

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ ЦЕЛОСТНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТЕПНЫХ ГЕОСИСТЕМ

SPATIO-TEMPORAL SCALES OF HOLISTIC FUNCTIONING IN STEPPE GEOSYSTEMS

Хорошев А.В., Ашихмин А.П.
Khoroshev A.V., Ashikhmin A.P.

e-mail: avkh1970@yandex.ru

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

Аннотация. На примере участка «Буртинская степь» заповедника «Оренбургский» выявлены взаимосоответствия между пространственными и временными масштабами реализации режимов фитопродукционного функционирования. Используются данные о повторяемости градаций, стандартизованных приращений вегетационного индекса NDVI между парами сроков (всего 110 пар по 51 снимку Landsat) и о гидротермических условиях за соответствующие периоды. Целостность однотипного реагирования ландшафта на погодные флуктуации усиливается в жаркие сухие годы. В прохладные влажные годы функциональная целостность ландшафта снижалась, увеличивалось разнообразие типов динамики фитопродукционного процесса. Заповедный режим способствует стабилизации динамики фитомассы, по сравнению с пастбищным, и усиливает значимость факторов ландшафтного масштаба по сравнению с локальными.

Abstract. We used the case study in "Burtinskaya steppe" ("Orenburgsky nature reserve") to reveal relationships between the spatial and temporal scales of the phytoproduction functioning. We used data on the frequency of gradations of the standardized NDVI increment between pairs of dates (110 pairs from 51 Landsat images) and hydrothermal conditions for the corresponding periods. The integrity of landscape response to weather fluctuations is enhanced in hot dry years. In cool wet years, the functional integrity of the landscape decreased, and the variety of types of dynamics of the phytoproduction process increased. Unlike the grazing regime, the protected regime contributes to the stabilization of the phytomass dynamics and enhances the significance of landscape-scale factors in comparison with local ones.

Ключевые слова: фитомасса, степь, динамика, гидротермические условия, устойчивость, заповедник, пастбище

Keywords: phytomass, steppe, dynamics, hydrothermal conditions, resilience, reserve, pasture

Проблема чувствительности и адаптации геосистем к внешним воздействиям является в ландшафтоведении одной из центральных и наиболее ориентированных на практику. Более 30 лет назад была предложена идея [1], что приспособление к стрессу идет по пути либо саморегулирования (способность ограничить разнообразие состояний), либо самоорганизации (изменения структуры). В.А. Боковым [2] подробно разработаны концепции типов геосистемных взаимодействий, типов целостности геосистем, связи иерархии геосистем с типами целостности. Определение гидротермических условий, при которых в ландшафте происходит интеграция или дезинтеграция режимов функционирования позволяет разрабатывать подходы к локально-специфичному прогнозированию реакции геосистем на внешние природные и антропогенные воздействия.

В нашем исследовании была поставлена задача выявить соответствия между пространственными и временными масштабами реализации режимов фитопродукционного функционирования и гидротермическими условиями, при которых в ландшафте возникает целостность однотипного реагирования ландшафта на погодные флуктуации. На примере низкогорно-степного ландшафта участка «Буртинская степь» государственного заповедника «Оренбургский» (Южный Урал) проверялась гипотеза о наличии закономерного отношения между длительностью временного интервала и вкладом факторов локального (урочищного, фациального) и общеландшафтного масштабов в динамику фитомассы.

В качестве материала использован временной ряд вегетационных индексов NDVI за 2010-2020 гг. (всего 51 срок), рассчитанные по снимкам Landsat. В анализ включены 1381765 пикселей на площади 1243 кв. км, включая заповедную и сельскохозяйственную территории. Для анализа внутрисезонной изменчивости NDVI разработан специальный алгоритм [4, 5]. Он учитывает степень подчинения надземной фитомассы: а) фоновой динамике ландшафтного масштаба (соответствующей обычным изменениям в степи в течение вегетационного сезона); б) влиянию локальных условий, создающих отклонения динамики фитомассы от фоновых приращений. Предполагается, что в силу единого для ландшафта климата за период между любыми двумя сроками в течение вегетационного сезона (в нашем случае – 110 пар сроков) происходит некоторое естественное «фоновое» внутрисезонное приращение индекса (с положительным или отрицательным знаком) в большинстве фаций. Для обеспечения сравнимости показателей динамики функционирования фаций для каждого пикселя рассчитывались следующие показатели. 1) Разность значений NDVI (приращение с положительным или отрицательным знаком) между сроками съемки в течение одного вегетационного сезона. 2) Среднее (фоновое) приращение NDVI по ландшафту для каждой пары сроков. 3) Мера отклонения приращения от среднего значения по ландшафту в единицах стандартного отклонения для каждой пары сроков по каждому пикселу. Для каждого пикселя определялось для каждой пары сроков определяли,

