

DOI:10.17308/978-5-9273-3692-0-2023-162-165

# ВНУТРИСЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ФИТОПРОДУКТИВНОСТИ ПОЙМЕННЫХ ЛУГОВЫХ ПТК СТАЦИОНАРА ЛЕСУНОВО (РЯЗАНСКАЯ МЕЩЕРА) ПО ДАННЫМ NDVI

## INTRA-SEASONAL DYNAMICS OF PHYTOPRODUCTIVITY OF FLOODPLAIN MEADOW GEOSYSTEMS OF THE STATION LESUNOVO (RYAZAN MESCHERA) ACCORDING TO NDVI DATA

Садртинов К.Д., Мироненко И.В.  
Sadrinov K.D., Mironenko I.V.

e-mail: sadrtinov.kiril@yandex.ru

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия  
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**Аннотация.** Впервые на стационаре Лесуново, для луговых ПТК долины р. Гусь проведена оценка стабильности продуктивности надземной фитомассы по изменению NDVI за вегетационный период. Рассмотрены 5 типов динамики (отклонений от фоновых приращений NDVI). Установлено, что высокие поймы среднего уровня стабильны по производству фитомассы. Нестабильно функционируют низкие поймы и НПП, на что влияет позиционный фактор. При удалении от ПТК с фоновой динамикой достоверно увеличивается индекс Шеннона (нестабильность).

**Abstract.** For the first time at the station Lesunovo, for meadow geosystems of the Goose River valley, an assessment of the stability of the productivity of phytomass was carried out according to the change in NDVI during the growing season. 5 types of dynamics (deviations from background NDVI increments) are considered. It is established that high floodplains are stable in the production of phytomass. Low floodplains and terraces function unstable, which is influenced by the positional factor. When moving away from the geosystem with background dynamics, the Shannon index (instability) significantly increases.

**Ключевые слова:** фитомасса, NDVI, стабильность функционирования геосистем  
**Keywords:** phytomass, NDVI, stability of functioning geosystems

**Введение.** В настоящее время активно используются разнообразные индексы, рассчитанные по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для изучения динамики ландшафтов. Одним из самых распространенных показателей динамики выступает нормализованный вегетационный индекс (NDVI), характеризующий фотосинтетически активную зеленую фитомассу [3]. По изменению NDVI во времени в беслесных пространствах можно судить не только об изменениях в продуктивности надземной фитомассы, но и о стабильности фитопродукции ландшафтов. Впервые на ландшафтном стационаре Лесуново (Рязанская обл.), на участке луговых комплексов долины р. Гусь, была изучена стабильность в изменении фитопродуктивности надземной фитомассы, т.е. повторяемость разных типов ее приращения (типов динамики) по NDVI. В работе решались следующие задачи: 1) изучить особенности ландшафтной структуры долины р. Гусь и выбрать ключевой участок на стационаре Лесуново; 2) рассмотреть разные типы внутрисезонного изменения продукционного процесса в луговых ПТК по данным NDVI; 3) выявить пространственно-временную неоднородность в изменении фитомассы ПТК; 4) установить локальные ландшафтные факторы, определяющие нестабильность динамики фитопродуктивности ПТК.

**Материалы и методы исследования.** На сегодняшний день на модельном низкогорно-степном участке заповедника «Айгуарская степь» (Южный Урал) отработан алгоритм, позволяющий оценить зависимость фитомассы от конкретных сезонных условий года. Выявляются фоновые изменения (типичные для данного региона) и нефоновые изменения, связанные с различными локальными факторами [4, 5]. По данной методике изучено функционирование ПТК луговых пойм в лесной зоне. Акцент сделан не на изучение абсолютных значений прироста фитомассы, а на стабильности (повторяемости) фитопродукционного процесса в разных ландшафтных условиях.

Объектом исследования выступают луговые комплексы долины р. Гусь на стационаре Лесуново (Рязанская область). Стационар расположен в центре Русской равнины, в Мещерской физико-географической провинции, в моренно-водноледниковом и долинно-зандровом ландшафтах зоны смешанных лесов [2]. В местности долины р. Гусь выделяют две НПП, высокие поймы трех высотных уровней и низкую пойму [1]. Формирование рельефа долины р. Гусь связано с периодами разной водности и развитием долины по наложенному типу, что приводит к обилию останцов.

