

Д.А. Иванов, доктор сельскохозяйственных наук  
 О.В. Карасёва, кандидат сельскохозяйственных наук  
 М.В. Рублюк, кандидат сельскохозяйственных наук  
 О.Н. Анциферова, кандидат сельскохозяйственных наук  
 ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»  
 РФ, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2  
 E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

УДК 631.5;631.6;911.2

DOI:10.30850/vrsn/2021/2/46-50

## ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АГРОЛАНДШАФТЕ НА ПРИМЕРЕ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ

В работе показаны результаты исследования особенностей временной динамики продуктивности многолетнего пятикомпонентного травостоя в различных частях агроландшафта конечного-моренной гряды. Работу выполняли на агроэкологическом полигоне ВНИИМЗ – филиала ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева» в 2003–2013 годах. Наблюдения за динамикой урожайности трав осуществляли на трансекте – физико-географическом профиле, пересекающем основные ландшафтные позиции моренного холма, в регулярно расположенных 120 точках. Результаты мониторинга урожайности обрабатывали методами описательной статистики, дисперсионным, кластерным и корреляционным анализом. Для интерпретации результатов наблюдений использовали параметры агроклиматических обстановок за вегетационные периоды. Наиболее удобные для изучения динамики урожайности – данные, производные от ее балльных значений, которые лишены «выбросов» и близки к нормальному закону распределения. Достаточно информативный метод выявления на местности территорий с однотипной динамикой урожайности – кластерный анализ, его результаты можно представить в виде совокупностей точек на карте или профиле. Исследование взаиморасположения точек пространства, относящихся к различным кластерам, показало, что они располагаются в виде ассоциаций, тяготеющих к определенным агромикрорландшафтам – элементам мезорельефа. Первичный статистический анализ параметров кластеров, а также построение гистограмм их распределений позволяет разделять на группы, детерминированные ландшафтными особенностями. Корреляционный анализ дает возможность определить факторы, формирующие характер динамики урожайности культуры в пределах конкретного кластера. Выявлено, что эти факторы зависят от микрорландшафтных особенностей агрогеосистемы. На основе информации о характере временной динамики урожайности культуры в различных частях агроландшафта можно прогнозировать ее продуктивность и адаптировать пакеты мероприятий по оптимизации использования конкретного поля в сельскохозяйственной практике.

**Ключевые слова:** временная динамика урожайности, продуктивность травостоя, агроландшафт, статистический анализ, агроэкологически-однотипные территории.

D.A. Ivanov, *Grand PhD in Agricultural sciences*  
 O.V. Karaseva, *PhD in Agricultural sciences*  
 M.V. Rublyuk, *PhD in Agricultural sciences*  
 O.N. Antsiferova, *PhD in Agricultural sciences*  
 FRC V.V. Dokuchaev Soil Science Institute  
 RF, 119017, g. Moskva, Pyzhevskij per., 7, str. 2  
 E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

## STUDY OF DYNAMIC PROCESSES IN THE AGRICULTURAL LANDSCAPE USING A PERENNIAL GRASSES EXAMPLE

The paper shows the results of studying the characteristics of the temporal dynamics of productivity of a perennial five-component grass stand in various parts of the agrolandscape of the finite moraine ridge. The studies were carried out at the agroecological training ground of the All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands – Branch of the Federal Research Centre V.V. Dokuchaev Soil Science Institute in 2003–2013. Observations of the dynamics of grass yields were carried out on the transect – a physico-geographical profile that intersects the main landscape positions of the moraine hill, at 120 points regularly located. Yield monitoring results were processed using descriptive statistics methods, as well as variance, cluster and correlation analysis. To interpret the results of observations, we used the parameters of agroclimatic conditions for the growing periods of the research years. Studies have shown that the most convenient for studying the dynamics of crop yields are data derived from its point values, since they are devoid of «emissions» and are closest to the normal distribution law. A fairly informative method for identifying areas with the same yield dynamics on the terrain is cluster analysis, the results of which can be represented as sets of points on a map or profile. A study of the relative positions of space points belonging to different clusters showed that they are located in the form of associations gravitating to certain agromicrolandscapes – mesorelief elements. The initial statistical analysis of cluster parameters, as well as the construction of histograms of their distributions, makes it possible to divide them into groups determined by landscape features. Correlation analysis makes it possible to determine the factors that shape the nature of the dynamics of crop yields within a particular cluster. It was revealed that these factors largely depend on the microlandscape features of the agrogeosystem. Based on information on the nature of the temporal dynamics of crop yields in various parts of the agrolandscape, one can predict its productivity and adapt packages of measures to optimize the use of a specific field in agricultural practice.

