско-Средиземноморском регионе: в отрицательную фазу САК наблюдается повышение числа циклонов,

и следовательно, увеличение осадков, а в положительную фазу – противоположные условия. Как получено в настоящей работе, отрицательная фаза САК в мае сопровождается ростом NDVI степных участков (табл. 4), что согласуется с результатами работ [4, 11].

Для лесных участков, напротив, наблюдается положительная корреляция NDVI с зимним индексом САК (табл. 2). При этом выделяются следующие особенности для всех рассмотренных типов леса (рис. 5). Отрицательный индекс САК в январе приводит к падению индекса NDVI, а положительный индекс в феврале – к росту индекса NDVI.

Для объяснения таких закономерностей сначала нужно учесть региональные особенности объекта исследования. На площади примерно 4 тыс. кв. км – главная гряда Крымских гор – соотношение атмосферных осадков и испаряемости близко к единице, а влажность почвы в течение 9–10 месяцев не опускается ниже влажности разрыва капилляров, при которой вода теряет сплошность заполнения капилляров, и ее подвижность резко уменьшается [7]. Это состояние наблюдается, когда вода начинает накапливаться в глубоких слоях почвы. Таким образом, на протяжении большей части года в крымских лесах преобладает доступность капиллярной воды для растений. В то же время степные участки более чувствительны как к недостатку влаги, так и к переувлажнению почвы из-за менее мощной корневой системы растений степи.

Получается, что несмотря на более теплые условия и увеличение циклонической активности в отрицательную фазу САК, в январе может создаваться множество неблагоприятных факторов для роста лесов на Крымском полуострове. Хотя повышение числа циклонов обычно сопровождается более теплыми условиями, оно также может обуславливать выпадение избыточных осадков [19]. На Крымском полуострове это может сопровождаться затоплением и переувлажнением почвы, что негативно влияет на рост растительности и, как следствие, приводит к снижению их фотосинтетической активности. Сильные ветры и избыточные осадки могут способствовать эрозии почвы, что ухудшает условия для роста корней растений и снижает доступность питательных веществ. При этом переувлажнение почвы, очевидно, является более неблагоприятным фактором для степных сообществ, а эрозия почвы – для лесных сообществ с активными склоновыми эффектами. Кроме того, неблагоприятным фактором может быть не столько общее количество осадков, сколько неравномерность их выпадения [34], т. е. когда при одном и том же среднемесячном количестве осадки выпадают с большей интенсивностью в течение короткого времени.

При положительном индексе САК в феврале в Черноморском регионе преобладают антициклонические барические системы [28]. Морозные температуры могут создавать условия для накопления твердых осадков и формирования более мощного снежного покрова в Крымских горах, в отличие от теплых температур при повышенной циклонической активности, когда поступает большее количество осадков, но в жидкой фазе. Такой запас

твердых осадков реализуется весной, приводя к более выраженному пику весеннего половодья крымских рек и росту вегетационного индекса лесов за счет снегового питания.

Рассмотрим теперь, как рассмотренные особенности проявлений САК в изменчивости индекса NDVI посредством циклонической активности оправдываются для других сигналов.

Характер проявлений ВАК в изменении индекса NDVI в целом аналогичен САК, что также справедливо и для циклонической активности. Для лесных и степных сообществ наблюдается отрицательная корреляция с индексом ВАК в мае (табл. 2 и 4), т. е. при положительной фазе ВАК в мае наблюдается пониженная циклоническая активность, и индекс NDVI понижается. Зимний индекс ВАК проявляется по-разному для лесных и степных сообществ.

Для степных сообществ январский индекс ВАК проявляется так же, как и майский индекс ВАК (табл. 4), т. е. в положительную фазу, при уменьшении циклонической активности, происходит уменьшение вегетационного индекса. Это можно объяснить ухудшением зимних (январских) условий увлажнения степных почв.

Индекс NDVI лесных сообществ характеризуется положительной корреляцией с индексом ВАК в декабре (табл. 2), как и с индексом САК в декабре. При сохранении общей закономерности наблюдаются следующие особенности по типам лесов (рис. 5). Индекс NDVI лиственных и сосновых лесов сильнее реагирует уменьшением в отрицательную фазу ВАК в декабре, а можжевеловая растительность – ростом в положительную фазу ВАК в декабре. Можно предположить, что запас снежного покрова более важен для вегетации можжевеловых пород с их менее развитой корневой системой, чем для сосновых и лиственных пород.