Климатические условия определяют фоновую динамику ландшафта. Среднегодовая температура воздуха составляет 5°C, а летняя – 17.8°C. Среднегодовые осадки составляют около 600 мм (367-847 мм). Летняя норма осадков – 218 мм (90-409 мм) [6]. Высота половодья на р. Гусь варьирует от 1.5 до 4 м [7], поймы разных высотных уровней затапливаются с разной частотой, что влияет на продуктивность фитомассы. На нестабильность функционирования ПТК также может влиять зарастание пойменных лугов, активизировавшееся после прекращения выпаса скота в конце XX в. [3].

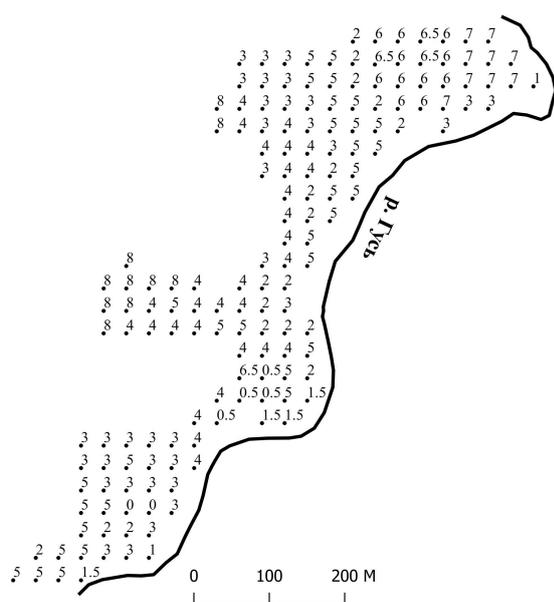
Для оценки стабильности фитопродукционного процесса луговых ПТК по космическим снимкам были выбраны участки нелесных пойм (162 пиксела, 30x30м). Попиксельно по снимкам Landsat 8 рассчитали NDVI за 2014–2022 гг. внутри каждого года на три срока: на начало периода вегетации (апрель-май), на пик вегетации (июль-август), на окончание вегетации (сентябрь-октябрь), что позволило изу-

чить внутрисезонную изменчивость индекса от срока к сроку за разные годы.

Далее провели обработку NDVI в программе Statistica 7, по разработанному А.В. Хорошевым алгоритму [4, 5] рассчитали: 1) разность значений NDVI между парами сроков (27 пар сроков), из раннего срока вычитаем поздний (весна-лето; лето-осень и весна-осень); 2) среднее (фоновое) приращение NDVI по каждому пикселу для каждой пары сроков; 3) отклонение приращения от среднего значения для каждого пиксела в единицах стандартного отклонения (STD) для каждой пары сроков, чтобы не зависеть от абсолютных значений индекса и конкретного срока. Полученные стандартные отклонения отнесли к одному из пяти типов динамики согласно критериям: 1 тип – более чем на 1,5 среднеквадратического отклонения (STD) ниже среднего приращения; 2 – отклонение на 0,5-1,5 STD ниже среднего; 3 – отклонение в пределах фонового приращения (0,5 STD в обе стороны от среднего); 4 – отклонение на 0,5-1,5 STD выше среднего; 5 – отклонение более чем на 1,5 STD выше среднего приращения; 4) вероятность каждого типа динамики в каждом пикселе, как отношение числа попаданий в какой-то тип к общему числу пар сроков (27 пар); 5) меру разнообразия по формуле Шеннона. Чем меньше значение индекса Шеннона, тем более стабильное функционирование характерно для территории, и тем выше вероятность конкретного типа динамики.

В результате можно разделить ПТК с фоновой динамикой, т.е. стабильным приращением фитомассы от ПТК, наращивание фитомассы которых отклоняется от ландшафтного фона в положительную или отрицательную стороны в силу проявления локальных факторов или от ПТК, имеющих нестабильное поведение в разные годы (разные типы динамики). И путем дисперсионного анализа ANOVA установить различия в функционировании между различными ПТК в вероятности отнесения к каждому типу динамики. Последним шагом работы станет проверка статистических гипотез о влиянии локальных факторов на нестабильность функционирования ПТК (на возрастание/убывание индекса Шеннона).