**Key words:** Temporal dynamics of productivity, grass stand productivity, agrolandscape, statistical analysis, agroecological-homogeneous territories.

Агрогеосистемы (АГС) – сельскохозяйственно-преобразованные геокомплексы, характеризующиеся высокой динамичностью протекающих в них процессов не только с привлечением антропогенной энергии, но и вследствие флуктуаций агроклиматической и социальной обстановки. Временная динамика присуща всем компонентам АГС, однако наиболее сильно проявляется в растительном ярусе. [4] Знание характеристик пространственной и временной изменчивости урожайности культур позволяет прогнозировать продуктивность агроландшафтов, а также корректно планировать сроки и особенности проведения агротехнологических мероприятий в их различных частях – это основной атрибут адаптивно-ландшафтного земледелия. [1]

Мониторинг продуктивности растений показал, что можно выделить определенные пространственные локусы – агроэкологически-однотипные территории (АОТ), название которым впервые дал А.А. Жученко. [3] В нашей трактовке это пространства с однотипными проявлениями адаптивных реакций совокупности растений одного вида на изменения природной обстановки. [5]

Мы выделили несколько типов АОТ, наименее изученных – динамически-гомогенных (ДГ) АОТ, в их пределах временная динамика вариабельности урожая или другого показателя состояния совокупности растений однотипна. Границы ареалов устойчивы во времени, так как отображают многолетнюю динамику показателей жизнедеятельности растений. Особенности этих АОТ отражают закономерности пространственно-временного изменения состояния растений. Их учет важен для разработки прогнозов урожайности и состояния посевов. [5]

Цель работы – выявление наиболее оптимального способа выделения в агроландшафте ареалов динамически-гомогенных АОТ и изучение их особенностей.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

За урожайностью многолетних трав наблюдали в пределах конечно-моренной гряды. [2] Долговременный мониторинг урожайности сена пятикомпонентного (люцерна синегибридная, райграс пастбищный, клевер красный, тимофеевка луговая и овсяница луговая) злакобобового травостоя выполняли в 2003–2013 годах на агроэкологическом полигоне ВНИИМЗ – филиала ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева», расположенном в пределах конечно-моренной гряды в 4-х км к востоку от г. Тверь, с относительной высотой 12 м, состоящей из плоской вершины, северного пологого склона (крутизна 2...3°), южных склонов (3...5°) и межхолмных депрессий (северной и южной). Почвообразующие породы на территории стационара – двучленные отложения. В южной части пахотные горизонты почв имеют песчаный и супесчаный гранулометрический состав, мощность легкого наноса местами превышает 1,5 м. На вершине и северном склоне холма – супесь и легкий суглинок, мощность легкого кроющего наноса до 1 м, а местами в межхолмной депрессии морена выходит на поверхность. Почвенный покров представлен контрастной мозаикой – вариацией дер-

ново-подзолистых глееватых и глеевых почв, развивающихся на двучленных отложениях различной мощности – он состоит из чередования пятен различного гранулометрического состава и геологического строения дерново-подзолистых почв разной степени гидроморфизма (профильно-глееватые и профильно-глеевые).

