

**ИНДИКАЦИЯ ВНУТРИСЕЗОННОЙ И МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ
СОСТОЯНИЯ СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ОСНОВЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ
ИНДЕКСОВ НА ПРИМЕРЕ ТУРАНО-УЮКСКОЙ КОТЛОВИНЫ,
РЕСПУБЛИКА ТЫВА**

Ильинова Н.В., Хорошев А.В.,

*Географический факультет Московского государственного университета имени М.
В. Ломоносова*

Аннотация. Анализируется внутрисезонная и межгодовая изменчивость фитопродукционного процесса в степных и луговых сообществах Турано-Уюкской котловины после прекращения землепользования, за период 1990–2024 на основе полевой верификации, многолетних спутниковых данных (Landsat, MODIS) и вегетационных индексов (NDVI, VCI). Выявлены тренды и темпы восстановления режима функционирования, среднеемноголетние максимумы вегетации. Классификация по годовому ходу NDVI показала значительное влияние грунтовых вод на скорость восстановления степных экосистем. Исследование подтверждает влияние гидротермических флуктуаций, котловинного и экспозиционного эффектов на характер восстановления растительных сообществ.

Ключевые слова: NDVI, вегетационные индексы, дистанционное зондирование, сезонная динамика, режим функционирования, устойчивость экосистем, степные экосистемы, республика Тыва

**INDICATION OF INTRA-SEASONAL AND INTERANNUAL VARIABILITY OF
STEPPE LANDSCAPE CONDITIONS BASED ON VEGETATION INDICES: A CASE
STUDY OF THE TURANO-UYUK BASIN, TUVA REPUBLIC**

Ilinova N.V., Khoroshev A.V.,

Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University

Abstract. The intra-seasonal and interannual variability of the phytproductivity process in steppe and meadow communities of the Turano-Uyuk Basin is analyzed following the cessation of land use over the period 1990–2024. The study is based on field verification, long-term satellite data (Landsat, MODIS), and vegetation indices (NDVI, VCI). Trends and rates of functional regime recovery, as well as multi-year maximum vegetation levels, have been identified. NDVI-based classification of annual dynamics revealed a significant influence of groundwater on the rate of steppe ecosystem recovery. The study confirms the impact of hydrothermal fluctuations, basin effects, and exposure-related factors on the restoration dynamics of plant communities.

Key words: NDVI, vegetation indices, remote sensing, seasonal dynamics, functional regime, ecosystem stability, steppe ecosystems, Tuva republic.

Введение. Выявление зависимости изменчивости функционирования природных комплексов от локальных факторов относится к числу современных проблем ландшафтоведения [7]. Большинство современных исследований [3, 5, 6] при оценке изменчивости состояния фитоценозов учитывают только внешний климатический фактор. Это характерно при выявлении связей между растительностью и количеством осадков в аридных и семиаридных ландшафтах, где гидротермический фактор является наиболее критическим [1]. При этом исследования восстановительной динамики фокусируются на видовом составе фитоценозов [7], и в меньшей степени на внутрисезонной и межгодовой изменчивости функционирования.

Комплексный подход, учитывающий климатический фактор, региональные особенности и локальные соседства геосистем, применяется в исследованиях крайне редко. Пространственная структура и мозаичность ландшафта как факторы функционирования остаются недостаточно изученными. В засушливых регионах климатический фактор рассматривается как ключевой при недостаточном внимании к регулируемому вкладу межкомпонентных связей и эмерджентных свойств пространственной структуры агроландшафтов.

Целью исследования является анализ восстановительной динамики степных и луговых экосистем Турано-Уюкской котловины после прекращения землепользования в середине 1990-х годов на основе полевой верификации, многолетних рядов спутниковых данных Landsat и MODIS, а также вегетационных индексов NDVI и VCI за 30-летний период. Работа направлена на выявление трендов изменений в растительном покрове, анализ скорости и характера восстановления степных и луговых экосистем Турано-Уюкской котловины после прекращения антропогенного воздействия, а также определение факторов, влияющих на динамику восстановления растительных сообществ.