Проявления зимнего и весеннего индекса Арктического колебания в вегетационном индексе (табл. 2 и 4) аналогичны проявлениям ВАК, а также САК. Индекс АК характеризуются сильной корреляционной связью с индексом САК и включает в себя центры действия САК [29]. Характер проявлений АК в циклонической активности аналогичен САК. При этом ВАК хотя и отдельное колебание давления в Северной Атлантике, часто интерпретируется как смещенное на юго-восток САК [14].

Годовой индекс Полярного/Евразийского колебания отличается наиболее выраженной отрицательной связью с индексом NDVI лесных сообществ за апрель–июнь (табл. 1). Видимо, это связано с тем, что в отдельные месяцы знак отрицательной корреляции сохраняется (табл. 2) и не погашается при усреднении, как для других сигналов.

При положительной фазе ПОЛ/ЕВР в зимние и весенние месяцы циклоническая активность над Крымским полуостровом понижается весной, при этом, как показано в [15], уменьшается количество осадков. Таким образом, формируются неблагоприятные весенние условия увлажнения для развития растительности, и NDVI падает, как при положительной фазе САК, в мае.

Вегетационный индекс лесных сообществ сильнее реагирует на январский, февральский и апрельский индекс ПОЛ/ЕВР (табл. 2). В то же время NDVI степных сообществ откликаются только на апрельский индекс (табл. 4). То, что лесные сообщества более выражено реагируют на зимне-весенний индекс ПОЛ/ЕВР и условия весеннего увлажнения, возможно, связано с тем, что в предгорных и горных условиях крымского леса сложнее достигаются неблагоприятные для растений условия переувлажнения, чем на равнинных степных участках.

Отрицательная связь ПОЛ/ЕВР с рассмотренным индексом NDVI согласуется с результатами работы [9], где ПОЛ/ЕВР выделяется как основной предиктор изменчивости урожайности озимой пшеницы (с отрицательной корреляцией) в новых регионах Российской Федерации в Северном Причерноморье и в Крыму.

Индексы ТСП, СКАНД и ВА/ЗР проявляются только в NDVI лесных сообществ благодаря вкладу единичных месяцев (табл. 2). Рост вегетационного индекса лесов наблюдается при положительной фазе ТСП в декабре, отрицательной фазе колебания ВА/ЗР в феврале и положительной фазе Скандинавского колебания в мае. При положительной фазе ТСП в декабре зимняя циклоническая активность ослабевает и создаются условия для накопления твердых осадков в горах. При отрицательной фазе колебания ВА/ЗР в феврале и положительной фазе Скандинавского колебания в мае активность циклонов весной возрастает и создает более благоприятные условия для растительности.

Отклики NDVI на Средиземноморское и Западно-Средиземноморское колебания также укладываются в описанные выше закономерности проявлений посредством циклонической активности. Вегетационный индекс как лесных, так и степных сообществ характеризуется отрицательной корреляцией с индексом СК в феврале (табл. 2 и 4). При росте зимнего индекса СК весенняя циклоническая активность над Крымским полуостровом падает. При этом создаются менее благоприятные тепло-влажностные условия для развития растительности, чем в противоположных условиях отрицательной фазы СК.

Итак, закономерности проявлений климатических сигналов в изменчивости индекса NDVI Крымского полуострова посредством циклонической активности можно обобщить следующим образом.

Рост вегетационного индекса лесных сообществ происходит при тех фазах климатических сигналов, которые сопровождаются понижением зимней (возможно, благодаря снеговому питанию) и повышением весенней циклонической активности. Увеличение вегетационного индекса степных сообществ наблюдается при тех фазах климатических сигналов, которые характеризуются повышением циклонической активности как в зимний, так и в весенний период (возможно, в связи с исключительно дождевым питанием). И наоборот, уменьшение индекса NDVI всех растительных сообществ Крымского полуострова происходит при противоположных фазах климатических сигналов и условиях циклонической активности.