Исследования проводили на агроэкологической трансекте (физико-географический профиль) – узком поле, пересекающем все микроландшафтные позиции (элементы мезорельефа) конечно-моренной гряды: транзитно-аккумулятивные агро-микроландшафты (АМЛ) нижних частей склонов и межхолмных депрессий, характеризующиеся аккумуляцией элементов питания из намывных и грунтовых вод; транзитные АМЛ, расположенные в центральных частях склонов, в которых господствует латеральный ток влаги; элювиально-транзитные местоположения верхних частей склонов, где наряду с латеральным током влаги присутствует ее вертикальное перемещение по почвенному профилю; элювиально-аккумулятивный ландшафт вершины, в пределах которого происходит вертикальное промывание почвенного профиля и локальная аккумуляция влаги в микропонижениях (блюдца). Выделено 9 элементов мезорельефа – АМЛ: 1. Транзитно-аккумулятивный южного склона (Т-Аю); 2. Транзитный южного склона (Тю); 3. Элювиально-транзитный южного склона (Э-Тю); 4. Элювиально-аккумулятивный вершины (Э-А); 5. Элювиально-транзитный северного склона (Э-Тс); 6. Транзитный северного склона (Тс); 7. Транзитно-аккумулятивный северного склона (Т-Ас); 8. Транзитный южного склона 2 – на севере стационара (Тю2); 9. Элювиально-транзитный южного склона 2 – на севере стационара (Э-Тю 2).

Границы элементов мезорельефа проходят по «бровкам» – участкам склонов, где заметно меняется их крутизна, а в некоторых случаях и экспозиция (ориентация по сторонам горизонта). Границы почвенных комбинаций, как правило, не совпадают с рубежами АМЛ, так как определяются изменениями геологического строения почвообразующих пород. Мы изучали влияние особенностей мезорельефа на характер ДГ АОТ (почвенный покров будет описан позднее).

Выводное поле располагалось вдоль трансекты на полосе шириной 7,2 м, длиной – 1300 м. Травостой эксплуатировался в одноукосном режиме без внесения удобрений. Точки опробования, в которых определяли массу сена, равномерно распределены вдоль трансекты на расстоянии 10 м друг от друга.

Результаты мониторинга урожайности обрабатывали методами описательной статистики, а также дисперсионным, кластерным и корреляционным анализами на основе пакетов EXEL и STATISTICA 7. Для интерпретации результатов наблюдений использовали параметры агроклиматических обстановок за вегетационные периоды (май и июнь в год укоса; июль-сентябрь предыдущего года), заимствованные из базы данных Тверской метеостанции. В работе учитывали агроклиматические показатели: 1)  $\sum_{t>10}^{\circ}$ ; 2) Сумма осадков, мм; 3) ГТК по Селянинову.

Для выбора наиболее информативного способа изучения свойств ДГ АОТ данные по продуктивности травостоя за каждый год представлены по 120 точкам опробования в трех видах: 1) Конкретная урожайность сена, ц/га; 2) Оценка урожайности по каждому году в баллах (1 балл – максимальная продуктивность, 120 – минимальная); 3) Отклонения конкретных баллов от среднемноголетней балльной оценки («А»).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Переход от значений конкретной урожайности сена к отклонениям от ее средней балльной оценки позволяет элиминировать случайные выбросы в массиве данных и устранить влияние на него дополнительных факторов (рис. 1, 2-я стр. обл.).

Среднемноголетние конкретные показатели урожайности сена в пределах трансекты колеблются от 40 до 88 ц/га. Средняя урожайность за годы исследований составила 60 ц/га, а медианная – 58,4 ц/га. Распределение частот характеризуется значительной левосторонней асимметрией (0,73), что свидетельствует о преобладании малых значений урожайности. В пределах трансекты наблюдается неизменность линейного тренда урожайности и выраженный ее полиномиальный тренд, максимумы которого приходятся на транзитные АМЛ, а минимумы – вершину холма и транзитно-аккумулятивный АМЛ северного склона. Следовательно, энергичный водообмен в центральных частях склонов способствует увеличению продуктивности трав, тогда как медленные аккумулятивные и элювиальные процессы на плоских поверхностях приводят к ее понижению.

Оценка продуктивности свободна от влияния агроклиматических условий, так как рассчитывается по каждой точке для каждого года в отдельности. Среднемноголетние значения варьируют от 32,2 до 89,7 балла (среднее – 60,3, медианное – 60,0). В распределении частот асимметричность практически отсутствует (-0,02), что говорит о его нормальности. В пределах трансекты наблюдается выраженный линейный тренд повышения оценок урожайности при движении с юга на север. Это означает, что на юге стационара, в зоне преобладания относительно легких почв, наблюдаются наиболее комфортные условия для произрастания пятикомпонентной травосмеси. Полиномиальный тренд изменения балльных оценок принципиально не отличается от вышеописанного.