Материалы и методы. Турано-Уюкская котловина расположена в горах Южной Сибири на севере Республики Тыва. Рельеф центральной части характеризуется развитием аккумулятивного рельефа различного генезиса и наличием островных гор. Окружающее низкогорье сложено осадочными и вулканическими породами палеозоя, подножья гор – четвертичными делювиально-пролювиальными щебнисто-суглинистыми отложениями, днище котловины – современными аллювиальными образованиями р. Уюк и притоками. Присутствуют бессточные области с озёрами и несколько групп останцовых гор, что говорит о сложной картине неотектонических движений территории [2]. При общей резкой континентальности котловин Тувы, Турано-Уюкская отличается более высоким количеством осадков (300-350 мм) с пиком в июле-августе, зимы малоснежные, что способствует глубокому промерзанию почвы и сохранению реликтовой мерзлоты в пойменной части [4]. Преобладающие типы фитоценозов – ксерофильные (разнотравно-) дерновинно-злаковые и кустарниковые степи с участием галофильных злаковых, мезофильных и гигромезофильных лугов на поймах, на склонах – экспозиционная листовенничная лесостепь. Преобладающие факторы дифференциации – экспозиция, высотный градиент и водный режим. В середине 20 в. вся территория (за исключением пойменных сенокосных угодий) использовалась в залежно-паровой системе земледелия с преобладанием зерновых и кормовых культур. С середины 2010-х в северной части, близ г. Туран, сохраняются посевы кормовых культур, тогда как основная территория переориентирована на пастбищное животноводство.

Исследование основано на данных спутников Landsat-5,8 и MODIS, а также производных вегетационных индексов NDVI и VCI, рассчитанных за период наблюдений с 1990 по 2024 гг. Рассчитаны медианные, межквартильные и среднеквадратичные отклоненные значения указанных индексов. В 2024 году нами проведена полевая верификация с применением БПЛА на шести ключевых участках. Выполнено 40 комплексных ландшафтных описаний и аэрофотосъемка. Предполагалось, что 30-летний временной отрезок является достаточным для восстановления степных экосистем и выявления изменений в межгодовой динамике зеленой фитомассы в данном регионе [5].

Значения NDVI и VCI для ключевых участков были получены в среде Google Earth Engine на основе 740 спутниковых сцен. Кроме того, использовались растровые изображения, охватывающие всю территорию котловины (всего 56 сцен). Обработка данных выполнялась в средах QGIS и RStudio с использованием пакетов cluster, spdep, terra, ggplot2, tmap, sf и других.

Анализ реакции фитопродукционного процесса на гидротермические флуктуации осуществлялся на основе индекса условий вегетации (VCI), рассчитанного по данным MODIS путем усреднения среднемесячных значений и среднеквадратичных отклонений за весь вегетационный период на каждый месяц наблюдений. В среде Google Earth Engine на основе данных спутников Landsat и индекса NDVI были определены дни с максимальными значениями индекса внутри вегетационных сезонов для каждого пикселя (Greenest DOY).

Межгодовая изменчивость фитопродукционного процесса на шести степных и луговых ключевых участках анализировалась на основе 95%-перцентильных значений NDVI, усредненных отдельно для каждого вегетационного сезона в период 1990–2023 гг. Для оценки динамики были построены графики сезонного хода NDVI на основе данных по 50 случайным точкам внутри полигонов. Для выявления трендов использовалась аппроксимация полиномом третьей степени. В случае значительных перегибов кривой аппроксимации соответствующий временной отрезок фиксировался как новый этап функционирования фитомассы на участке.

Классификация по годовому режиму NDVI осуществлялась методом кластерного анализа (Random Forest).

Результаты. Анализ вегетационно-климатических характеристик и гидротермических показателей: В апреле VCI выше в пойме р. Уюк, ниже — в степной части котловины. Максимальные межгодовые вариации индекса зафиксированы в урочище Белых озер. В мае значения резко снижаются на пойменных лугах, в степных урочищах значения стабильны. Разброс значений увеличивается, максимальные колебания наблюдаются в центральной части котловины и на южных склонах. В июне VCI возрастает на пойменных лугах и снижается в степях. Максимальная засушливость отмечена в урочище Кислые Озера. Вариативность индекса минимальна для пойменных лугов и высока для степей. В июле VCI выравнивается, снижается на поймах. Наибольшая засушливость характерна для северной бессточной части котловины. Максимальный разброс значений зафиксирован в урочище Кислые Озера. В августе значения снижаются на всей территории, наиболее низкие отмечены в центральной бессточной части, в районах распахки. Пойменные луга демонстрируют наибольшую стабильность, степные сообщества характеризуются максимальной сезонной изменчивостью.