Выводы

Проведённое исследование позволило выявить значимые отклики крупномасштабных климатических сигналов в изменениях состоянии растительного покрова на территории Крымского полуострова за период 2000–2023 гг. Наибольшее влияние на состояние и продуктивность лесных сообществ в апреле–июне оказывает среднегодовой индекс Полярного/Евразийского колебания (ПОЛ/ЕВР), в то время как влияние Северо-атлантического колебания (САК) и Восточно-Атлантического колебания (ВАК) выражено менее значительно. Для степных сообществ наибольшим фактором воздействия являются ВАК и Средиземноморское колебание. Вегетационный индекс растительных сообществ возрастает при тех фазах климатических сигналов, которые сопровождаются усилением циклонической активности. Исключение составляют лесные сообщества, индекс NDVI которых увеличивается при ослаблении зимней циклонической активности, возможно, в связи с формированием более морозных условий, благоприятных для накопления твердых осадков в горах.

В ходе проведенного анализа на основе мультирегрессионного моделирования показано, что совместное влияние САК, ВАК, АК, ПОЛ/ЕВР и ТСП с декабря по май объясняет 80 % изменения вегетационного индекса лесных сообществ в апреле–июне. Влияние процессов ВАК и СК с января по май объясняет 59 % изменения вегетационного индекса степных сообществ. Прогностические модели, анализирующие вклад глобальных климатических индексов с декабря по февраль, объясняют 55 % изменения NDVI лесных сообществ и 49 % изменения NDVI степных сообществ.

Полученные выводы работы подчеркивают важность учёта роли крупномасштабных климатических колебаний для понимания и необходимости их применения в прогнозировании изменений в экосистемах Крыма. Данные выводы могут стать основой для разработки эффективных стратегий управления природными ресурсами и адаптации к климатическим изменениям.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы госзадания ИПТС «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера», номер гос. регистрации 124013000609-2.

The work was funded by the state assignment of the Institute of Natural and Technical Systems "Fundamental and applied research of patterns and mechanisms of formation of regional changes in the natural environment and climate under the influence of global processes in the ocean-atmosphere system", state registration number 124013000609-2.

Список литературы

1. *Воскресенская Е.Н., Сухонос О.Ю.* Антициклоны и экстремальная температура воздуха в Черноморско-Средиземноморском регионе. Севастополь: ИПТС, 2020. 172 с.
2. *Бардин М.Ю.* Изменчивость характеристик циклоничности в средней тропосфере умеренных широт Северного полушария // *Метеорология и гидрология.* 1995. № 11. С. 24-37.
3. *Воскресенская Е.Н., Маслова В.Н.* Циклоническая активность в Черноморско-Средиземноморском регионе. Проявления глобальных процессов в системе океан-атмосфера. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 168 с.
4. *Гармаев Е.Ж., Ауржанаев А.А., Цыдыпов Б.З., Алымбаева Ж.Б., Содномов Б.В., Андреев С.Г., Жарникова М.А., Батомункуев В.С., Мандах Н., Салихов Т.К., Тулохонов А.К.* Оценка пространственно-временной изменчивости засушливых экосистем республики Бурятия // *Аридные экосистемы.* 2020. Т. 26, № 2. С. 34-42.
5. *Дегерменджи А.Г., Высоцкая Г.С., Сомова Л.А., Письман Т.И., Шевырногов А.П.* Многолетняя динамика NDVI-растительности различных классов тундры в зависимости от температуры и осадков // *Доклады РАН. Науки о Земле.* 2020. Т. 493, № 2. С. 103-106.
6. Как использовать NDVI для анализа своих полей. 2018–2023. <https://blog.onesoil.ai/ru/what-is-ndvi>.
7. *Лычак А.И., Бобра Т.В.* Геоэкологическая ситуация и проблема формирования экологической сети в Крыму // *Геополитика и экогеодинамика регионов.* 2009. Т. 5, № 1. С. 63-69.
8. *Маслова В.Н., Воскресенская Е.Н., Дунаевская Е.В.* Декадные аномалии циклонической активности в Черноморско-Средиземноморском регионе и урожайность озимой пшеницы в Украине // *Системы контроля окружающей среды.* 2009. Т. 66, № 12. С. 327-330.
9. *Маслова В.Н., Воскресенская Е.Н.* Закономерности изменчивости урожайности агрокультур в новых субъектах РФ // *Использование и охрана природных ресурсов в России.* 2024. № 4 (180). С. 79-86.
10. *Попова В.В.* Современные изменения температуры приземного воздуха на севере Евразии: региональные тенденции и роль атмосферной циркуляции // *Известия РАН. Серия географическая.* 2009. № 6. С. 59-69.
11. *Цыдыпов Б.З.* Трансформация отдельных компонентов природной среды севера Центральной Азии в условиях изменения климата // *Материалы Международной научно-практической конференции «Деградация земель и опустынивание: проблемы устойчивого природопользования и адаптации».* Москва: ООО «МАКС Пресс», 2020. С. 185-190.
12. *Bonan G.B.* Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests // *Science.* 2008. Vol. 320, no. 5882. P. 1444-1449.
13. *Bossard M., Feranec J., Otahel J.* CORINE land cover technical guide: Addendum 2000. Copenhagen: European Environment Agency, 2000. 105 p.
14. Climate Prediction Center – East Atlantic (EA). 2012. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml>
15. Climate Prediction Center – Polar Eurasia: Associated Precipitation Patterns. 2005. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/poleur_pmap.shtml
16. *Didan K., Munoz A.B., Compton T.J., Pinzon J.E.* MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab, 2015. 33 p.
17. *Le Quéré C., Andrew R.M., Friedlingstein P., Sitch S., Hauck J., Pongratz J. et al.* Global carbon budget 2018 // *Earth System Science Data.* 2018. Vol. 10, no. 4. P. 2141-2194.
18. *Gong D.Y., Ho C.H.* Detection of large-scale climate signals in spring vegetation index (normalized difference vegetation index) over the Northern Hemisphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2003. Vol. 108, no. D16. P. 4498.
19. *Hawcroft M., Walsh E., Hodges K., Zappa G.* Significantly increased extreme precipitation expected in Europe and North America from extratropical cyclones // *Environmental research letters.* 2018. Vol. 13, no. 12. P. 124006.