**Анализ внутрисезонной динамики фитомассы ПТК.** Ход NDVI подчиняется определенным типам динамики фитопродуктивности, которые реализуются в ПТК с определенной вероятностью и отражают корреляционные связи ландшафтных процессов. Для интерпретации полученных результатов составили попиксельную схему типов луговых ПТК (рис. 1).



Характеристика ПТК
0. Старичное озеро.
0.5. Старица под влажнотравно-осоково-камышовым лугом
1. Низкая пойма, гривистая, под кострцевыми и щавелево-белополевцевыми лугами
1.5. Низкая ленточная пойма под влажнотравно-раннеосоково-полевцевым лугом
2. Староречные понижения под белоусово-манниковым с примесью болотнотравья лугом с перелесками, местами чернольшаниками манниковыми
3. Высокая пойма низкого уровня под щучковым и влажнотравно-злаковым лугом
4. Высокая пойма среднего уровня под белоусовым с разнотравьем лугом
5. Высокая пойма высокого уровня под мятликово-полевцевым с разнотравьем и вейником наземным лугом
6. Останец НПТ гривистый под тонкополевцевым с сухотравьем лугом
6.5. Межгривье на останце НПТ с пойменным режимом под белоусовым с разнотравьем лугом
7. I НПТ гривистая под полевцевым с сухо- и разнотравьем; раннеосоково- и сорнотравно-полевцевым с пятнами мхов лугами
8. II НПТ высокого уровня под молодым сосновым лесом с пятнами полевницы и лишайника.

Рис. 1. Ландшафтная типология луговых ПТК (по пикселам) (1, 2, 3... - виды ПТК)

Рассмотрим особенности внутрисезонного прироста (убыли) фитомассы для пяти типов динамики, и в каких ПТК они реализуются.

Для типичных (фоновых) изменений надземной фитомассы (третий тип динамики) присуще постепенное наращивания фитомассы к середине лета со значением NDVI до 0.35-0.37, и постепенное снижение индекса к осени до весенних значений (около 0.2). Фоновая динамика наиболее вероятна для высокой поймы среднего и высокого уровней и староречий под перелесками (до 77% случаев), что указывает на стабильность функционирования ПТК. Расположение вдали от реки (редкое затопление), наличие постоянного источника влаги (атмосферные осадки и относительно постоянная подпитка староречий грунтовыми водами), высокое видовое разнообразие обеспечивают стабильность фитопродукции. Фоновая динамика практически не реализуется в обводненных старицах, низких поймах и НПТ. Анализ попарных различий через LSD Test, выявил, для ПТК высокой поймы среднего и высокого уровней и останцов НПТ схожую вероятность попадания в третий тип. Тогда как различия суще-

ственные между ПТК низкой поймы, НПТ, староречий и высокой поймы низкого уровня в реализации фоновой динамики.

При первом типе динамики прослеживается максимальная разница во внутрисезонном ходе надземной фитомассы, т.е. низкий прирост весной с максимальными значениями вегетационного индекса (около 0.5) летом, и долгое сохранение фитомассы до поздней осени с незначительным снижением индекса. В целом первый тип реализуется в ПТК более чем в 40 % случаях – самый вероятный для старицы обводненной. Однако таких точек (пикселов) всего 2 и однозначно их относить к ядрам первого типа нельзя. Соответственно, схожие ПТК в средней вероятности попадания в первый тип динамики надземной фитомассы – НПТ залесенные и низкие гривистые высокотравные поймы. Молодые сосняки на террасах и крупные злаки (кострец) на низких поймах могут давать огромный прирост фитомассы и сохранять его несколько лет, однако микрорельеф создает контрастность увлажнения из-за чего такая динамика реализуется нестабильно, переходя в другие типы динамики. И первый тип динамики не встречается в ПТК высоких пойм.