Пик вегетации достигается в интервале с 29 июня по 18 августа. Для пойменных лугов медианное значение характерно в период 18 июля – 8 августа, в то время как для степей, пик NDVI сдвинут на 8-23 августа. Обрабатываемые распахиваемые территории имеют еще более смещенный пик, приходящийся на середину-конец августа.

Межгодовое варьирование фитопродукционного процесса неодинаково в разных классах фитоценозов. В ксерофильных дерновинно-злаковых степях амплитуда колебаний NDVI наибольшая среди степных полигонов. Наблюдается значительное увеличение пиковых значений NDVI начиная с 2015 года. В ксерофильных кустарниковых степях амплитуда колебаний NDVI имеет тренд к снижению, особенно между 1994–2000 и 2013–2024 гг. Максимальные значения NDVI варьируют от года к году, но с постепенным увеличением. Максимальные годовые значения NDVI наименьшие среди степных участков. Ксерофильные разнотравно-дерновинно-злаковые степи имеют более высокую амплитуду колебаний NDVI, чем кустарниковые степи, пики колебаний более выражены. Начиная с 2000 года наблюдается увеличение амплитуды колебаний, что может свидетельствовать о восстановлении степного режима функционирования. В галофитных злаковых лугах высокой поймы диапазон значений NDVI широкий, с постепенным увеличением вариабельности начиная с 2000-х годов. С 2015 года графики варьирования фитопродукционного процесса приобрели более структурированный характер, выделяются отдельные кластеры годового хода. В мезофильных и гигромезофильных лугах средней поймы пространственная вариабельность внутри сообществ значительно ниже, чем в галофитных лугах. Характерны сильные отклонения в отдельные годы без явных трендов.

Анализ классов годового хода NDVI за каждое из 3-х десятилетий позволил выявить кластер степей (3 класса) с наиболее нестабильной вариабельностью значений на пике вегетации. В этой группе выделяются три максимума: слабовыраженный в конце мая, сильно выраженный в середине июля, и умеренно выраженный в середине августа. Основной период вегетации — с 7 мая по 8 сентября. Основной пик NDVI периодически смещается между 2 и 3 максимумами, причем за период 2013–2024 годов пик вегетации приходится на июль. Классы различаются по средним значениям NDVI, что позволяет различать их по степени увлаженности, например: класс лощин, борозд и промоин, класс слабо выраженных понижений в рельефе с повышенной гидроморфностью, и класс сухих степей. Сравнение 3-х

классификаций за разные периоды позволило выявить, что наиболее раннее восстановление степных сообществ происходит на территориях, соседствующих с классом лощин, борозд и промоин (восстановление в период 2000-2010 гг.), а наиболее медленные изменения в режиме функционирования характерны для ксерофитных, наиболее хозяйственно преобразованных участков степей: восстановление годового хода не завершено до сих пор.

Обсуждение. Различия в значениях VCI между пойменными и степными урочищами в весенний период можно объяснить различием в распределении снежного покрова, который дольше задерживается на пойменных участках из-за их низинного положения, котловинного эффекта и высокой влажности почвы. На степных участках, особенно на пенеппенизированных равнинах и останцовых массивах, снеготаяние происходит быстрее, активнее ветровой перенос. Этим определяются более высокие показатели индекса VCI, что подтверждается максимальным среднеквадратичным отклонением индекса в урочище Белых озер, где колебания климата могут быть причиной нестабильности снеготаяния. Контраст значений VCI в мае связаны с завершением снеготаяния, что приводит к быстрому прогреву степей и раннему началу вегетации. Пойменные территории имеют отложенное начало вегетации из-за замедленного прогрева и сохранения влаги. В июне различия в значениях VCI между пойменными и степными урочищами могут быть результатом начала активной вегетации в пойме. Особенно стабильными являются участки в урочище Кислые Озера, где засоленные и обводненные зоны не подвержены сильным колебаниям, что подтверждается стабильной вегетацией. В августе различия амплитуды межгодовых флуктуаций VCI (т.е. стандартное отклонение) между пойменными лугами и степями подтверждает большую стабильность лугов при гидротермических флуктуациях, к которым степные сообщества более чувствительны.