подчиняется ли он фоновой (модальной) тенденции в интервале 0,5 среднеквадратичного отклонения от среднего в каждую сторону либо отклоняется от модального приращения на величину 0,5-1,5 и более 1,5 среднеквадратичного отклонения в положительную или отрицательную сторону. По результатам каждый пиксел отнесен к одному из пяти классов отклонения (ниже – «типов динамики фитомассы») для данной пары сроков. Типы динамики 1 и 2 соответствуют стратегии быстрого накопления фитомассы весной и малой ее потери летом. Тип динамики 3 – фоновый; соответствует умеренной потере фитомассы ко второй половине лета. Типы 4 и 5 соответствуют медленному накоплению фитомассы весной и сильной потере фитомассы летом (тип 4 – по сравнению с фоновыми поздневесенне-раннелетними значениями, тип 5 – по сравнению с высокими поздневесенне-раннелетними значениями). Затем для каждого пиксела проводился расчет повторяемости каждого из пяти типов динамики в долях единицы. Для каждой пары сроков по формуле Шеннона рассчитана мера разнообразия типов динамики для территории ландшафта. Чем ниже разнообразие, тем более однотипно разные урочища откликаются изменением фитомассы на гидротермический сигнал соответствующего периода, что трактуется как целостность однотипного реагирования в ландшафте.

Для решения вопроса о связи между целостностью фитопродукционного функционирования ландшафта (т.е. высокой встречаемостью одного типа динамики) и гидротермическими условиями периода годы с 1960 по 2020 классифицированы на основании стандартизованных месячных и среднегодовых температур и месячных и годовых осадков на 4 категории: теплые умеренно-влажные, прохладные влажные, жаркие сухие, холодные влажные. Из них в период 2010-2020, охваченный используемыми космоснимками, встречались первые три категории. Гипотеза о зависимости встречаемости типов динамики от принадлежности к одной из этих категорий проверялась методом дисперсионного анализа. Зависимость разнообразия типов динамики от длительности периода между измерениями NDVI исследовалась посредством расчета непараметрических коэффициентов корреляции Спирмена.

Полевыми исследованиями выявлены фитоценотические признаки, соответствующие преобладанию каждого типа динамики фитомассы и их сменам в течение вегетационного периода [4]. Это позволило установить способы адаптации фитоценозов к разной длительности действия сильных локальных факторов в зависимости от погодных условий конкретного года и сезона. Так, от средней врезанной части лощины вверх к водосборному понижению происходит постепенное вытеснение ксеромезофитов мезоксерофитами и ксерофитами, что соответствует нарастанию на временных интервалах 2-4 месяца повторяемости фоновой динамики (тип 3), приближением к 0 повторяемости больших отклонений (типы динамики 1, 5), снижению повторяемости малых отклонений (типы динамики 2, 4). Верховья лощины отличаются от фоновой динамики, как правило, только на коротких интервалах до 1-2 месяцев. Луговые сообщества днищ балок наращивают фитомассу весной и в начале лета намного быстрее, чем фоновая степь (тип 1), благодаря повышенному накоплению снега за счет метелевого переноса и более медленному таянию в затененных позициях. Это обеспечивается высоким уровнем грунтовых вод и поверхностным стоком при высокой теплообеспеченности мая-июня. Во второй половине лета адаптация к нарастающему дефициту влаги и падению уровня грунтовых вод происходит за счет резкого сокращения фитомассы (тип 5) без замены видов. В днищах наиболее широких балок с большой площадью водосбора NDVI в апреле и начале мая может иметь отрицательные значения, а после схода снега нарастает с максимальной для территории скоростью (тип динамики 1). Почвенно-гидрологические условия могут в течение всего лета, несмотря на существенное уменьшение атмосферного увлажнения, поддерживать осоково-тростниковые сообщества с большой фитомассой, а в наиболее крупных лощинах – ивово-березово-осиновые колки. Сохранение большой фитомассы в течение всего лета после очень быстрого ее нарастания весной (тип динамики 1) рассматривается как проявление устойчивости-инертности (в терминологии [3]) – способности сохранять структуру и функционирование в условиях сильного внешнего воздействия – снижения атмосферного увлажнения. В данном случае этот вид устойчивости обеспечивается постоянством действия сильного локального фактора – избыточного грунтового увлажнения при дефиците атмосферной влаги. В фациях с максимальной повторяемостью типа динамики 5 освобождение от снега происходит к середине апреля, и быстро развивается густой покров эфемероидов. Весеннее нарастание фитомассы происходит с меньшей скоростью, большая фитомасса достигается уже к началу мая и почти не меняется позже.