Второй тип динамики по приросту фитомассы сопоставим с первым типом весной-летом, но с меньшими колебаниями между сроками. Реализуется в сочетании с третьим и четвертым типами. Наиболее вероятен для старицы обводненной и староречий под перелесками и манниковыми зарослями, обуславливают высокий прирост фитомассы при достаточном грунтовом питании и больших влагозапасах в ПТК. Наименее вероятен второй тип для высокой поймы среднего уровня и НПТ. Парные различия между видами ПТК в средней вероятности реализации второго типа выявляются слабо из-за низкой вероятности реализации второго типа динамики для луговых ПТК. Принципиально различаются старица с высокой поймой среднего уровня; староречья с НПТ, высокая пойма среднего уровня с другими высокими поймами и староречьем.

В четвертом типе динамики весной-летом наблюдается высокий прирост фитомассы, однако осенью она не сохраняется, и происходит снижение до уровня фоновых значений. Четвертый тип динамики наиболее вероятен для залесенных НПТ, высокой поймы среднего уровня и межгривья останца НПТ. Обилие влажнотравья дает на влажных лугах большую фитомассу летом, но к осени растения угнетаются. Практически не случается четвертый тип динамики в старицах обводненных. Парные различия в средней вероятности реализации такого типа динамики отчетливо выражены между НПТ залесенной, высокой поймой среднего уровня и другими ПТК (кроме низкой поймы), и не выражены между низкой поймой и другими ПТК, т.е. имеет равную вероятность со всеми комплексами в реализации четвертого типа динамики.

Пятый тип динамики аналогичен четвертому, однако отличается сравнительно низкой летней фитомассой, которая к середине вегетационного периода нередко выгорает, и к осени практически не сохраняется. Маловероятен в любых ПТК долины р. Гусь. Максимальные вероятностные различия в реализации пятого типа динамики наблюдаются у НПТ гривистых под сухими лугами с другими частями речной долины, также наблюдаются вероятностные различия между высокой поймой низкого и среднего уровней.

**Локальные факторы, определяющие нестабильность фитопродуцирования ПТК.** Для определения меры разнообразия/нестабильности типов динамики надземной фитомассы составили попиксельные схемы, на которых показаны преобладающие типы внутрисезонной динамики фитомассы луговых ПТК (рис. 2А) и индекс Шеннона (рис. 2Б). Как показали расчеты, только третий тип (фоновый) и четвертый могут реализоваться в более 50% случаев, второй тип в сочетании с третьим и четвертым, а первый и пятый вместе с любыми другими типами динамики. Соответственно, наиболее стабильными по производству надземной фитомассы являются ПТК третьего типа динамики, а самые нестабильные – первого и пятого. Анализируя парные различия средних значений меры разнообразия, можем сказать, что высокие поймы высокого уровня в целом схожи с высокими поймами среднего уровня и останцами НПТ (стабильное функционирование), и отличаются от высоких низкого уровня, низких пойм, НПТ, староречий. Низкие поймы схожи по нестабильности с НПТ, а высокая пойма низкого уровня с низкими поймами и старицами.

Рассмотрено влияние возможных локальных факторов, нарушающих стабильность прироста фитомассы на пойме: высота над урезом воды; степень зарастания лесом и закустаренности; количество затоплений в половодье; позиционный фактор по отношению к фоновым точкам (наикратчайшее расстояние до ядра). Расчет рангового коэффициента корреляции Пирсона ( $r$ ) показал, что индекс Шеннона не имеет достоверной связи со степенью зарастания лесом и закустаренностью, т.к. зарастание наблюдается практически повсеместно, нестабильность также проявляется в разных частях долины р. Гусь. Для заросших (более чем на 50%) участков (2 НПТ и на границе высокой и низкой поймы) выявляется слабая положительная связь  $r=0.34$  с индексом Шеннона. Выявлена положительная связь  $r=0.63$  с позиционным фактором по отношению к фоновым точкам, т.е. чем дальше от ландшафтного фона, тем нестабильнее функционируют ПТК. Связь индекса Шеннона с высотой над урезом воды отсутствует, т.к. наименее стабильные участки приурочены к разным высотным уровням (и к низким поймам, и к террасам). Для периодически затопляемых участков речной долины выявляется слабая связь с индексом Шеннона  $r=0.36$ , т.е. чем больше число затоплений, тем нестабильнее функционирование.