Вычисление в каждой точке отклонений годовых балльных значений от их среднемноголетнего показателя (принимаяют положительные и отрицательные значения, обозначаются литерой «А») позволяет элиминировать и случайные выбросы, уменьшить воздействие гранулометрического состава почв на характер массива данных. Среднемноголетние значения колеблются в диапазоне от -6,5Е -15 до 6,5Е -15. Среднее значение «А» составляет -1,5Е -16, медиана – 0, а асимметрия распределения -0,09, что говорит о нормальности распределения показателя. Средние отклонения баллов во многом лишены недостатков двух предыдущих подходов, что позволяет нам в дальнейшем

использовать именно эти значения при изучении динамических процессов в агроландшафте.

Особенности пространственного расположения ДГ АОТ определяли с помощью кластерного анализа параметра «А», изменяющегося в каждой точке опробования в течение 11 лет. Рабочая гипотеза исследований предполагала, что расположение в пределах агроландшафта отдельных кластеров должно в значительной степени определяться особенностями его микроландшафтного строения. Исходя из этого находили 9 кластеров, пространственное распределение которых в пределах трансекты показано на рис. 2, 2-я стр. обл., где точки пространства, относящиеся к разным кластерам, не сосредоточены в строго определенных местах. Они образуют некоторые ассоциации – большинство кластеров состоят из «основной» части, в которой точки расположены близко друг к другу, и «периферийной» с диффузией точек кластера по другим частям АГС. Хотя кластеры и взаимопроникают друг в друга, их расположение в пределах геокомплекса не хаотично. На верхних гипсометрических отметках холма находятся кластеры № 3 и 5, на северном склоне преобладают точки кластера № 7, в транзите южного – № 4 и 6 и т. д. Следует отметить, что границы кластеров не всегда совпадают с рубежами АМЛ: во-первых, «бровки» рельефа, как правило, не четко выражены на местности и не достаточно точно маркируют смену геохимических обстановок (характер и интенсивность перераспределения влаги и питательных веществ) в пределах конкретной территории; во-вторых, на характере растительных ассоциаций существенно сказывается пестрота почвенного покрова стационара; в-третьих, в работе не учтен характер микрорельефа дневной поверхности, вследствие недостаточно крупного масштаба топосъемки, который во многом определяет микропестроту свойств травостоя; в-четвертых, особенности кластеров во многом зависят от характера внутриценотических связей, сложившихся в пределах старого травостоя, посеянного в 1997 году.

Дальнейший статистический анализ выявил закономерности о влиянии особенностей микроландшафтного строения геосистемы на расположение и характер ДГ АОТ (табл. 1).

Следует отметить, что средние значения показателей «А» во всех кластерах практически равны 0, однако анализ медианных значений их распределений позволяет разделить все кластеры на 2 группы: 1) №№ 1, 4 и 6 повышенными значениями урожайности. Сравнение номеров медианных точек опробования и асимметрии их распределений показывает, что они находятся в пределах южного (песчаного) склона холма; 2) Остальные кластеры отличаются пониженной урожайностью и сосредоточены по другим частям геокомплекса.

Сопоставляя гистограммы распределений частот значений «А», рассчитанных для каждого кластера, выделили из их совокупности кластеры 1 и 2 трехинтервальными гистограммами, у остальных кластеров они двухинтервальные. Объяснить это можно энергичным внедрением аборигенных видов в травостой, трансформирующим характер его адаптивных реакций на изменчивость агроклиматической обстановки, так как эти кластеры располагаются

**Таблица 1.**  
**Характеристики кластеров отклонений годовых балльных значений урожайности травостоя от среднеголетних показателей («А»)**