20. Liu C., Li J., Liu Q., Gao J., Mumtaz F., Dong Y., Wang C., Gu C., Zhao J. Combined influence of ENSO and North Atlantic Oscillation (NAO) on Eurasian Steppe during 1982–2018 // *Science of the total environment*. 2023. Vol. 892. P. 164735.

21. Maheras P., Kutiel H. Spatial and temporal variations in the temperature regime in the Mediterranean and their relationship with circulation during the last century // *International Journal of Climatology*. 1999. Vol. 19, no. 7. P. 745-764.

22. Mahyou H., Tychon B., Lang M., Balaghi R. (2018). Phytomass estimation using eMODIS NDVI and ground data in arid rangelands of Morocco // *African Journal of Range & Forage Science*. 2018. Vol. 35, no. 1. P. 1-12.

23. Martin-Vide J., Lopez-Bustins J. The western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula // *International Journal of Climatology*. 2006. Vol. 26, no. 11. P. 1455-1475.

24. Science Strategy – Science Mission Directorate. 2008. <https://web.archive.org/web/20090117171543/http://nasascience.nasa.gov/about-us/science-strategy>

25. CPC – Monitoring & Data: Daily Arctic Oscillation Index. 2002. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov>

26. Schultz P.A., Halpert M.S. Global correlation of temperature, NDVI and precipitation // *Advances in Space Research*. 1993. Vol. 13, no. 5. P. 277-280.

27. Padrón R.S., Gudmundsson L., Decharme B., Ducharme A., Lawrence D.M., Mao J., Peano D., Krinner G., Kim H., Seneviratne S.I. Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change // *Nat. Geosci.* 2020. Vol. 13, no. 7. P. 477-481.

28. Polonsky A.B., Bardin M.Yu., Voskresenskaya E.N. Statistical characteristics of cyclones and anticyclones over the Black Sea in the second half of the 20th century // *Physical Oceanography*. 2007. Vol. 17, no. 6. P. 348-359.

29. Rogers J., McHugh M. On the separability of the North Atlantic oscillation and Arctic oscillation // *Climate Dynamics*. 2002. Vol. 19. P. 599-608.

30. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // *NASA Spec. Publ.* 1974. Vol. 351, no. 1. P. 309-317.

31. ПИ5. 2004–2025. <https://m.rp5.ru>

32. National Centers for Environmental Information (NCEI). <https://www.ncei.noaa.gov/>

33. Venables W.N., Ripley B.D. *Modern Applied Statistics with S-PLUS*. 3rd ed. // *Statistics and Computing*. NY: Springer, 1999. 501 p.