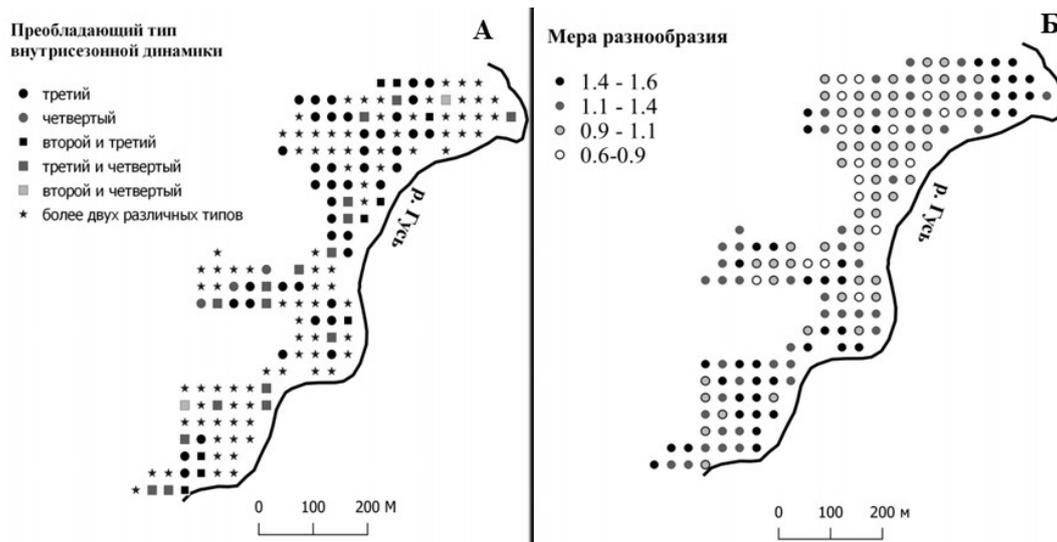


Рис. 2. А – преобладающие типы внутрисезонной динамики луговых ПТК; Б – Индекс Шеннона.

**Заключение.** Анализ внутрисезонной изменчивости NDVI позволяет сделать следующие выводы: 1. Для пространственной структуры долины р. Гусь характерна многоярусность ландшафтного строения, останцовость и прогрессирующее зарастание лугов. 2. Среди пяти типов внутрисезонного изменения прироста фитомассы, в долине р. Гусь реализуются с наибольшей вероятностью (до 0.77) фоновый и четвертый типы (до 0.51). Совместно с ними встречается второй тип динамики. 3. Самые стабильные по фитопродуктивности ПТК с фоновой динамикой (высокие поймы среднего и высокого уровней, останец НПТ и староречья вдали от реки). Самые нестабильные ПТК – первого и пятого типов динамики (низкие поймы, старицы и I НПТ). 4. Главным фактором нестабильности функционирования луговых ПТК выступает позиционный. Расчет рангового коэффициента корреляции Пирсона  $r=0.63$  показал, что индекс Шеннона возрастает по мере удаления от ПТК с фоновой динамикой.

#### Литература

1. Анненская Г.Н., Мамай И.И., Цесельчук Ю.Н. Ландшафты Рязанской Мещеры и возможности их освоения. М.: Изд-во МГУ, 1983. – 245 с.
2. Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А. Солнцева в современном ландшафтоведении) / Под ред. И.И. Мамай. М.-Смоленск: Ойкумена, 2013. – 330 с.
3. Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.
4. Хорошев А.В. Пространственная структура как фактор стабильности биопродукционного функционирования степных геосистем (на примере Айтуарской степи, Южный Урал) // Принципы экологии. Т. 9. № 3. 2020 – с. 71-86.
5. Хорошев А.В. Ландшафтные условия стабильности фитопродукционного функционирования в Айтуарской степи (Южный Урал). Вестник Московского университета. Серия 5: География. № 2. 2021 – с. 82-91.
6. <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/datatools/findstation>
7. [gmvo.skniivh.ru](http://gmvo.skniivh.ru)