№ кластера	Параметры распределений показателей «А»			Пространственные параметры кластеров	
	Среднее	Медиана отклонений	Асимметрия отклонений	Медианная точка опробования	Асимметрия точек
1	1,29E-15	-3,5	-0,11031	11	1,924668
2	0	2,188811	-1,57027	110	-1,24732
3	-6,1E-15	11,30303	-0,82396	46	-0,15044
4	-2,7E-15	-5,58042	0,514775	25	3,176071
5	0	10,23636	-0,51157	49	-0,06796
6	7,27E-16	-6,78322	0,235662	24	0,538838
7	-3,2E-15	2,133333	0,041115	80	0,127343
8	0	3,397727	-0,22817	92	-0,27994
9	0	3,328671	-0,56457	103	-3,27737

**Таблица 2.**  
**Влияние агроклиматических условий на продуктивность травостоя в пределах отдельных кластеров**

Показатель, месяц	№ кластера*									
	1	6	4	3	5	7	8	9	2	
Σt>10o	Май	-0,08	0,15	0,30	0,50	0,06	-0,41	-0,57	-0,33	0,23
	Июнь	-0,04	-0,11	0,61	0,42	0,06	-0,66	-0,31	-0,08	0,18
	Июль	-0,09	0,29	0,43	0,47	0,49	-0,43	-0,23	-0,83	-0,16
	Август	-0,26	-0,31	0,31	-0,22	0,38	0,27	0,31	-0,44	-0,06
	Сентябрь	-0,06	-0,00	0,24	0,23	0,08	-0,24	-0,34	-0,35	0,49
	Среднее	-0,13	0,44	0,23	0,51	0,29	-0,62	-0,42	-0,56	0,23
ГТК	Май	-0,27	0,16	-0,18	0,05	0,39	0,01	0,04	-0,50	0,23
	Июнь	-0,58	-0,52	-0,14	0,18	-0,24	0,24	0,37	0,36	0,04
	Июль	-0,26	0,37	-0,33	-0,15	-0,03	0,27	-0,21	-0,29	0,55
	Август	0,66	0,16	-0,07	-0,08	-0,35	0,12	-0,06	0,04	-0,14
	Сентябрь	-0,12	0,73	-0,10	-0,21	-0,31	0,24	-0,18	-0,16	0,16
Сумма осадков	Среднее	-0,32	0,28	-0,35	-0,05	-0,15	0,34	0,03	-0,24	0,36
	Май	-0,34	0,16	-0,23	0,16	0,47	0,04	0,02	-0,56	0,14
	Июнь	-0,46	-0,55	0,14	0,16	-0,33	0,04	0,35	0,41	0,10
	Июль	-0,17	0,42	-0,12	-0,13	-0,03	0,09	-0,38	-0,28	0,59
	Август	0,70	-0,05	0,16	-0,11	-0,56	-0,00	0,08	0,26	-0,09
Медианные точки	Сентябрь	0,01	0,81	-0,07	-0,30	-0,33	0,26	-0,24	-0,13	0,04
	Среднее	-0,15	0,28	-0,06	-0,06	-0,31	0,16	-0,08	-0,16	0,44
	11	24	25	46	49	80	92	103	110	

\* – кластеры расположены в порядке возрастания значений медианных точек.

в краевых зонах трансекты – первый на юге, второй – на севере. Остальная совокупность кластеров также может быть разделена на две группы: №№ 4, 6-8 отличаются от остальных преобладанием в их гистограммах интервала с повышенной урожайностью; №№ 3, 5 и 9 повышенная частота низких значений урожайности. Так как каждый кластер характеризуется особенностями временной динамики показателя «А», определение степени влияния на него климатических факторов позволит выявить их основные генетические черты (табл. 2).

Кластеры, расположенные на южном (песчаный) склоне холма и на его вершине (№№ 4 и 3) характеризуются снижением продуктивности травостоя при увеличении суммы эффективных температур, кластеры тяготеющие к северному склону (№№ 7 и 8) испытывают недостаток тепла, а травы в кластере № 9 (межхолмная депрессия на севере стационара) страдают от его избытка. Увеличение

перед укосом ГТК и суммы осадков приводит к росту урожайности трав на южном склоне, осенние осадки здесь угнетают травостой (№№ 1 и 6). Кластер № 5, тяготеющий к вершине, характеризуется повышением урожайности при усилении осадков в августе. Травы в межхолмной депрессии на севере стационара (№ 9) положительно отзываются на увеличение майских осадков, а июльские на южном склоне с более тяжелыми почвами (№ 2) снижают продуктивность травостоя.