34. Vyshkvarkova E., Voskresenskaya E., Martin-Vide J. Spatial distribution of the daily precipitation concentration index in Southern Russia // *Atmospheric Research*. 2018. Vol. 203. P. 36-43.

References

1. Voskresenskaya E.N., Sukhonos O.Y. Anticiklony i ekstremal'naya temperatura vozduha v Chernomorsko-Sredizemnomorskom regione [Anticyclones and extreme air temperature in the Black Sea-Mediterranean region]. Sevastopol: Institute of Natural and Technical Systems, 2020, 172 p. [in Russ.].

2. Bardin M.Y. Izmenchivost' harakteristik ciklonichnosti v srednej troposfere umerennykh shirot Severnogo polushariya [Variability of cyclonic characteristics in the middle troposphere of the temperate latitudes of the Northern hemisphere]. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. *Meteorol. Hydrol.*], 1995, vol. 11, pp. 24-37 [in Russ.].

3. Voskresenskaya E.N., Maslova V.N. Ciklonicheskaya aktivnost' v Chernomorsko-Sredizemnomorskom regione. Proyavleniya global'nykh processov v sisteme okean-atmosfera [Cyclonic activity in the Black Sea-Mediterranean region. Manifestations of global processes in the ocean-atmosphere system]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, 168 p. [in Russ.].

4. Garmaev E.Zh., Ayurzhanayev A.A., Tsydyrov B.Z., Alymbaeva Zh.B., Sodnomov B.V., Andreev S.G., Zharnikova M.A., Batomunkuyev V.S., Mandakh N., Salikhov T.K., Tulokhonov A.K. Ocenka prostranstvenno-vremennoy izmenchivosti zasushlivykh ekosistem respubliky Buryatiya [Assessment of spatial and temporal variability of arid ecosystems of the Republic of Buryatia]. *Arid ecosystems*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 34-42 [in Russ.].

5. Degermendzhi A.G., Vysotskaya G.S., Somova L.A., Pisman T.I., Shevyrnogov A.P. Long-term dynamics of NDVI vegetation of various tundra classes depending on temperature and precipitation. *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 493, no. 2, pp. 658-660 DOI: 10.1134/S1028334X20080048.

6. Kak ispol'zovat' NDVI dlya analiza svoih polej [How to use NDVI to analyze your fields]. 2018-2023. Available at: <https://blog.onesoil.ai/ru/what-is-ndvi> [in Russ.].

7. Lychak A.I., Bobra T.V. Geoekologicheskaya situaciya i problema formirovaniya ekologicheskoy seti v Krymu [Geoecological situation and the problem of forming an ecological network in Crimea]. *Geopolitics and Ecogeodynamics of regions*, 2009, vol. 5, no. 1, pp. 63-69 [in Russ.].

8. Maslova V.N., Voskresenskaya E.N., Dunaevskaya E.V. Dekadnye anomalii ciklonicheskoy aktivnosti v Chernomorsko-Sredizemnomorskom regione i urozhajnost' ozimoy pshenicy v Ukraine [Decadal anomalies of cyclonic activity in the Black Sea-Mediterranean region and winter wheat yield in Ukraine]. *Monitoring systems of environment*, 2009, vol. 66, no. 12, pp. 327-330 [in Russ.].

9. Maslova V.N., Voskresenskaya E.N. Zakonomernosti izmenchivosti urozhajnosti agrokul'tur v novyh sub"ektah RF [Patterns of agricultural yield variability in new regions of the Russian Federation]. *Use and protection of natural resources of Russia*, 2024, no. 4(180), pp. 79-86 [in Russ.].

10. Popova V.V. Sovremennye izmeneniya temperatury prizemnogo vozduha na severe Evrazii: regional'nye tendencii i rol' atmosfernoj cirkulyacii [Modern changes in surface air temperature in the north of Eurasia: regional trends and the role of atmospheric circulation]. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, 2009, no. 6. pp. 59-69 [in Russ.].

11. Tsydyпов B.Z. Transformaciya ot del'nyh komponentov prirodnoj sredy severa Central'noj Azii v usloviyah izmeneniya klimata [Transformation of individual components of the natural environment of the North of Central Asia in the context of climate change]. *Proc. Int. Sci. Pract. Conf. "Land Degradation and Desertification: problems of sustainable environmental management and adaptation"*. Moscow, MAKS Press publ., 2020, pp. 185-190 [in Russ.].