На склонах и гребнях по мере уменьшении мощности почвы увеличивается петрофитность и растет частота малых отклонений от фоновой динамики (типы 2 и 4 сменяющие друг друга от весны ко второй половине лета). В седловинах характерно развитие в апреле эфемероидов (*Pulsatilla patens*, *Adonis wolgensis*, *Fritillaria ruthenica*, *Tulipa biebersteiniana*, *Tulipa gesneriana*), быстро создающих большую массу. Летние потери фитомассы (тип 4) за счет их отмирания оказываются больше фоновых. Возможны отклонения от фоновой динамики на длинных интервалах за счет механизма адапта-

ции в виде большого сокращения фитомассы без замены видов. Такой механизм, в терминологии [1] трактуется как саморегуляция. В данном случае она проявляется в сокращении испарения и биопродуцирования для снижения негативного эффекта стресса позднелетнего иссушения. Природный комплекс не обладает инертностью функционирования при действии сильного внешнего сигнала, но сокращает интенсивность функционирования, проявляя устойчивость-эластичность (в терминологии [3]). На южных крутых склонах рост обилия *Artemisia austriaca*, *Galatella villosa* при небольшом (45-40%) проективном покрытии способствует частичному сохранению фитомассы во второй половине лета (тип 2). Адаптация фитоценоза к летнему истощению почвенной влаги происходит за счет замены видов. В результате поддерживается фитомасса, т.е. функционирование сохранения за счет частичного изменения структуры – механизма самоорганизации (по [1]). Мы трактуем это как проявление устойчивости-пластичности [3]. На вершинах сопок с петрофитными условиями отклонение от фоновой динамики на длинных 4-5-месячных интервалах (май-сентябрь) может заключаться в относительно слабом летнем уменьшении фитомассы (тип динамики 2). Адаптация к нарастанию дефицита влаги проявляется в уменьшении проективного покрытия при устойчивом доминировании *Stipa zalesskii*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia austriaca*.

В целом в ландшафте однотипное фитопродукционное функционирование наиболее характерно на недельных-двухнедельных временных интервалах в августе-сентябре, что подтверждается низкими значениями мер пространственного разнообразия типов динамики. Наиболее ярко распад функционирования ландшафта на отдельные типы проявляется в мае, когда сильны локальные факторы: неравномерный прогрев и истощение талой почвенной влаги в положительных и отрицательных формах рельефа и на солнечных и теневых экспозициях, разная длительность периода после снеготаяния. На 4-5 месячных интервалах (май-август, май-сентябрь) пространственное разнообразие типов динамики (за счет высокой встречаемости фоновой динамики) меньше, чем на 1-3 месячных. Иначе говоря, целостность однотипного реагирования проявляется в ландшафте на больших временных интервалах. На малых интервалах функционирование может распасться на большее количество типов.

Фоновая динамика фитомассы может замещаться другими типами динамики в зависимости от длительности временного интервала. На коротких интервалах (до 15 суток) и на длинных интервалах (более 30 суток) уменьшение площади фоновой динамики в масштабах ландшафта происходит за счет перехода во 2 и 4 типы динамики, т.е. за счет относительно небольших отклонений от фоновых приращений. Однако на интервалах 15-30 суток наряду с малыми отклонениями возможны более сильные отклонения от фоновой динамики (с переходом в типы динамики 1 и 5). Чем более длинный интервал, тем реже случаи замещения фоновой динамики сильными отклонениями. Итак, сильные отклонения от фоновой динамики за пределами лощин могут провоцироваться действием локальных факторов длительностью 15-30 суток. Более короткие интервалы недостаточны для накопления или испарения того количества влаги, которое может вызвать сильные отклонения от фоновой динамики.