Кластерный анализ показал, что природные особенности различных элементов мезорельефа в пределах агроландшафта существенно влияют на временную вариабельность урожайности многолетних трав, что дает возможность разрабатывать пространственно-адаптированные мероприятия по оптимизации их продукционного процесса.

**Выводы.** Исследование динамических процессов в агроландшафте возможно на основе результатов

долговременного мониторинга урожайности культур в пределах трансекты, пересекающей основные структурные части геокомплекса. Наиболее удобные для этого производные от балльных значений урожайности данные, так как они лишены «выбросов» и близки к нормальному закону распределения.

Достаточно информативный метод изучения и выделения на местности динамически-гомогенных агроэкологически-однотипных территорий в пределах агроландшафта – кластерный анализ, результаты которого можно представить в виде совокупностей точек на карте или профиле.

Первичный статистический анализ параметров кластеров, а также построение гистограмм их распределений позволяет разделять на группы, детерминированные как ландшафтными особенностями, так и расположением в пределах поля.

Корреляционный анализ дает возможность определить факторы, формирующие характер динамики урожайности культуры в пределах конкретного кластера. Выявлено, что эти факторы в значительной степени зависят от микроландшафтных особенностей агрогеосистемы.

На основе информации о временной динамике урожайности культуры в различных частях агроландшафта можно прогнозировать ее продуктивность и адаптировать пакеты мероприятий по оптимизации использования конкретного поля в сельскохозяйственной практике.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. Под редакцией академика РАСХН В.И. Кирюшина, академика РАСХН А.Л. Иванова.

Методическое руководство. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 784 с.

2. Егорова, Г.С. Многолетние травы как восстановители почвенного плодородия и основа кормопроизводства. / Г.С. Егорова, Л.В. Петрунина // Плодородие. – 2008. – № 6. – С. 38–39.
3. Жученко, А.А. Адаптивное растениеводство: (Эколого-генетические основы) / А.А. Жученко. – Кишинев: Штиница, 1990. – 431 с.
4. Иванов, Д.А. Виды динамики состояния мелиорированных агроландшафтов. / Д.А. Иванов // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2018. – Т. 65. – № 4. – С. 4–18.
5. Иванов, Д.А. Ландшафтно-мелиоративные системы земледелия (прикладная агрогеография). / Д.А. Иванов, Н.Г. Ковалев. – Тверь: Издатель А.Н. Кондратьев, 2017. – 310 с.

#### LIST OF SOURCES

1. Agroekologicheskaya ocenka zemel', proektirovanie adaptivno-landshaftnyh sistem zemledeliya i agrotekhnologij. Pod redakciej akademika RASKHN V.I. Kiryushina, akademika RASKHN A.L. Ivanova. Metodicheskoe rukovodstvo. – M.: FGNU «Rosinformagrotekh», 2005. – 784 s.
2. Egorova, G.S. Mnogoletnie travy kak vosstanoviteli pochvennogo plodorodiya i osnova kormoproizvodstva. / G.S. Egorova, L.V. Petrunina // Plodorodie. – 2008. – № 6. – S. 38–39.
3. Zhuchenko, A.A. Adaptivnoe rastenievodstvo: (Ekologo-geneticheskie osnovy) / A.A. Zhuchenko. – Kishinev: Shtinica, 1990. – 431 s.
4. Ivanov, D.A. Vidy dinamiki sostoyaniya meliorirovannyh agrolandshaftov. / D.A. Ivanov // Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka. – 2018. – T. 65. – № 4. – S. 4–18.
5. Ivanov, D.A. Landshaftno-meliorativnye sistemy zemledeliya (prikladnaya agrogeografiya). / D.A. Ivanov, N.G. Kovalev. – Tver': Izdatel' A.N. Kondrat'ev, 2017. – 310 s.