12. Bonan G.B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, vol. 32, no. 5882, pp. 1444-1449.

13. Bossard M., Feranec J., Otahel J. CORINE land cover technical guide: Addendum 2000. Copenhagen: European Environment Agency, 2000, 105 p.

14. Climate Prediction Center – East Atlantic (EA). 2012. Available at: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml>.

15. Climate Prediction Center - Polar Eurasia: Associated Precipitation Patterns. 2005. Available at: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/poleur_pmap.shtml.

16. Didan K., Munoz A.B., Compton T.J., Pinzon J.E. MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab, 2015, 33 p.

17. Le Quéré C., Andrew R.M., Friedlingstein P., Sitch S., Hauck J., Pongratz J., ... Zheng, B. Global carbon budget 2018. *Earth System Science Data*, 2018, vol. 10, no. 4, pp. 2141-2194.

18. Gong D.Y., Ho C.H. Detection of large-scale climate signals in spring vegetation index (normalized difference vegetation index) over the Northern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, vol. 108, no. D16, p. 4498.

19. Hawcroft M., Walsh E., Hodges K., Zappa G. Significantly increased extreme precipitation expected in Europe and North America from extratropical cyclones. *Environmental research letters*, 2018, vol. 13, no. 12, p. 124006.

20. Liu C., Li J., Liu Q., Gao J., Mumtaz F., Dong Y., Wang C., Gu C., Zhao J. Combined influence of ENSO and North Atlantic Oscillation (NAO) on Eurasian Steppe during 1982–2018. *Science of the total environment*, 2023, vol. 892, p. 164735.

21. Maheras P., Kutiel H. Spatial and temporal variations in the temperature regime in the Mediterranean and their relationship with circulation during the last century. *International Journal of Climatology*, 1999, vol. 19, no. 7, pp. 745-764.

22. Mahyou H., Tychon B., Lang M., Balaghi R. (2018). Phytomass estimation using eMODIS NDVI and ground data in arid rangelands of Morocco. *African Journal of Range & Forage Science*, 2018, vol. 35, no. 1, pp. 1-12.

23. *Martin-Vide J., Lopez-Bustins J.* The western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 2006, vol. 26, no. 11, pp. 1455-1475.
24. Science Strategy – Science Mission Directorate. 2008. Available at: <https://web.archive.org/web/20090117171543/http://nasascience.nasa.gov/about-us/science-strategy>
25. CPC – Monitoring & Data: Daily Arctic Oscillation Index. 2002. Available at: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov>
26. *Schultz P.A., Halpert M.S.* Global correlation of temperature, NDVI and precipitation. *Advances in Space Research*, 1993, vol. 13, no. 5, pp. 277-280.
27. *Padrón R.S., Gudmundsson L., Decharme B., Ducharme A., Lawrence D.M., Mao J., Peano D., Krinner G., Kim H., Seneviratne S.I.* Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change. *Nat. Geosci.*, 2020, vol. 13, no. 7, pp. 477-481.
28. *Polonsky A.B., Bardin M.Yu., Voskresenskaya E.N.* Statistical characteristics of cyclones and anticyclones over the Black Sea in the second half of the 20th century. *Physical Oceanography*, 2007, vol. 17, no. 6, pp. 348-359.
29. *Rogers J., McHugh M.* On the separability of the North Atlantic oscillation and Arctic oscillation. *Climate Dynamics*, 2002, vol. 19, pp. 599-608.
30. *Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering, D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ.*, 1974, vol. 351, no. 1, pp. 309-317.
31. PII5. 2004-2025. Available at: <https://m.rp5.ru>
32. National Centers for Environmental Information (NCEI). Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/>
33. *Venables W.N., Ripley B.D.* Modern Applied Statistics with S-PLUS. 3rd ed. Statistics and Computing. NY: Springer, 1999, 501 p.
34. *Vyshkvarkova E., Voskresenskaya E., Martin-Vide J.* Spatial distribution of the daily precipitation concentration index in Southern Russia. *Atmospheric Research*, 2018, vol. 203, pp. 36-43.

*Поступила 15.11.2024; одобрена после рецензирования 27.03.2025;
принята в печать 10.04.2025.*

*Submitted 15.11.2024; approved after reviewing 27.03.2025;
accepted for publication 10.04.2025*