Проверена гипотеза о зависимости пространственного разнообразия типов динамики фитомассы от гидротермических условий. На 1-2-недельных интервалах пространственное разнообразие типов динамики особенно заметно уменьшается при крайне сухих и крайне влажных условиях (по ГТК Селянинова). Следовательно, целостность однотипного реагирования фитопродукционного процесса на кратковременные погодные события возрастает. На 3-5-месячных интервалах рост увлажненности (по ГТК Селянинова) вызывает возрастание разнообразия типов динамики – в основном за счет роста площади, охваченной 2-м и 4-м типами динамики, т.е. с небольшими отклонениями от фоновых приращений фитомассы.

Минимальное пространственное разнообразие типов динамики (целостное функционирование ландшафта) характерно для жарких сухих лет [5]. Неглубоковрезанные лощины и гребни утрачивают своеобразие режима функционирования и подчиняются целостности однотипного реагирования. В прохладные влажные годы функциональная целостность ландшафта может снижаться. В целом виды урочищ (плоские поверхности, склоны, гребни, лощины) «присоединяются» к фоновой динамике при разных гидроклиматических условиях: лощины и гребни – в жаркие сухие годы, водораздельные поверхности в прохладные влажные годы, увалы – в теплые умеренно-влажные годы.

Для проверки гипотезы о значимости антропогенного фактора для динамики фитомассы были выбраны смежные прямоугольные полигоны площадью по 27 га на пологом подсклоновом шлейфе южной экспозиции, один из которых относится к заповеднику, другой – к пастбищному угодию [4]. Для заповедной территории характерно абсолютное доминирование по частоте фонового типа динамики 3, типы динамики 1 и 2 почти не встречаются, а 4 и 5 имеют небольшую вероятность, несравнимую с фоновым типом 3. На пастбищном участке с аналогичными ландшафтными условиями снижается вероятность фонового типа динамики 3. Повторяемость слабых отклонений от фоновой динамики (типы динамики 2 и 4) выше, чем на заповедной территории. Сезонное варьирование фитомассы более сглажено, что связано с нарастанием фитомассы непоедаемых видов и кустарников.

Выводы.

1) В жаркие сухие годы в ландшафтном масштабе увеличивается однообразие типов динамики фитомассы; усиливается целостность однотипного реагирования ландшафта на рост дефицита влаги. В прохладные влажные годы функциональная целостность ландшафта снижалась, увеличивалось разнообразие типов динамики.

2) В течение вегетационного периода малые кратковременные флуктуации интенсивности фитопродукционного процесса взаимно компенсируют друг друга. В результате от начальной к конечной дате длинного интервала большинство урочищ меняют фитомассу примерно одинаково, что индицирует целостность ландшафта.

3) Этим доказывается справедливость теоретического положения о согласованности пространственных и временных масштабов процессов: процесс, охватывающий площадь ландшафта в целом, реализуется в полной мере на больших временных интервалах, чем локальные процессы.

4) Нестабильность динамики фитомассы заметно выше на выпасаемом участке, по сравнению с заповедным, что связано с большей частотой действия локальных факторов разной направленности.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 121051300176-1. Сбор данных осуществлен при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-05-00464).

Литература

1. Арманд А.Д. Самоорганизация и саморегулирование географических систем. М.: Наука, 1988. 264 с.
2. Боков В.А. Пространственно-временные основы геосистемных взаимодействий. Дисс. докт. геогр. наук. М., 1990. 406 с.
3. Гродзинский М.Д. Стейкиты геосистем до антропогенных навантаженъ. Київ: Лікей, 1995. 233 с.
4. Хорошев А.В., Ашихмин А.П., Калмыкова О.Г., Дусаева Г.Х. Ландшафтные факторы стабильности динамики фитомассы в заповедных и пастбищных низкогорно-степных ландшафтах Буртинской степи (Южный Урал) // Динамика и взаимодействие геосфер Земли. Т. III. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. 2021. С. 85-88.
5. Khoroshev A. V., Kalmykova O. G., Ashikhmin A. P. Hydrothermal conditions of the temporal variability of the phytoproductive functioning: case study of the Burtinskaya steppe landscape (Southern Urals) // (Bulletin of the Karaganda University. "Biology. Medicine. Geography" Series. 2022. Vol. 106, no. 2. P. 191–202.