Полученные сведения о сезонном максимуме вегетации свидетельствуют об отличии от Центрально-Черноземных и Уральских регионов: в резко континентальных условиях он приходится не на май-июнь, а на июль-август в связи с особенностью режима выпадения осадков. Среди степных полигонов амплитуда колебаний NDVI максимальна в ксерофильных дерновинно-злаковых степях, где продолжается сельскохозяйственная деятельность. Это может свидетельствовать о динамике использования земель – изменением агротехнологий и вносимых удобрений. Увеличение пиковых значений NDVI с 2015 года может быть связано с изменением климатических условий, включая повышение температуры. На полигоне 3 амплитуда колебаний NDVI имеет тенденцию к снижению, что может указывать на замедление восстановления экосистемы после прекращения сельскохозяйственной деятельности в 1994 году. Несмотря на это, наблюдается постепенное увеличение максимальных значений NDVI, что свидетельствует о продолжении восстановления фитомассы, однако значительное сокращение амплитуды колебаний в последние годы в связи с возобновлением антропогенной нагрузки, в том числе перевыпасом, снижающим биоразнообразие и меняющим сезонный ход фитомассы. В ксеромезофильных разнотравно-дерновинно-злаковых степях увеличение амплитуды колебаний NDVI с 2000 года указывает на восстановление режима функционирования, связанного с прекращением распашки в 1992 году и более слабой антропогенной нагрузкой в настоящее время. Для пойменных лугов широкий межгодовой диапазон NDVI и увеличение вариабельности начиная с 2000-х годов могут свидетельствовать о том, что прекращение сельскохозяйственного воздействия позволило восстановиться типичным сообществам. Увеличение амплитуды колебаний NDVI с 2015 года может быть связано с возвращением к экологическому оптимуму сообществ. На низкой пойме NDVI более стабильны, что можно объяснить высоким уровнем грунтовых вод и постоянной влажностью, что ограничивает колебания видового состава и фитомассы. Эпизодические увеличения амплитуды, вероятно, связаны с сухими годами.

Кластерный анализ позволил выявить различия в степных сообществах по уровню увлажнения, причиной которому является не климатический, а гидрологический фактор близости грунтовых вод и подземного стока в весенне-летний период, что отражается в пространственной организации годового хода фитопродукционного процесса. Повышенная

скорость восстановления на территориях, соседствующих с малыми эрозионными формами, может свидетельствовать о благоприятном влиянии дополнительного источника увлажнения на ксерофитные сообщества.

Выводы.

- На ключевых участках выявлены периоды перехода степных и луговых экосистем в состояние близкое к восстановлению, что составляет для менее нарушенных степных экосистем примерно 10 лет и для более нарушенных и засушливых – около 20 лет.
- Выявлен среднемноголетний период максимума вегетации, с 29 июня по 18 августа.
- Классификация по годовому ходу вегетации позволила оценить площадной характер восстановления степных экосистем и ранжировать их по степени увлажненности, что свидетельствует о значительном вкладе влияния грунтовых вод на скорость восстановления.
- Индекс состояния растительности VCI позволил выявить влияние котловинного и экспозиционного эффекта на территории, а также зависимость галофитных сообществ от климатического фактора

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 24-17-00045).

Литература

1. Birtwistle A.M., Laituri M., Bledsoe B., Friedman J.M. Using NDVI to measure precipitation in semi-arid landscapes. // Journal of Arid Environments. 2016. V. 131. P. 15-24.
2. Беляев Ю. Р. и др. История формирования рельефа западной части Турано-Уюкской котловины (Тувинское нагорье) в позднем плейстоцене //Геоморфология и палеогеография. 2022. Т. 52. №. 4. С. 15–27.
3. Дронин Н. М., Тельнова Н. О., Калуцкова Н. Н. Динамика биологической продуктивности степных и лесостепных ландшафтов восточной Европы в условиях изменений климата и сельскохозяйственных реформ: анализ по материалам дистанционного зондирования //Материалы Международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС». 2016. Т. 1. №. 20. С. 93-103.
4. Носин В. А. Почвы Тувы. Изд-во Академии наук СССР, 1963. 341с.
5. Самбуу А. Д. Сукцессии растительных сообществ в травяных экосистемах Тувы : дис. Центр. сиб. ботан. сад СО РАН, г. Новосибирск, 2014.
6. Тельнова Н.О., Калуцкова Н.Н., Дронин Н.М., Манжетова А.А. Динамика биологической продуктивности степных экосистем Оренбургского заповедника в условиях изменения климата. // Степи северной Евразии. Мат. седьмого международного симпозиума. – Оренбург, 2015. С. 828-832.
7. Хорошев А.В. Полимасштабная организация географического ландшафта. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 416 с.